

**Projekt ANSICHT**

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





PROJ	PSP	OBJ	FUNK	KOMP	BAUG	AG	UA	LFNR	RV
FE						BE	BY	0004	00

DOKID: 11780519  
ULV-Nr.: 659474

# Projekt ANSICHT

## Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD

### Technischer Bericht

Andree Lommerzheim & Michael Jobmann

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-14-2015-TB

Peine 28.05.2015

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	Abfallgebäude.....	6
2.3.1	RK-BE .....	7
2.3.2	RK-HA .....	8
2.3.3	RK-WA .....	8
2.3.4	RK-ST.....	9
2.4	Grubengebäude.....	9
2.5	Streckenausbau.....	11
2.6	Einlagerungskonzept .....	12
3	Verfüll- und Verschlusskonzept.....	14
3.1	Nahfeldsystem.....	17
3.1.1	Sandverfüllung.....	17
3.1.2	Innenliner.....	18
3.1.3	Buffer.....	19
3.2	Bohrlochverschluss der Einlagerungsbohrlöcher .....	21
3.3	Streckenverschlüsse.....	22
3.4	Schachtverschlüsse.....	25
3.5	Versatz .....	28
3.6	Sonstige Verfüllungen.....	30
3.6.1	Verfüllung des Infrastrukturbereiches.....	30
3.6.2	Bohrlochversiegelung der Erkundungsbohrungen .....	31
4	Zusammenfassung .....	32
5	Offene Fragen .....	33
5.1	Grundsätzliche offene Fragen.....	33
5.2	Fragen zur weiteren Präzisierung .....	33
6	Literaturverzeichnis.....	34

Abkürzungsverzeichnis

ANHANG



## 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 NORD entwickelt wurde. Das Endlagerstandortmodell NORD beschreibt in vereinfachter modellhafter Weise die geologische Gesamtsituation im östlichen Niedersächsischen Becken (Reinhold et al. 2013, Reinhold & Sönke 2012). Die Modell-Einheiten sind relativ homogen entwickelte und regional gut charakterisierbare geologische Einheiten.

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

## 2 Endlagerkonzept

### 2.1 Grundlagen

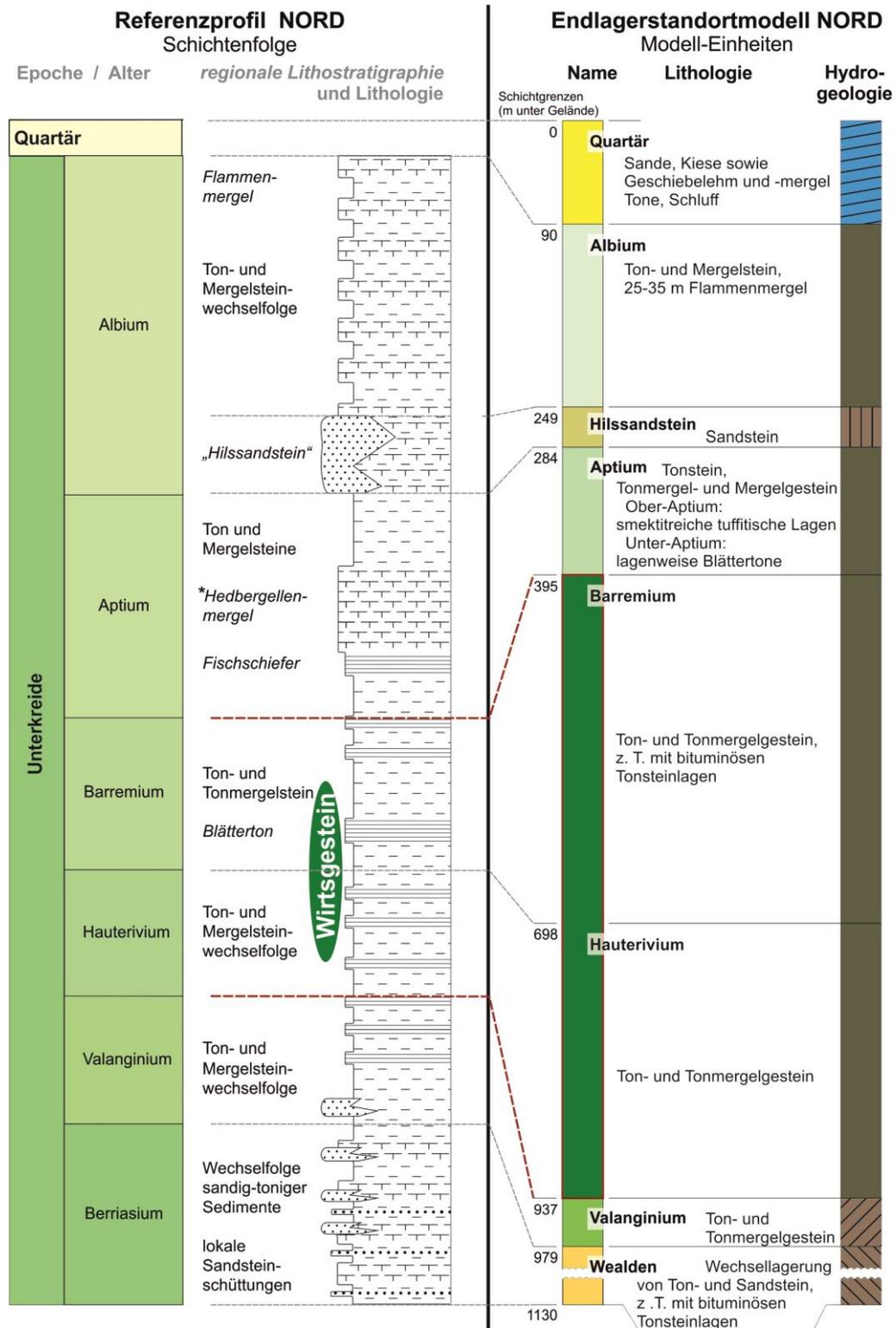
Das Endlagerkonzept basiert u.a. auf den Ergebnissen der FuE-Vorhaben GEIST (Filbert et al. 2005), GENESIS (Jobmann et al. 2007) und ERATO (Pöhler et al. 2010). Die in diesen Projekten diskutierten Endlagerkonzepte wurden aufgrund neuer Forschungsergebnisse zur Endlagerung im Tongestein sowie den im 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).

Tab. 2.1: Abfallmengengerüst nach Bollingerfehr et al. (2012).

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

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

Grundlage für die Planungen des Grubengebäudes ist das aus dem Endlagerstandortmodell abgeleitete und in Abb. 2.1 dargestellte geologische Profil (Reinhold et al. 2013). Detailliertere Beschreibungen finden sich bei Jahn & Sönke (2013), Nowak & Maßmann (2013) und Reinhold et al. (2013). Das Endlagerkonzept entspricht einem frühen Planungsstadium und berücksichtigt die geologischen Eigenschaften des Endlagerstandortmodells Nord. 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.



**Grundsignaturen der Lithologie**

- — — Tonstein
- — — bituminöse Tonsteinlagen
- — — Mergelstein
- · · · Sandstein

\* erhöhte Gesteinsfestigkeit gegenüber den Ton- und Tonmergelgesteinen

**Hydraulische Eigenschaften**

	Grundwasserleiter	Grundwassergeringleiter		
Durchlässigkeit	mäßig	gering	sehr gering	äußerst gering
k <sub>r</sub> -Wert	>10 <sup>-5</sup> · 10 <sup>-4</sup>	>10 <sup>-7</sup> · 10 <sup>-5</sup>	>10 <sup>-9</sup> · 10 <sup>-7</sup>	>10 <sup>-10</sup> · 10 <sup>-9</sup>
Grenzen (m/s)				≤10 <sup>-10</sup>

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

## 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 betreffen nur das oberste Nebengebirge (Quartär und eventuell noch den Hilssandstein) und 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 gesteinspezifischen Eigenschaften (z.B. thermische, mechanische und hydraulische Eigenschaften) sowie 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 Einlagerungsbohrlöcher) dienen. Diese Bohrungen werden, soweit die Bohrungsergebnisse den Erwartungen entsprechen, im Zuge der weiteren Streckenauffahrung bzw. bei der Erstellung der Einlagerungsbohrlöcher 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 Einlagerungsbohrlöchern 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 Bohrlochlagerung in Tongestein ist eine rückholbare Kokille (RK) vorgesehen, die zur Einhaltung des Temperaturkriteriums nur mit den Brennstäben von 2 DWR-Brennelementen, 6 SWR-Brennelementen oder 5 WWR-DWR- Brennelementen (in zwei Brennstabbüchsen aus Edelstahl 1.4541) beladen wird. Außerdem kann die RK 2 HAW-Kokillen (CSD-V), 3 Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen mit vernachlässigbarer Wärmeleistung (CSD-B oder CSD-C) oder kompaktierte Brennelement-Strukturteile aus der BE-Konditionierung aufnehmen (Bollingerfehr et al. 2012). Die RK hat eine Länge von 5060 mm, einen Durchmesser von 520 mm (oben) und 470 mm (unten), ein Gebindevolumen von 0,94 m<sup>3</sup> und eine max. Gebindemasse von 5266 kg. Die Wandstärke beträgt 44,5 mm oben und 19,5 mm unten. Die RK hat einen konischen Behälterkörper und einen angespressten oder angeschweißten Boden (Abb. 2.2). Der Behälterkörper besteht, wie der Primär- und Sekundärdeckel, aus Feinkornbaustahl 15MnNi6.3 (Werkstoff 1.6210). Am oberen Ende des Behälterschachtes wird eine 285 mm starke Platte aus Polyethylen (oder Graphit) zur Neutronenabschirmung eingebracht bevor der Innenraum durch Verschrauben mit einem Primärdeckel verschlossen wird. Über den Primärdeckel wird ein Sekundärdeckel aufgelegt, der mit dem Behälterkörper gasdicht verschweißt wird. Zur Handhabung des Behälters weist der Deckel einen Traggilz auf.

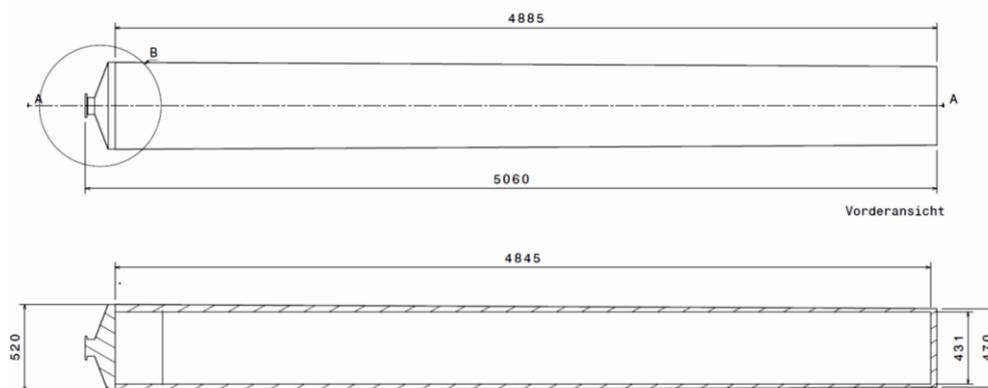


Abb. 2.2: Rückholbare Bohrlochkokille (Bollingerfehr et al. 2012)

An die RK mit unterschiedlicher Beladung bestehen teilweise unterschiedliche Anforderungen. In den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) 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 Freisetzungen radioaktiver 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 darüber hinaus über einen Zeitraum von 500 Jahre handhabbar und damit bergbar sein (RK-BE, RK-HA). An Behälter mit volatilen Radionukliden, d.h. Brennelementbehälter (RK-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 (RK-WA und RK-ST).

Im Rahmen von ANSICHT wird vereinfachend für alle Endlagerbehälter ein Funktionszeitraum von 500 Jahre 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 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).*

Aus den in den obigen Bemerkungen darstellten Aussagen über Funktionsdauern von Behältern in anderen Endlagerprojekten ergäbe sich im Falle einer Übertragung auf das deutsche Konzept möglicherweise eine Behälterfunktionsdauer, die über die 500 Jahre hinausgeht. Ob eine über 500 Jahre hinausgehende Anforderung an die Behälter gestellt werden sollte, muss aufgrund der standortspezifischen Systementwicklung anhand von radiologischen Konsequenzanalysen ermittelt werden. Ist dies der Fall, muss das Behälterkonzept entsprechend neu bewertet werden. Im Folgenden werden die Anforderungen an die einzelnen Behältertypen separat beschrieben. Dabei wird unterschieden zwischen Regelwerksanforderungen und projektspezifischen Anforderungen, beides nur bezogen auf die Nachbetriebsphase. 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 RK-BE**

#### **Regelwerksanforderungen**

Die Behälter sollen während der Betriebsphase rückholbar und über einen Zeitraum von 500 Jahre 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 und der Gasbildung durch Korrosion und Radiolyse müssen die Behälter gegen entsprechende Fluidrücke von außen und von innen ausgelegt sein. Die mechanische Integrität des Behälters muss über die Funktionsdauer gewährleistet sein. Dies wird durch den Einbau eines Innenliners (vgl. Kapitel 3.1.2) und seiner hydromechanischen Schutzwirkung signifikant unterstützt. Eine Metallversprödung 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 im Standortmilieu während ihrer Funktionsdauer korrosionsbeständig sein.

**2.3.2 RK-HA****Regelwerksanforderungen**

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

**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 Fluidrücke von außen ausgelegt sein. Die mechanische Integrität des Behälters muss über die Funktionsdauer gewährleistet sein. Dies wird durch den Einbau eines Innenliners (vgl. Kapitel 3.1.2) und seiner hydromechanischen Schutzwirkung signifikant unterstützt. Eine Metallversprödung 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 zulässigen Grenztemperaturen für die Gebinde und 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 im Standortmilieu während ihrer Funktionsdauer korrosionsbeständig sein.

**2.3.3 RK-WA****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 Fluidrücke von außen und von innen ausgelegt sein. Dies wird durch den Einbau eines Innenliners (vgl. Kapitel 3.1.2) und seiner hydromechanischen Schutzwirkung signifikant unterstützt. Eine Metallversprödung 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 korrosionsbeständig sein.

#### 2.3.4 RK-ST

##### Regelwerksanforderungen

keine

##### Projekt-spezifische Anforderungen

Hydraulische Anforderung: Die Behälter sollen während der Funktionsdauer lösungs- und gasdicht 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. Dies wird durch den Einbau eines Innenliners (vgl. Kapitel 3.1.2) und seiner hydromechanischen Schutzwirkung signifikant unterstützt. Eine Metallversprödung 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 korrosionsbeständig sein.

## 2.4 Grubengebäude

Entsprechend den - im Vergleich zu den bituminösen Barremium-Tonsteinen - für den Bergbau günstigeren geomechanischen Eigenschaften der kalkigen Hauterivium-Tonsteine soll die Einlagerungssohle in einer Tiefe von ca. 770 m unter GOK angeordnet werden.

Das Endlagerkonzept sieht als Zugang zum Grubengebäude zwei ca. 800 m tiefe Schächte (incl. ca. 20 m Schachtsumpf) vor: ein Schacht für den Gebindetransport und als ausziehender Wetterschacht sowie ein Schacht für die konventionelle Förderung und als einziehender Wetterschacht. Um die Schächte ist ein Sicherheitspfeiler von 50 m vorzusehen. Der Abstand zwischen den Schächten beträgt 400 m, der Abstand vom jeweils nächsten Schacht zur ersten Einlagerungsstrecke 300 m. Außerdem besteht das Grubengebäude aus einem Infrastrukturbereich in Schachtnähe und zwei Einlagerungsbereichen (einer für ausgediente Brennelemente, einer für Wiederaufarbeitungsabfälle und Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung), die durch Richtstrecken für den Gebindetransport (40 m<sup>2</sup> Querschnitt, rot in Abb. 2.3) und für den Bergbaubetrieb (30 m<sup>2</sup> Querschnitt, gelb in Abb. 2.3) mit den Schächten verbunden sind (Abb. 2.3). Der Einlagerungsbereich für ausgediente Brennelemente umfasst 32 Einlagerungsfelder, der Einlagerungsbereich für Wiederaufarbeitungsabfälle 12 Einlagerungsfelder. Da der Gebindetransport mit Schienenfahrzeugen erfolgen soll, sind bei Streckenverzweigungen die erforderlichen Gleisradien von 30 m zu berücksichtigen. Parallel zur Richtstrecke für den Gebindetransport verlaufen zwei Abwetterstrecken (15 m<sup>2</sup> Querschnitt, blau in Abb. 2.3). Der Zugang von den Richtstrecken zu den Einlagerungsfeldern erfolgt über Querschläge (40 m<sup>2</sup> Querschnitt). Die Einlagerungsfelder bestehen aus jeweils 9 Bohrlochüberfahrungsstrecken, in deren Sohle die Einlagerungsbohrlöcher benachbarter Strecken entsprechend einer hexagonalen Anordnung versetzt positioniert werden sollen (abwechselnd eine Strecke mit 12 Bohrlöchern und eine Strecke mit 13 Bohrlöchern). Aus betriebssicherheitlichen Gründen wird die Länge der Bohrlochüberfahrungsstrecken auf 400 m begrenzt.

Aus Gründen der Betriebssicherheit müssen alle Grubenräume mit längerer Offenstandszeit (z.B. Schächte, Infrastrukturbereich, Verbindungsstrecken) durch einen Betonausbau stabilisiert werden.

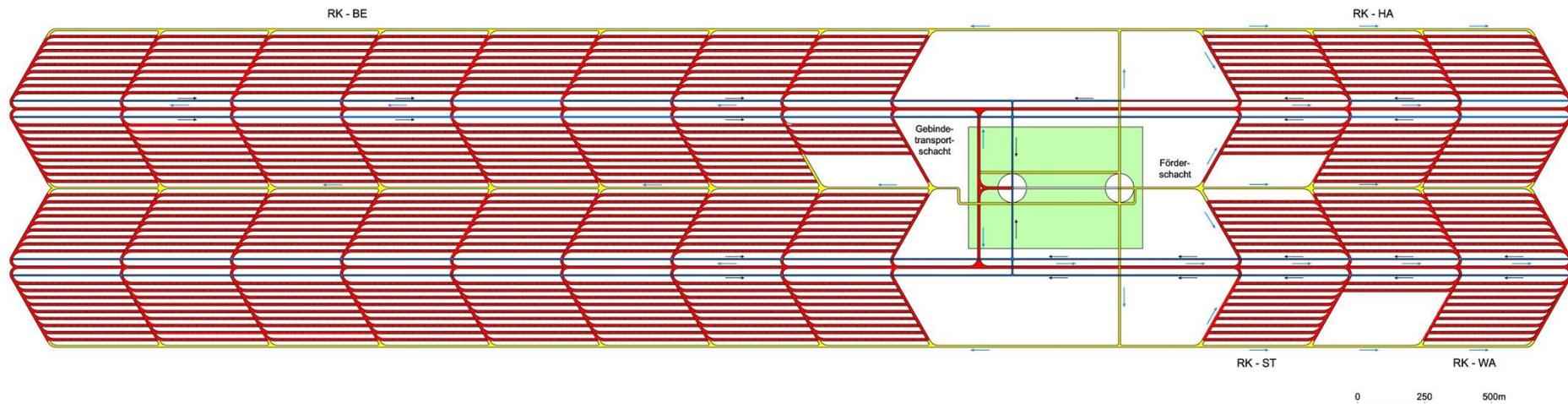


Abb. 2.3: Grubengebäudelayout für das Bohrlochlagerungskonzept. Gelb: konventioneller Betrieb, Rot und Blau: Gebidetransport und –einlagerung, Grün: Infrastrukturbereich, (verändert nach Pöhler et al. 2010)

Für die Bohrlochüberfahrungsstrecken 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 700 m auf einen stabilen Ausbau nicht verzichtet werden kann.

Die Geometrie des Grubengebäudes wurde, unter Berücksichtigung der betrieblichen Abläufe, im Detail im Zuge des Projektes ERATO ausgelegt und beschrieben (Pöhler et al. 2010). Im Rahmen von ANSICHT erfolgte eine Anpassung an das zugrunde gelegte modifizierte Einlagerungskonzept (vgl. Kapitel 2.6).

## 2.5 Streckenausbau

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

### **Funktion**

Mechanische Stabilisierung der Grubenräume.

### **Funktionsdauer**

Die Funktionsdauer ist auf die Betriebsphase (ca. 80 Jahre) begrenzt.

### **Auslegungsanforderungen:**

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

Chemische Anforderungen: Chemisch weitestgehend stabil während der Betriebsphase.

Thermische, Hydraulische und biologische Anforderungen werden nicht spezifiziert.

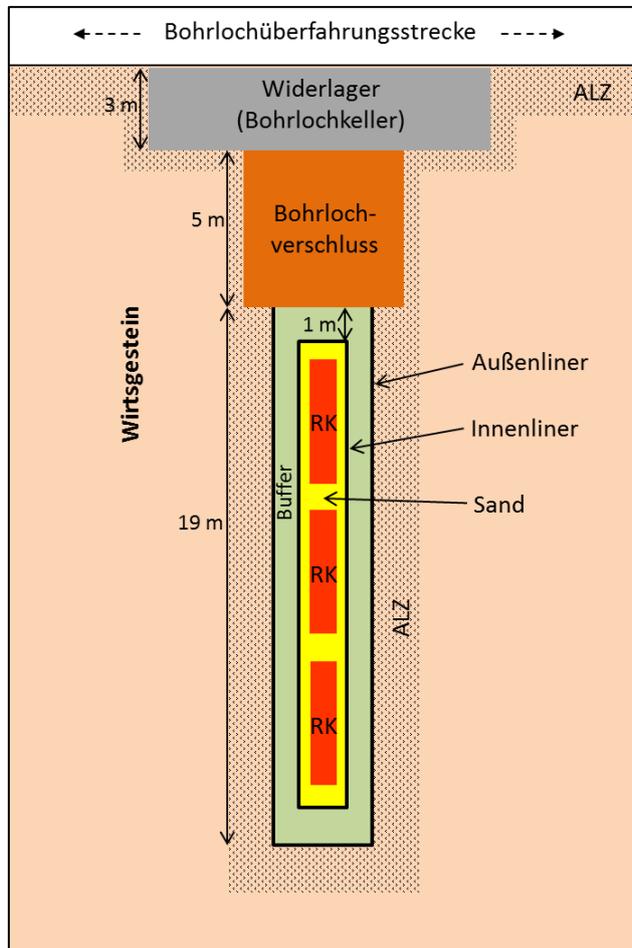
### **Technisches Konzept**

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

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) relevant. 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 NORD vorgesehenen Tiefe ist ein geeignetes Ausbaukonzept noch zu entwickeln und zu dimensionieren.

## 2.6 Einlagerungskonzept

Die Bohrlochlagerung in kurzen Vertikalbohrungen wird als Referenzkonzept für das Endlagerstandortmodell Nord betrachtet. Die Einlagerungsbohrlöcher für Brennelemente, Wiederaufarbeitungsabfälle und Strukturteile aus der BE-Konditionierung haben eine Tiefe von 27 m. In jedes Einlagerungsbohrloch werden drei RKs eingelagert (Abb. 2.4).



Die Anordnung der Bohrlöcher innerhalb eines Einlagerungsfeldes entspricht einer hexagonalen Geometrie, so dass der Abstand in jeder Richtung gleich ist. Der Abstand der Bohrlochüberfahrungsstrecken, die Anzahl und der Abstand der Bohrlöcher und die Beladung der Bohrlöcher wurden für die wärmeentwickelnden Abfälle aufgrund indikativer thermischer Modellberechnungen festgelegt (Tab. 2.2). In Jobmann et al. (2015) wurde unter anderem ein Grenzkriterium für eine nicht zu überschreitende Temperatur im Wirtsgestein abgeleitet (vgl. auch Jobmann & Meleshyn 2015).

Abb. 2.4:  
Schematische Darstellung eines Einlagerungsbohrloches

Die Einhaltung der Grenztemperatur wird durch die folgenden Maßnahmen gewährleistet:

- ausreichende Abkühlzeit der HAW bzw. der ausgedienten Brennelemente vor der Einlagerung (RK-BE = 23 Jahre, RK-HA = 30 Jahre),
- geeignete Beladung der Behälter
- Abstand zwischen den einzelnen Einlagerungsbohrlöchern

Aus den Berechnungen wurde ein anforderungsgerechtes Endlagerdesign erstellt. Es erfolgte keine Optimierung des Endlagerdesigns hinsichtlich der Packungsdichte aller Einlagerungsbohrlöcher, 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. Die Einlagerungsgeometrie der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeleistung (CSD-B, CSD-B, Strukturteile) leitet sich aus gebirgsmechanischen und betrieblichen Anforderungen ab.

Aus Gründen der Praktikabilität wird im Rahmen von ANSICHT für alle Abfalltypen dasselbe Einlagerungskonzept vorgesehen, auch wenn an die Behälter mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung keine Anforderungen bezüglich Rückholbarkeit und Bergbarkeit bestehen.

Diese Standardisierung der Bohrlöcher und aller Komponenten hat auch Vorteile für den Betrieb (einheitliches Equipment und einheitliche Abläufe) und für die Modellierung und Nachweisführung.

Tab. 2.2: Geometrische Daten der Einlagerungsfelder und Anzahl der Einlagerungsbohrlöcher.

Behälter	Bohrlochlänge (m)	Anzahl Gebinde / Bohrloch	Behälterabstand (m) (Sandschicht)	Streckenabstand (m) (Mitte)	Bohrlochabstand (m)	Anzahl Einlagerungsbohrlöcher
RK-BE	27	3	0,6	26	30	3.534
RK-HA	27	3	0,6	26	30	622
RK-WA	27	3	0,6*	26*	20**	490
RK-ST	27	3	0,6*	26*	20**	292
Summe						4.938

\* Behälter- und Streckenabstände ergeben sich aus gebirgsmechanischen Erwägungen,

\*\* Bohrlochabstände ergeben sich aus betrieblichen Erwägungen

Für den Einlagerungsvorgang werden aufgrund der Dimensionen der Einlagerungsmaschine und des Handhabungsablaufes oberhalb des Einlagerungsbohrlochs ein Bohrlochkeller in der Sohle (Länge: 7 m, Breite 2,2 m und Tiefe 3,0 m) und in der Streckenfirste eine Nische (Länge 10 m, Höhe 7 m, Breite (Sohle) 9 m, Querschnitt ca. 50 m<sup>2</sup>; normaler Querschnitt Einlagerungsstrecke: 42 m<sup>2</sup>) erstellt (Pöhler et al. 2010). Die Einlagerungsbohrlöcher für wärmeentwickelnde Abfälle werden bis zu ihrer Beladung durch einen Außenliner stabilisiert. Abweichungen des Bohrlochs von 0,05 – 0,1 % aus der Senkrechten sind für das Einbringen des Außenliners unkritisch. Die Wandstärke des Außenliners ist gemäß den standortspezifischen Spannungsverhältnissen aus thermomechanischen Auslegungsberechnungen abzuleiten. Dabei sind auch Anisotropien der Gebirgsspannungen zu berücksichtigen. Der Außenliner ist perforiert, damit sich der Buffer durch Formationswässer aufsättigen kann. Das Einbringen von Buffer, Innenliner und RKs in die Bohrlöcher beginnt, sobald der Außenliner lagestabil ist. Das ist spätestens dann der Fall, wenn das Gebirge auf den Außenliner aufgelaufen ist.

Der Buffer besteht an der Bohrlochsohle aus insgesamt 1 m mächtigen Tonscheiben, an die sich nach oben hin 30 cm breite Tonringe anschließen (Abb. 2.4). Durch die Öffnung der Tonringe wird ein lösungsdichter Innenliner geschoben, der im Bohrlochkeller mit einer Bohrlochschleuse verschlossen wird. Bei der Einlagerung der RKs werden im Wechsel rieselfähiger Sand und Kokillen in den Innenliner eingebracht. Der rieselfähige Sand bietet die Möglichkeit die RKs, falls erforderlich, auf einfache Weise wieder aus dem Innenliner ziehen und damit rückholen zu können.

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

### 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, der Korrosion des Ausbaus und das Aufquellen des Versatzes wieder vollständig verschlossen sind, übernehmen die geotechnischen Barrieren eine bedeutende Abdichtfunktion und verschließen potenzielle Wegsamkeiten entlang der technisch geschaffenen Hohlräume. In den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) wird 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 Funktionstüchtigkeit 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) wurde 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 Grubenbaue geschaffenen Wegsamkeiten verschlossen und ein advektiver Transport kontaminierter Lösungen entlang der Auffahrung minimiert werden soll.
- das aufzufahrende Hohlraumvolumen der Grubenbaue 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 detailliert 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 Schutzziele ab. Das Barrierensystem des Endlagerkonzeptes besteht aus den folgenden Komponenten:

Geologische Barriere:

- *Tongestein* (Hauterivium, Barremium)

Geotechnische Barrieren:

- *Nahfeldsystem* (Abb. 4): Sandverfüllung, Innenliner, Buffer
- *Bohrlochverschlüsse* der Einlagerungsbohrlöcher
- *Versatz* in Einlagerungsstrecken, Querschlägen und Richtstrecken (übernimmt erst langfristig eine Barrierenfunktion)
- *Kleine Streckenverschlüsse* in den Querschlägen an der Einmündung in die Richtstrecke zur Abdichtung der Einlagerungsfelder gegenüber dem Grubengebäude
- *Große Streckenverschlüsse* in den Richtstrecken an der Grenze zum Infrastrukturbereich
- *Schachtverschlüsse*

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

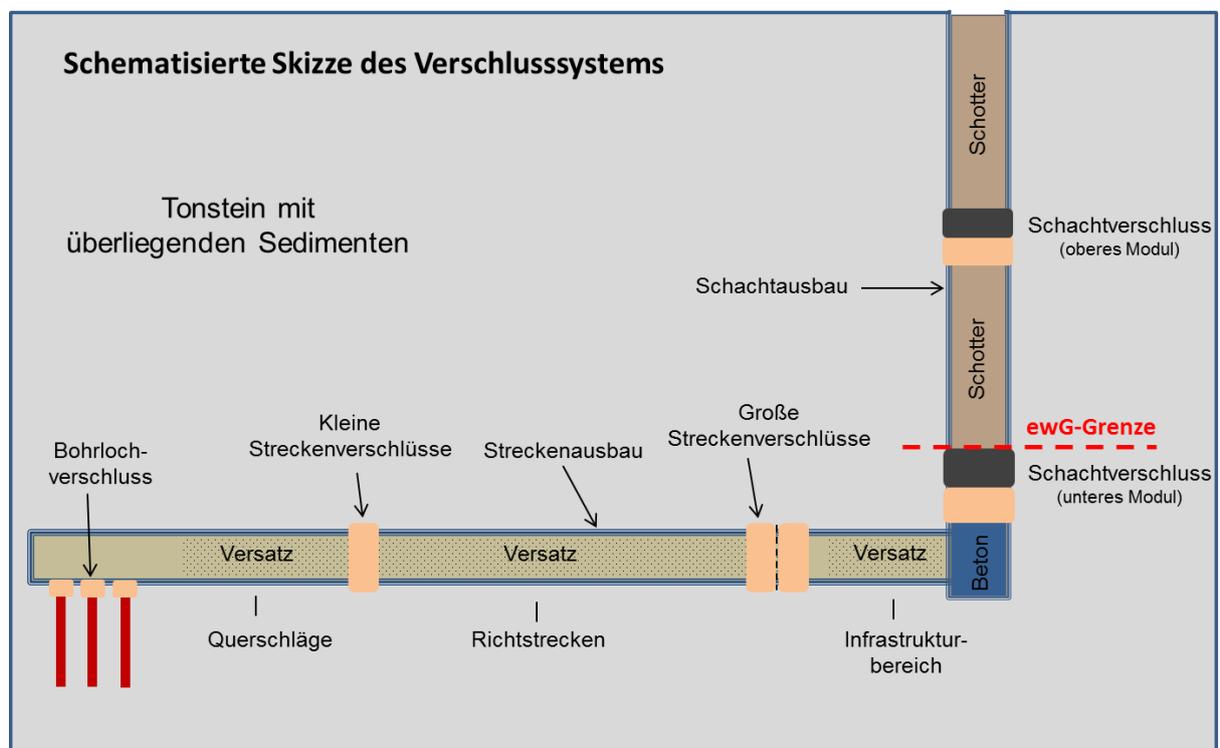


Abb. 3.1: Schematisierte Prinzipskizze des Verschlussystems.

Die verbleibenden Hohlräume in den Einlagerungsstrecken werden mit dem Versatzmaterial (s. Kap. 3.5) verfüllt, das Lösungsbewegungen in der Strecke reduziert. Der Zugang zu den Einlagerungsstrecken erfolgt über die Querschläge, die ebenfalls mit Versatzmaterial verfüllt werden. Aufgrund des nicht entfernten Ausbaus übernimmt der Versatz erst zu späten Zeiten eine Dichtfunktion, da der Bereich des Ausbaus, solange dieser nicht korrodiert ist, ggf. einen bevorzugten Fließweg darstellt.

An den beiden Enden der Querschläge, also an den Übergängen zu den Richtstrecken, werden jeweils kleine Streckenverschlüsse (Abb. 3.2) zur Abdichtung der Einlagerungsfelder gegenüber dem Grubengebäude errichtet. An der Grenze zum Infrastrukturbereich werden in allen Richtstrecken große Streckenverschlüsse errichtet (Abb. 3.2).

Die kleinen und großen Streckenverschlüsse ergänzen sich und verschaffen sich gegenseitig Zeit zur Entwicklung ihrer vollen Abdichtwirkung.

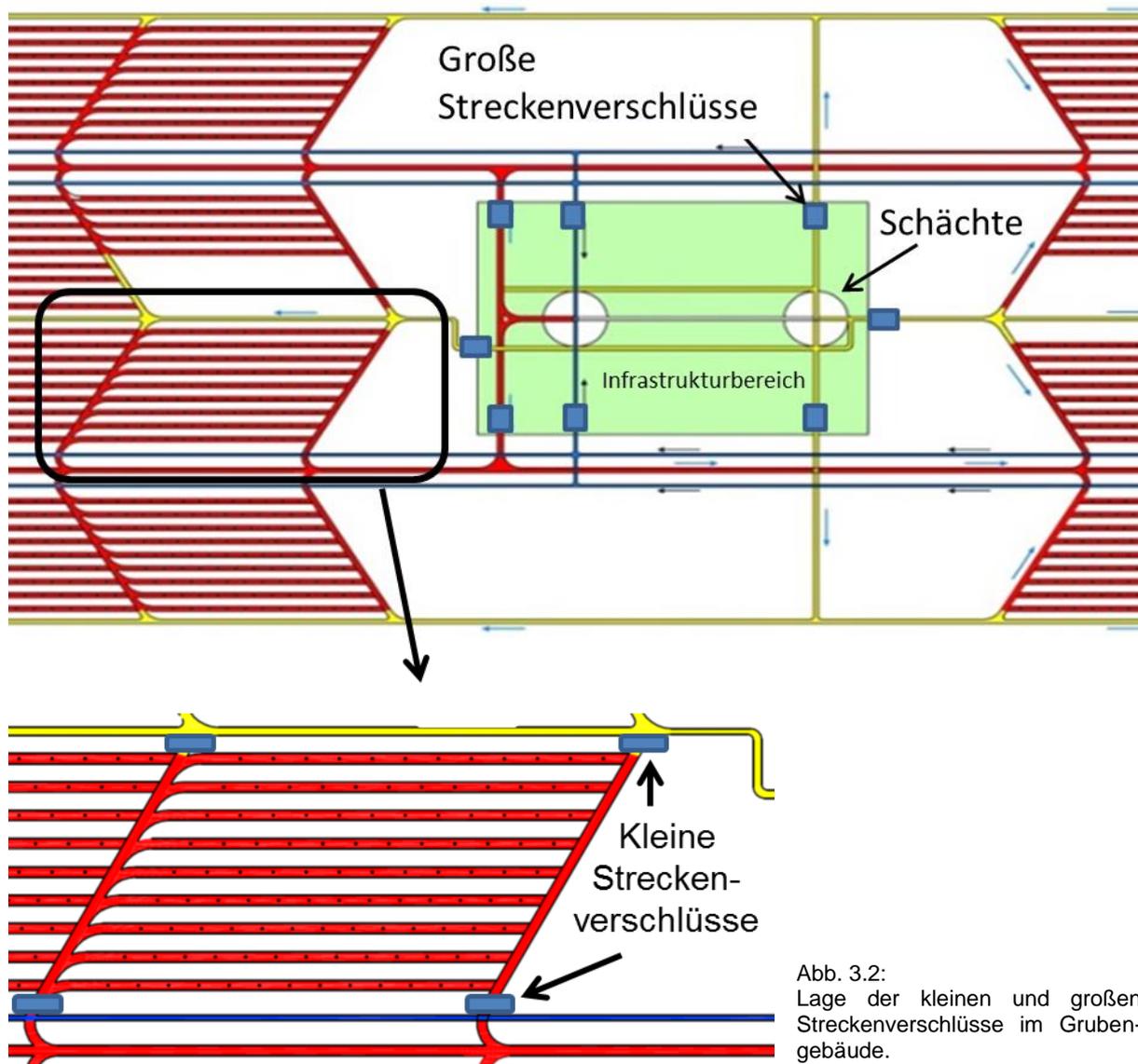


Abb. 3.2:  
Lage der kleinen und großen Streckenverschlüsse im Grubengebäude.

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. Advective 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, Funktionsdauer, Auslegungsanforderungen und das technische Design der geotechnischen Barrieren, wie sie im Projekt ANSICHT als Nachweisgrundlagen festgelegt wurden, näher erläutert.

### 3.1 Nahfeldsystem

Unter dem Nahfeldsystem werden der Innenliner mit der Sandverfüllung und der Buffer verstanden (Abb. 2.4).

#### 3.1.1 Sandverfüllung

Der verbleibende Hohlraum zwischen Behälter und Innenliner wird durch einen rieselfähigen Sand verfüllt.

##### **Funktion**

Gewährleistung der Rückholbarkeit durch Lagestabilisierung der Behälter innerhalb des Innenliners und Verhinderung eines Verkantens der Behälter, verbesserte Wärmeabfuhr vom Behälter.

##### **Funktionsdauer**

Für die Sandverfüllung wird eine Funktionsdauer von 500 Jahren angesetzt.

##### **Auslegungsanforderungen**

Hydraulische Anforderungen: Keine

Mechanische Anforderungen: Mechanische Stabilität der Körnung auch bei Belastung mit 3 RKs. Zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit bzw. Bergung muss die Sandverfüllung unter den Randbedingungen im Einlagerungsbohrloch über einen Zeitraum von 500 Jahren weitestgehend rieselfähig bleiben.

Thermische Anforderungen: Mineralogische Beständigkeit im Bereich der Auslegungstemperaturen, Auffüllung der Resthohlräume zur verbesserten Wärmeabfuhr.

Chemische Anforderungen: Keine

Biologische Anforderungen: Auf Grund des großen Porenvolumens innerhalb der Sandverfüllung ist prinzipiell ein Lebensraum für Mikroben gegeben. Um eine mikrobielle bedingte Korrosion der Behälter zu verhindern, ist eine Sterilisierung erforderlich. Es ist daher eine Erhitzung der Sandverfüllung auf mindestens 150°C erforderlich, um Endosporen von Sulfat-

reduzierenden und Eisen(III)-reduzierenden Bakterien zu eliminieren (Jobmann & Meleshyn 2016).

### **Technisches Design:**

Zur Verfüllung des Ringraums zwischen den Behältern und Wandung des Innenliners (12 cm) sowie im Zwischenraum zwischen den Behältern (vgl. Tab. 2.2) wird Quarzsand eingebracht (Abb. 2.4). Der getrocknete Sand soll eine Restfeuchte von 0,2 Gew.% haben. Nach indikativen Modellberechnungen können in der Sandverfüllung während der thermischen Phase Temperaturen um etwa 200°C auftreten. Diese hohen Temperaturen führen u.a. zu einer Sterilisierung des Porenraums innerhalb der Sandverfüllung und damit zu einer Eliminierung der mikrobiellen Aktivitäten (vgl. auch Jobmann & Meleshyn 2016). Dadurch wird eine Intensivierung der Metallkorrosion durch mikrobielle Aktivitäten verhindert. Das Porenwasser wird verdampfen, kann aber aufgrund der lösungsdichten Verrohrung nicht entweichen und wird entweder bei der Korrosion des Innenliners und der Kokille verbraucht, oder bei einem Absinken der Temperaturen wieder kondensieren. Der Quarzsand beeinflusst die hydrochemischen Verhältnisse, wobei der erhöhte Silikatanteil, im Fall eines Lösungszutritts zu den verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen, die Langzeitstabilität des Borosilikatglases der Wiederaufarbeitungsabfälle erhöht.

### **3.1.2 Innenliner**

Wie in Kapitel 2.6 beschrieben, wird durch die Öffnung der Tonringe ein lösungsdichter Innenliner abgelassen, in den die RKs dann eingebracht und der Resthohlraum mit Sand verfüllt wird.

#### **Funktion**

Gewährleistung der leichten Rückholbarkeit während der Betriebsphase und der Bergbarkeit während der frühen Nachverschlussphase, Mechanischer Schutz des Endlagerbehälters gegenüber dem Gebirgsdruck, Verzögerung des Lösungszutritts zum Behälter und damit der Korrosion.

#### **Funktionsdauer**

Für den Innenliner wird eine Funktionsdauer von 500 Jahren angesetzt.

#### **Auslegungsanforderungen:**

Hydraulische Anforderung: Der Innenliner soll während seiner Funktionsdauer lösungsdicht sein.

Mechanische Anforderung: Auslegung gegen den Gebirgsdruck (gemäß Standortmodell) sowie gegen die von innen und außen wirkenden Fluiddrucke (unter Berücksichtigung der thermischen Expansion der Fluide und der Gasbildung).

Thermische Anforderungen: Das Material soll seinen strukturellen Aufbau im Bereich der Auslegungstemperaturen nicht signifikant verändern, um seine mechanische Schutzfunktion nicht zu gefährden.

Chemische Anforderung: Das Material soll unempfindlich gegenüber Versprödungen sein. Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme darf während der Funktionsdauer die mechanische Stabilität nicht beeinträchtigen. Korrosionsbeständig im Standortmilieu für die vorgesehene Funktionsdauer.

### **Technisches Design**

Das Design baut auf den Planungen im Rahmen der VSG (Bollingerfehr et al. 2012) auf und wurde an das tonige Wirtsgestein angepasst. Im Folgenden wird exemplarisch ein 27 m tiefes Einlagerungsbohrloch für ausgediente Brennelemente beschrieben (die Einlagerungsbohrlöcher für CSD-V-Kokillen sind 32 m tief). Bei den RK-BE Einlagerungsbohrlöchern hat der Innenliner, da er im Bohrloch tiefsten auf einer 1 m starken Tonscheibe steht, eine Länge

von 26 m. Je Bohrloch werden 3 RKs eingelagert. Die oberen 8,0 m des Innenliners werden nach Befüllung des Bohrlochs bzw. des Innenliners und vor Erstellung des Bohrlochverschlusses wieder entfernt, so dass 18 m des Innenliners im unteren Teil des Bohrlochs verbleiben. Der Innendurchmesser des Innenliners beträgt 76 cm.

Für das Bohrlochlagerungskonzept in Salz wurde ein Innenliner aus dem Werkstoff GGG40 (EN-GJS-400-15) vorgesehen (Bollingerfehr et al. 2012). Es ist zu prüfen, ob dieser Werkstoff geeignet ist, die mechanische Stabilität und Dichtheit des Innenliners in einem Tonsteinmilieu über den vorgesehenen Funktionszeitraum zu gewährleisten. Erforderlichenfalls können zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit andere Werkstoffe vorgesehen werden. Der Innenliner soll in Abschnittslängen von 1,5 m eingebracht werden, wobei die einzelnen Abschnitte entweder verschraubt oder verschweißt werden. Außerdem wird der Innenliner beidseitig durch Stahldeckel verschlossen.

### 3.1.3 Buffer

Wie bereits in Kapitel 2.6 beschrieben, wird der Hohlraum zwischen Innenliner und Außenliner mit einem hoch kompaktierten Buffermaterial gefüllt.

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

Die Dauer der Schließung der Kontaktzone und der Auflockerungszone hängt von der Stärke der Konvergenz ab, mit der das Gebirge auf den Außenliner aufläuft. Auf Grund der kurzen Offenstandszeiten und des vergleichsweise kleinen Durchmessers der Einlagerungsbohrlöcher wird die Auflockerungszone nur eine geringe Ausdehnung haben. Daher wird eingeschätzt, dass bis zur Zerstörung des Außenliners durch Metallkorrosion die Kontakt- und Auflockerungszone um die Bohrlöcher geschlossen sein werden. Indikative Prozessanalysen zur Metallkorrosion besagen, dass der Außenliner nach etwa 750 Jahren aufgelöst sein wird (Rübel 2016).

#### **Funktion**

Verzögerung von Lösungsbewegungen zum und vom Innenliner und, nach dessen Ausfall, zu den Behältern. Damit Verzögerung der Korrosion des Innenliners und der Behälter. Stabilisierung der hydrochemischen Verhältnisse in der Umgebung des Innenliners, mechanische Stabilisierung des Bohrloches nach Korrosion des Außenliners, unteres Widerlager für den Bohrlochverschluss.

#### **Funktionsdauer**

Für die Verzögerung der Lösungsbewegung wird als Funktionszeitraum 500 Jahre angesetzt. Bis zu diesem Zeitpunkt ist die Bergbarkeit der Behälter zu gewährleisten. Für die mechanische Stabilisierung des Bohrloches und die Widerlagerfunktion für den Bohrlochverschluss werden 50.000 Jahre angesetzt.

#### **Auslegungsanforderungen:**

Hydraulische Anforderungen: Geringe Durchlässigkeit für Lösung, ausreichende Durchlässigkeit für Gas, um das Aufbauen eines hohen Gasdruckes durch thermische Expansion sowie durch Gasbildung infolge Metallkorrosion und Radiolyse zu vermeiden.

Mechanische Anforderungen: Widerlagerfunktion für den Bohrlochverschluss, Stabilisierung des Bohrlochs nach Ausfall des Außenliners, Gewährleistung der Lagestabilität des Innenliners.

Thermische Anforderungen: Keine signifikanten thermisch bedingten Materialveränderungen über den Funktionszeitraum im Bereich der Auslegungstemperaturen.

Chemische Anforderungen: Rückhaltevermögen für Radionuklide, bestmögliche Kompatibilität mit den Formationswässern und Fe-reichen Lösungen.

Biologische Anforderungen: Die Einbautrockendichte soll so gewählt werden, dass die Dichte im wassergesättigten Zustand nach dem Quellen des Buffers den Wert von  $2.000 \text{ kg/m}^3$  (entspricht Trockendichte von  $1600 \text{ kg/m}^3$ ) erreicht. Eine thermische Belastung des Buffers in direkter Innenlinerumgebung wird mindestens  $150^\circ\text{C}$  betragen, um Endosporen von Sulfat-reduzierenden und Eisen(III)-reduzierenden Bakterien zu eliminieren (vgl. Jobmann & Meleshyn 2016).

### **Technisches Design**

Der Buffer soll aus quellfähigen Tonen bestehen, die die oben angegebenen Anforderungen erfüllen. Er soll in Form hoch kompakter Tonscheiben (Trockendichte von etwa  $2.000 \text{ kg/m}^3$ ) eingebracht werden, die im Bohrlochtiefsten einen 1 m starken Boden bilden. Darüber folgen bis 9 m unterhalb der Sohle der Bohrlochüberfahrungsstrecke 30 cm breite Tonringe, deren innere Öffnung dem Durchmesser des Innenliners entspricht. Zum Abschluss wird eine 1 m starke Tonscheibe eingebracht. Die Herstellung von hoch kompaktierten Tonformelementen im industriellen Maßstab wurde in einer Reihe von Forschungsprojekten erprobt (Kawakami et al. 2001, Gatabin et al. 2008). Funktionalitätsnachweise für die Bentonit-Barrieren wurde durch Labor- und In-situ-Versuche (z.B. TSX-Großversuch) erbracht (Chandler et al. 2002).

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 Untersuchungen diesbezüglich durchgeführt. Ausbruchsmaterial aus dem URL in Bure 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.

#### Bemerkung:

*Im belgischen Konzept wird kein Ton sondern Beton als Buffer vorgesehen. Im schweizerischen Konzept wird Bentonit als Buffer vorgesehen. Im französischen Konzept wird entweder kein Buffer (im Falle der HAW-Abfälle) oder Bentonit (im Falle von Brennstabbehältern) 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 arteigener Tonmaterialien. Bei den notwendigen Materialmengen würde Bentonit ggf. aus verschiedenen Abbauen eingeführt werden müssen, was einer Homogenisierung auch nicht förderlich ist.*

Im ERATO-Projekt wurde Calcium-Bentonit (Calcigel) als Referenzmaterial für den Buffer verwendet (Pöhler et al. 2010). 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 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  $120^\circ\text{C}$ . Steigt die Temperatur über  $120^\circ\text{C}$  an, erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit um etwa 30% bis  $200^\circ\text{C}$  (Yildizdag et al. 2008). Weitere Parameter für das Referenzmaterial sind in Engelhardt et al (2011) und Engelhardt & Müller-Hoeppe (2011) beschrieben.

Falls aufgrund einer starken Gasbildung durch Metallkorrosion erforderlich, kann eine erhöhte Gasdurchlässigkeit des Buffers durch Zumischung von Sand erreicht werden. Bis 20% Sandzumischung erhöht sich vor allem die Gasdurchlässigkeit, während die Lösungsdurchlässigkeit auf einem sehr niedrigen Niveau bleibt (ANDRA, 2005). Außerdem werden durch Sandbeimengungen die Wärmeleitfähigkeit (Jobmann & Buntebarth 2009) und die mechanische Stabilität des Buffers erhöht (ANDRA 2005). Nachteilig bei einer Sandbeimischung ist, dass der Porenraum vergrößert wird, wodurch sich der Lebensraum für Mikroben und damit die Mikrobenpopulation vergrößert, was zu einer erhöhten mikrobiellen Korrosionsaktivität an den Behältern führt. Die hohen Temperaturen von ca.  $150^\circ\text{C}$  im Buffer (Jobmann et al., 2015) wirken allerdings sterilisierend und werden in der frühen Nachverschlussphase mikrobielle korrosive Aktivitäten in direkter Umgebung der Behälter signifikant behindern (Jobmann & Meleshyn 2015 und 2016).

### 3.2 Bohrlochverschluss der Einlagerungsbohrlöcher

#### Funktion

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

#### Funktionsdauer

Entsprechend den Ungewissheiten für die Entwicklung der hydraulischen Eigenschaften des Streckenversatzes wurde für die Bohrlochverschlüsse zunächst eine Funktionsdauer von 50.000 Jahre festgelegt. 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: Geringe Durchlässigkeit für Lösung, ausreichende Durchlässigkeit für Gas, um ein Aufreißen von Rissen in Tonen durch hohe Gasdrucke infolge thermischer Fluidexpansion und Gasbildung infolge Behälterkorrosion und Radiolyse zu vermeiden.

Mechanische Anforderungen: Der einzustellende Quelldruck der Bentonitdichtung darf die kleinste Hauptspannung des umgebenden Gebirges nicht überschreiten, um dieses nicht zu schädigen.

Thermische Anforderungen: Keine signifikanten thermisch bedingten Materialveränderungen unter den von den Abfällen produzierten örtlichen Temperaturverläufen.

Chemische Anforderungen: Gute Sorptionseigenschaften für Radionuklide, bestmögliche Kompatibilität mit den Formationswässern sowie mit Degradationsprodukten des Widerlagerbetons und Fe-reichen Lösungen.

## Technisches Design

Das Bohrlochverschlusskonzept geht von einem 5,0 m mächtigen Bentonit-Dichtelement aus. Zur Bohrlochüberfahrungsstrecke hin, wird das Dichtelement durch ein 3,0 m mächtiges Betonwiderlager fixiert, das im Bohrlochkeller gegossen wird. Die exakte Dimensionierung des Dichtelementes und des Widerlagers muss nach einer detaillierten ingenieurtechnischen Bemessung ggf. angepasst werden (vgl. Herold et al. 2016b). Es wird davon ausgegangen, dass das Dichtelement nach unten hin durch den hoch kompaktierten Buffer in seiner Position fixiert wird, so dass kein weiteres Betonwiderlager notwendig ist. Das Quellen des Buffers erhöht dabei die Einspannung des Dichtelementes. Vor der Erstellung des Bohrlochverschlusses werden die oberen 5,0 m des Außenliners und die Auflockerungszone in der Bohrlochwandung bis auf ca. 50 cm entfernt.

Das Dichtelement soll aus einem binären Gemisch analog dem Salzdetfurth-Referenzmaterial (Engelhardt et al. 2011) erstellt werden. Nach der Einbringung des Materials wird sich der Bentonit durch das Porenwasser des Wirtsgesteins langsam aufsättigen. Aufgrund der geringen hydraulischen Leitfähigkeit des Wirtsgesteins (horizontal ca.  $1 \cdot 10^{-12}$  m/s) kann dieser Prozess ggf. einige 10-er Jahre dauern.

Es ist vorgesehen, als Referenzmaterial für die Dichtelemente der geotechnischen Barrieren einen Ca-Bentonit vom Typ Salzdetfurth zu verwenden. Die Funktionalität dieses Materials wurde bei In-situ-Versuchen im Zuge des FuE-Projektes Schachtverschluss Salzdetfurth nachgewiesen (Breidung 2002, Jobmann 2002). Für den Bohrlochverschluss ist eine Einbringung des Bentonits als binäres Gemisch (Granulat / Presslinge) mit einem Wassergehalt <10% und einer Einbautrockendichte von ca.  $1.700 \text{ kg/m}^3$  vorgesehen. Bei In-situ-Versuchen wurde eine Permeabilität von  $1,0 \cdot 10^{-17}$ - $7,8 \cdot 10^{-18}$  erzielt. Der Quelldruck betrug 1 MPa. Die Wärmeleitfähigkeit schwankt in Abhängigkeit von Sandanteil und Feuchtegehalt zwischen  $0,8$  und  $1,3 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  (Yildizdag et al. 2008). Durch Zumischung von Sand kann der Quelldruck, die Wärmeleitfähigkeit, die mechanischen Eigenschaften und die Gasdurchlässigkeit bei Bedarf gezielt eingestellt werden. Gängige Sandbeimischungen zum Bentonit von Barrieren liegen meist bei 20 - 30% (ANDRA 2005, NAGRA 2002a, ONDRAF-NIRAS 2001).

Es wird erwartet, dass das Quell- und Sorptionsvermögen des Bentonits der Dichtelemente in begrenztem Umfang durch Fe-reiche Lösungen (infolge Metallkorrosion) und durch mikrobielle Aktivitäten beeinflusst werden kann (Carlsson et al. 2007, Gaudin et al. 2009, Herbert et al. 2011). In den technischen Nachweisen ist zu zeigen, dass das Dichtelement so dimensioniert ist, dass die Barriere die vorgesehene Dichtfunktion erfüllen kann (Herold et al. 2016b).

### 3.3 Streckenverschlüsse

Es sind einfache Streckenverschlüsse (1 Dichtelement, 2 Widerlager) an der Einmündung der Querschläge der Einlagerungsfelder in die Richtstrecken sowie redundante Streckenverschlüsse (2 Dichtelemente, 3 Widerlager) beim Übergang von den Richtstrecken in den Infrastrukturbereich vorgesehen. Als zusätzliche Redundanz ist stützender Versatz vorgesehen, der nach der Korrosion der Betonwiderlager die Dichtelemente in ihrer Position hält.

#### Funktion

Verzögerung des Lösungszu- und -austritts.

#### Funktionsdauer

Entsprechend den Ungewissheiten für die Entwicklung der hydraulischen Eigenschaften des Streckenversatzes wurde für die Streckenverschlüsse zunächst eine Funktionsdauer von 50.000 Jahre festgelegt. Diese Funktionsdauer wird im Rahmen des Projektes ANSICHT für alle Abdichtbauwerke gleichermaßen festgelegt. Erste Abschätzungen im Zuge der System-

analyse 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: geringe hydraulische Durchlässigkeit (ähnlich wie im Wirtsgestein) gegenüber Flüssigkeiten.

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

Thermische Anforderungen: Keine

Chemische Anforderungen: Langzeitstabil, bestmögliche Kompatibilität mit dem Wirtsgestein und den Zersetzungsprodukten des Widerlager-Betons.

### Technisches Design

Das Konzept der Streckenverschlüsse (Abb. 3.3) orientiert sich prinzipiell an den Konzepten der ANDRA (2005). Demnach bestehen die Streckenverschlüsse jeweils aus einem Bentonit-Dichteelement und Beton-Widerlagern zur Lagestabilisierung. Voraussetzung für die Errichtung eines Streckenverschlusses ist das Entfernen aller Streckeneinbauten, wie den Schienen, der Fahrbahn sowie Leitungen und Kabeln im Bereich der Dichtelemente. Weiterhin geht das Konzept davon aus, dass im Bereich der Bentonit-Dichtelemente der Streckenausbau entfernt wird, um eine direkt Anbindung des Dichtelementes an die Streckenkontur zu gewährleisten. Außerdem wird dort die Streckenkontur zur Reduzierung der Auflockerungszone um ca. 1 m nachgeschnitten. Die Dimensionierung der Verschlüsse muss aufgrund von standortspezifischen Auslegungsberechnungen bzw. einer ingenieurtechnischen Bemessung erfolgen. Im Folgenden werden exemplarische Abmessungen angegeben.

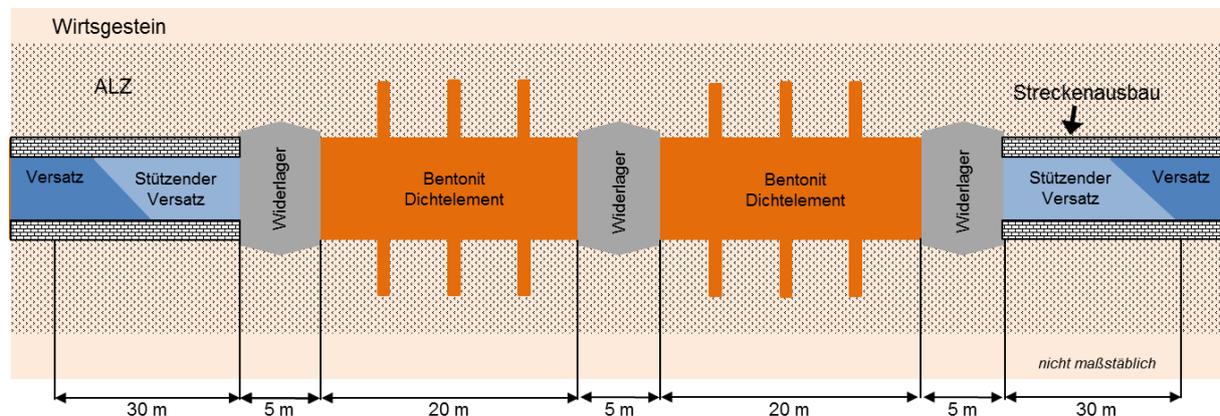


Abb. 3.3: Konzeptioneller Entwurf eines Streckenverschlusses (Baufortschritt von links nach rechts)

Für die einfachen Streckenverschlüsse an der Einmündung der Querschläge in die Richtstrecken wird eine Gesamtlänge von ca. 30 m unterstellt. Dabei entfallen ca. 20 m auf das Dichtelement und jeweils ca. 5 m auf die beiden Betonwiderlager (entspricht einem der Dichtelemente in Abb. 3.3). Die Streckenverschlüsse in den Richtstrecken werden größer und redundant dimensioniert. Sie haben eine Gesamtlänge von ca. 55 m (+ ca. 60 m stützender Versatz). Sie weisen zwei Dichtelemente mit jeweils ca. 20 m Länge und drei Widerlager mit jeweils ca. 5 m Länge auf. Die Längenangaben basieren derzeit auf empirischen Schätzungen und müssen im Rahmen einer ingenieurtechnischen Bemessung detailliert festgelegt werden.

Um Umläufigkeiten im Bereich der Barrieren zu vermeiden, werden bei allen Streckenverschlüssen vor Errichten der Dichtelemente 30 cm breite und 1,0-3,0 m tiefe Schlitze in der

Hohlraumkontur erstellt, die mit Bentonit verfüllt werden und so die Wegsamkeiten in der Auflockerungszone größtenteils unterbrechen. Die Technik und Effektivität dieser Maßnahme wurde durch Experimente in Mont Terri und Bure nachgewiesen (ANDRA 2005). Die Anzahl und der Abstand der Dichtschnitte kann je nach den Standortverhältnissen variiert werden.

Für die Bentonit-Dichtelemente der Streckenverschlüsse ist Ca-Bentonit als Referenzmaterial vorgesehen, da von diesem Material eine umfangreiche Datenbasis vorliegt (Breidung 2002, Jobmann 2002, Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe et al. 2012). Wichtige günstige Eigenschaften sind die erreichbare geringe Permeabilität ( $10^{-17}$ - $10^{-18}$  m<sup>2</sup>), 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 liegen.

Es ist vorgesehen, das Dichtelement aus vorgefertigten, hoch kompaktierten Bentonitblöcken oder aus hoch kompaktierten Bentonitpellets mit zugemischtem Bentonitpulver zu erstellen (Abb. 3.4). Im Hinblick auf die Rezeptur erhöht die Zumischung von Sand die Kompaktion und verbessert die mechanischen Eigenschaften des Materials ohne die Permeabilität gegenüber Lösungen zu erhöhen. Günstig ist z. B. eine Zumischung von 20 bis 30 % Sand.

Die Betonwiderlager müssen so ausgelegt werden, dass sie dem Gebirgsruck und dem Quelldruck des Tons mechanisch widerstehen. Daher sollen die Widerlager eine konische Form haben und aus hoch festem, nicht armiertem Beton errichtet werden, der langzeitstabil ist. Zudem soll der Beton eine hohe Dichte und eine geringe Permeabilität aufweisen, so dass die Menge des durchdringenden Wassers und damit die Zersetzung des Betons reduziert wird.



Aufgrund der fehlenden Armierung wird eine Rissbildung durch sich ausdehnende Korrosionsprodukte vermieden. Die langsame Aufsättigung des Bentonits wird zunächst durch radial zutretende Gebirgslösungen erfolgen.

Abb. 3.4: TSX-Versuch zur Errichtung des Dichtelementes eines Streckenverschlusses im kanadischen Untertagelabor (Chandler et al. 2002)

Da die Funktion der Betonwiderlager durch chemische Einflüsse langfristig beeinträchtigt werden kann, soll die mechanische Stabilität des Versatzes ca. 30 m vor und hinter dem Verschlussbauwerk gegenüber der Normalverfüllung so weit erhöht werden, dass der „Stützende Versatz“ langfristig die Stützwirkung der Betonwiderlager übernehmen kann. Versuche haben gezeigt, dass die geforderten mechanischen Eigenschaften (Druck 20 MPa bei einem Neigungswinkel von 40°) bei einem Mischungsverhältnis von Ton / Sand 50/50 erreicht werden (ANDRA 2005).

### 3.4 Schachtverschlüsse

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. 2013) ist in Abb. 2.1 dargestellt.

In dem parallel laufenden Verbundvorhaben ELSA-Phase-II wurden Schachtverschlusskonzepte für Endlager in Tonsteinformationen in Deutschland entwickelt und im Sinne einer ingenieurtechnischen Vorbemessung exemplarisch ausgelegt. Es wurde angestrebt, Synergieeffekte zu nutzen und die Vorhaben ANSICHT und ELSA-Phase-II zu verknüpfen. Basierend auf den Endlagerstandortmodellen und den lithologischen Schachtprofilen, die in ANSICHT für die Modellregionen NORD und SÜD erarbeitet wurden, werden im Rahmen von ELSA-Phase-II Schachtverschlusskonzepte entwickelt. Diese Konzepte werden dann umgekehrt soweit wie möglich als Referenzkonzepte für die Schachtverschlüsse in das ANSICHT Vorhaben eingespielt.

Aus zeitlichen Gründen konnte für das Endlagerstandortmodell NORD nicht auf die Verschlussentwicklung in ELSA-Phase-II gewartet werden, da sich sonst die Entwicklung von Szenarien zu sehr verzögert hätte. Aus diesem Grunde wurde ein Vorentwurf (Abb. 3.5) für den Schachtverschluss NORD entwickelt, auf dessen Basis die Entwicklung von Referenz- und Alternativszenarien exemplarisch durchgeführt und illustriert werden konnte. Im Anhang dieses Berichtes ist das aktuelle Schachtverschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell, das im FuE-Vorhaben ELSA-Phase-II entwickelt wurde, zur Information beschrieben. Weitere Details zu diesem Schachtverschlusskonzept sind in Herold et al. (2016a) beschrieben.

#### **Vorentwurf zum Schachtverschlusskonzept**

Im Folgenden ist der Vorentwurf zum Schachtverschlusskonzept beschrieben.

#### **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:**

Nach Mrugalla (2014) ist während der nächsten 50.000 Jahre mit weitgehend stabilen (hydro-)geologischen Verhältnissen in Norddeutschland zu rechnen (vgl. auch Müller-Hoeppe et al. (2012)). Erst mit dem Einsetzen der nächsten Kaltzeit und einer möglichen Vergletscherung kann sich die Hydrogeologie am Standort deutlich ändern und damit die Funktionsfähigkeit der Verschlusskomponenten beeinträchtigen. Es ist ebenfalls nicht auszuschließen, dass eine eiszeitliche Rinnenbildung zur Erosion der Verschlüsse bzw. Teile dieser (obere Verschlussmodule) führt. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit der Verschlüsse wird auf den Zeitraum bis 50.000 Jahre nach deren Errichtung begrenzt. Zum Ende dieses Zeitraums wird erwartet, dass die Auflockerungszone im Grubengebäude geschlossen und der Streckenausbau korrodiert ist. Der Versatz wird durch Kompaktion und Quellen eine dem Wirtsgestein vergleichbare Dichte entwickelt haben.

#### **Auslegungsanforderungen:**

Hydraulische Anforderungen: Verzögerung von Lösungsbewegungen längs der Schachttachse. 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 Minimalspannung im Gebirge nicht überschreiten. Setzungsstabilität der Füllsäulen.

Thermische Anforderungen: Keine

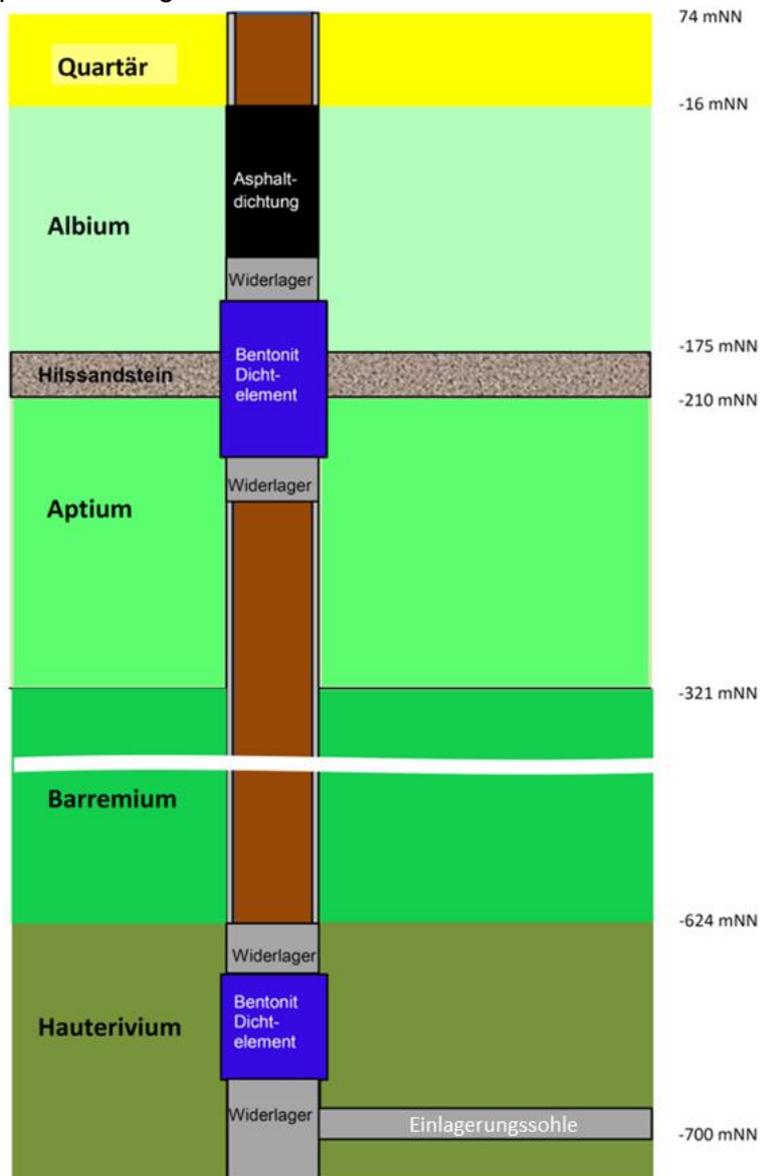
Chemische Anforderungen: Langzeitstabil während der Funktionsdauer.

Weitere Anforderungen an Schachtverschlüsse sind in Kudla et al. (2013) aufgeführt.

### Technisches Design

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.

Die geologischen Verhältnisse erfordern einen kompletten Ausbau der Endlagerschächte. Hier wird daher unterstellt, dass das Schachtausbaukonzept in etwa dem Konzept im Nebengebirge der Schächte Gorleben entspricht. Demnach wird ein Zwei-Röhrenkonzept mit Außenröhre und Innenröhre unterstellt. Die Außenröhre besteht im Quartär aus Betonformsteinen und darunter bis zum Endlagerniveau aus Stahlringen mit Doppel-T-Profil und Mörtelverfüllung. Die Außenröhre wird in verschiedenen Niveaus durch Aufhänge- und Aufstandsfundamente stabilisiert. Die Innenröhre besteht aus einem Stahlblechmantel und bewehrtem Beton und stützt sich auf eigenen Fundamenten ab. Die Wasserdichtigkeit des Ausbausystems wird durch eine zwischen Außenausbau und Innenausbau angeordnete Asphaltichtung erzielt. Dies ist vor allem im Quartär, aber auch bis in das Niveau des



Hilssandstein-Aquifers relevant. Der Schachtausbau ist für die Betriebszeit des Endlagers (ca. 80 Jahre) auszulegen. Er wird während der Nachverschlussphase korrodieren und dann ausfallen. Für die frühe Nachverschlussphase wird er aber den Lösungszutritt zum Schacht begrenzen. Dies ist von Vorteil, da bis zum Versagenszeitpunkt die Einspannung der Widerlager im Gebirge und die Aufsättigung des Bentonits in den Dichtelementen voranschreiten.

Es ist vorgesehen, die Schachtausbauten und der Hauptteil der Auflockerungszone im Niveau der Schachtverschlüsselemente zu entfernen, um den direkten Kontakt zwischen dem Gebirge und den Dichtelementen sowie die effektive Einspannung der Verschlusswiderlager zu ermöglichen.

Im Bereich des Wirtsgesteins und des tonigen Nebengebirges wird ein System aus beidseitigen Betonwiderlagern und dazwischen liegende Bentonit-Dichtelemente, für die Schachtverschlüsse verwendet.

Abb. 3.5: Vorentwurf Schachtverschlusskonzept

Die Schachtverschlüsse gliedern sich in die unteren Schachtverschlusselemente, die im Wirtsgestein unterhalb von 600 m GOK angeordnet sind und die oberen Schachtverschlusselemente, die sich im überlagernden Nebengebirge befinden.

Die unteren Schachtverschlusselemente bestehen aus einem umfangreichen unteren Betonwiderlager. Darüber folgt ein ca. 60 m mächtiges Bentonitdichtelement (Abb. 3.5). Wie im Kap. 2.3 Bohrlochverschluss dargestellt, soll im FuE-Projekt ANSICHT ein Ca-Bentonit als Referenzmaterial für die Dichtelemente der geotechnischen Barrieren verwendet werden, da von diesem Material eine umfangreiche Datenbasis vorliegt (Breidung 2002, Jobmann 2002, Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe et al. 2012). Durch eine Zumischung von 20-30 % Sand kann die Kompaktion des Barrierematerials erhöht und die mechanischen Eigenschaften des Materials verbessert werden ohne die Permeabilität gegenüber Lösungen zu erhöhen.

Der Quelldruck des Bentonits soll beim Einbau die Minimalspannung im Wirtsgestein nicht überschreiten. Nach den Ergebnissen des In-situ-Versuches Schachtverschluss Salzdetfurth kann mit dem vorgesehenen Baumaterial eine Permeabilität von ca.  $1,0 \cdot 10^{-17}$  bis  $7,8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  erzielt werden (Breidung 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 hydromechanischen Eigenschaften des Dichtelementes können durch das Variieren von Herstellungsverfahren und durch die Materialrezeptur an die Standortanforderungen angeglichen werden. Der Quelldruck des aufgesättigten Bentonits soll ca. 1 MPa betragen.

Obwohl das Gewicht des überlagernden Materials wesentlich zur Stabilisierung des Bentonit-Dichtelementes beiträgt, ist oberhalb des Dichtelementes ein ca. 20 m mächtiges Betonwiderlager vorgesehen, welches das Dichtelement während der Wiederaufsättigung mit Wasser stabilisiert. Die Betonwiderlager werden so ausgelegt, dass sie einerseits dem Quelldruck des Tons und andererseits dem Gebirgsdruck mechanisch widerstehen. Für einen guten Lastabtrag könnten die Widerlager z.B. eine konische Form haben (Abb. 3.6). Sie sollen aus hoch festem, nicht armiertem Beton errichtet werden, der langzeitstabil ist. 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 Wiederaufsättigung des Bentonits erfolgt durch lateral zutretende Gebirgslösungen sowie, nach Ausfall des Schachtausbaus, durch von oben zutretende Wässer. Zur Vergleichmäßigung der Aufsättigung des Bentonits können zwischen

Dichtelement und Widerlager auch Übergangsschichten aus Kies-Sand-Gemischen angeordnet werden.

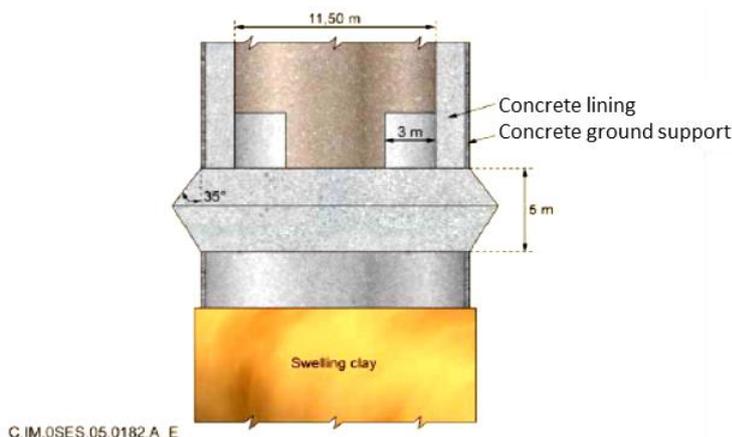


Abb. 3.6:  
Mögliches Design des oberen Betonwiderlagers über dem unteren Bentonit-Dichtelement (ANDRA 2005)

Bei einem plötzlichen Anstieg des Wasserdrucks schützen die Betonwiderlager die Bentonit-Dichtelemente vor Erosion. Die technische Machbarkeit und die Funktionalität von Betonwiderlagern wurden durch Großversuche im Zuge des europäischen ESDRED-Projektes erprobt und nachgewiesen (ANDRA 2005).

Die Verfüllsäulen werden mittels Hartgesteinsschotter erstellt. Als Alternative könnte der freie Schachtquerschnitt ggf. auch mit arteigenem Material aus der Auffahrung bzw. Gemischen aus Auffahrungsmaterial und anderen Zuschlägen verfüllt werden. Die Nutzung des Tongesteins bzw. Gemischen mit einem Tongesteinsanteil als Verfüllsäule im Schacht ist noch nicht erprobt und bedarf weiterer Untersuchungen.

Im oberen Schachtverschluss wird das 80 m mächtige Bentonitdichtelement so angeordnet, dass es den ca. 35 m mächtigen Hilssandstein, der als Aquifer ausgebildet sein kann, abdichtet. Das Dichtelement wird durch zwei je 20 m mächtige Beton-Widerlager in seiner Position gehalten. Oberhalb des oberen Betonwiderlagers ist – analog zum Verschlusskonzept Konrad - eine ca. 100 m mächtige Asphaltichtung vorgesehen, die aus Sand-Asphaltgemischen unterschiedlicher Viskosität besteht (BfS 2002). Das Eindringen des Asphalts in die Auflockerungszone um den Schacht wird durch ein Bohrungsnetz beschleunigt. Die Asphaltichtung dient dazu, den unteren Bereich der Schachtsäule gegen das stark wasserführende Quartär abzudichten.

Der oberste Schachtbereich (Quartär) wird mit Nebengebirgsmaterial so verfüllt, dass er die Geologie in diesem Profilbereich nachahmt.

### 3.5 Versatz

Der Versatz in den Einlagerungsstrecken, in den Querschlägen und in den Richtstrecken soll einerseits dazu dienen, durch seine Quellfähigkeit im Zuge der Aufsättigung einen Stützdruck aufzubauen, der die Konvergenz des Gebirges reduziert und damit weitergehende Schädigung des Wirtsgesteins in der Umgebung der Strecken (ALZ) verhindert. Durch die Quelldruckentwicklung und die Kompaktion des Versatzes durch das auflaufende Gebirge soll der Versatz andererseits langfristig auch der Abdichtung der Strecken dienen. Die Konvergenz kann allerdings erst nach dem Versagen bzw. der Korrosion des Streckenausbaus zur Kompaktion des Versatzes beitragen. Die Standzeit des Streckenausbaus ist z.Z. nicht bekannt. Voraussetzung für die Versatzaufsättigung ist zunächst die Aufsättigung der ungesättigten Zone, die sich durch die Bewetterung während des Endlagerbetriebs in der Auflockerungszone um die Strecken und ggf. im daran angrenzenden Wirtsgestein gebildet hat. Die Dauer dieser Aufsättigung wurde anhand erster indikativer Prozessanalysen (Burlaka 2016) auf Basis der festgelegten Modellparameter (Jahn & Sönke 2013) mit >1000 Jahren abgeschätzt.

Die Anforderungen an die ingenieurtechnisch nachzuweisende Funktionsdauer der Verschlussbauwerke lassen sich aus der Entwicklung der hydraulischen Eigenschaften des Streckenversatzes ableiten. Lässt sich zeigen, dass der Streckenversatz nach Korrosion des Ausbaus unter Berücksichtigung der dann eventuell noch nicht in Gänze geschlossenen Auflockerungszone - integral betrachtet - ähnliche hydraulische Eigenschaften hat wie die Verschlussbauwerke, so kann der diesbezügliche Zeitraum als Nachweiszeitraum für die Verschlussbauwerke zu Grunde gelegt werden.

***Bemerkung:** Sollte neben dem Infrastrukturbereich noch weiterer ggf. dezentraler Hohlraum als Gasspeicher benötigt werden, so wäre zu prüfen, ob Teile der Richtstrecken oder Querschläge mit Schotter verfüllt werden. Dieser Versatz würde dann, ähnlich wie im Infrastrukturbereich (vgl. Kapitel 3.6.1), durch seine hohe Porosität eine Aufnahme und Spei-*

cherung von Gasen ermöglichen. Die Notwendigkeit von dezentralen Gasspeichern sollte durch Prozessanalysen abgeschätzt werden.

### **Funktion**

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

### **Funktionsdauer**

Der Versatz soll bis zum Ende der Funktionsdauer der Verschlussbauwerke (50.000 Jahre) ähnliche hydraulische Eigenschaften wie das Wirtsgestein aufweisen und dann für den Rest des Nachweiszeitraums eine Abdichtfunktion für das Grubengebäude übernehmen.

*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, Quellung und Abschluss der Kompaktion durch das auflaufende Gebirge soll der Versatz eine ausreichend geringe Durchlässigkeit für wässrige Lösungen besitzen.

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

Thermische Anforderungen: Keine

Chemische Anforderungen: Langzeitstabil während der Funktionsdauer.

### **Technisches Konzept**

Zum Verfüllen der Strecken ist vorgesehen, arteigenes aufbereitetes Ausbruchmaterial zu verwenden, das in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Sollte die darin enthaltene Menge an quellfähigen Tonmineralen nicht ausreichen die oben genannte Anforderung an das Quellvermögen zu erfüllen, so können Zumischungen weiterer quellfähiger Tonminerale (z.B. Bentonite) vorgenommen werden. 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 Ausbruchmaterials, dann ein Zerkleinern und ggf. Trocknen, damit das Material mit Bentonit gemischt und mit entsprechender Einbringtechnik qualitätsgesichert mit vorgegebener Einbaudichte eingebracht werden kann. Gegebenenfalls ist nach Einbringung auch eine (teilweise) Kompaktion mit einer Verdichterplatte möglich (Abb. 3.7).



Abb. 3.7:  
Versuche zur Streckenverfüllung  
im Untertagelabor in 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 und die Ausbildung von Kanalisationen zu vermeiden. Der genaue Ablauf der Versatzkompaktion unter endlagerspezifischen Randbedingungen ist noch nicht bekannt.

### 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 analog dem Projekt VSG zugrunde gelegt werden (Bollingerfehr et al. 2012). Das Hohlraumvolumen des Infrastrukturbereiches beträgt ca. 230.000 m<sup>3</sup>.

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 durchgeführt (Burlaka 2016). Diese haben ergeben, 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 Einlagefelder und Zugangsstrecken nur geringfügig bzw. vernachlässigbar ist. Aber schon die Verzögerung des Druckaufbaus am Schachtverschluss erscheint aus jetziger Sicht ein ausreichender Grund, ein Speichervolumen vorzusehen. 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 - zugelaufen sein wird (Burlaka 2016). Er stünde somit als Gasspeicher danach nicht mehr zur Verfügung. Als Funktionszeitraum wird daher bis auf weiteres 10.000 Jahre festgelegt.

#### **Auslegungsanforderungen:**

Hydraulische Anforderungen: Hohe Porosität und Permeabilität, großes Speichervolumen.

Mechanische Anforderungen: Mechanische Stabilisierung der Grubenräume.

Thermische Anforderungen: Keine.

Chemische Anforderungen: Stabil während der Funktionsdauer.

#### **Technisches Konzept**

Der Infrastrukturbereich soll als Gasspeicher mit nicht kompaktierbarem Versatz verfüllt werden. Die Porosität des zur Verfüllung angenommenen Schotters beträgt ca. 35%. Daraus

ergibt sich ein Speichervolumen im Infrastrukturbereich von ca. 80.500 m<sup>3</sup>. Als Schottermaterial kann Basalt, Serpentin, Quarz oder Diabas zum Einsatz kommen. Diese Materialien sind im erwarteten hydrochemischen Milieu langzeitstabil. Zudem sind sie 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 begrenzt sein. Es ist nicht auszuschließen, dass diese Bohrungen Verbindungen zwischen sandigen Lagen/Linsen oder Störungen und Klüften im Wirtsgestein und dem Grubengebäude herstellen.

Untersuchungen an Erkundungsbohrungen in den Unterkreidetonen im Nebengebirge des Endlagers Konrad zeigen, dass unverfüllte Bohrlöcher in diesen Gesteinen sehr instabil sind und zum Nachbruch neigen (Wittke 1991a,b). Daher wird vorgesehen, alle nicht überfahrenen Erkundungsbohrungen nach Durchführung der Untersuchungen rasch qualitätsgesichert mit einem langzeitbeständigen Verschlussmaterial zu verschließen.

Es gibt eine Reihe von in-situ-Versuchen zu Bohrlochverschlüssen in verschiedenen Wirtsgesteinstypen:

- Tongesteine: NAGRA (2002b) (Wellenberg), Volckaert et al. (1998) (Hades);
- Kristallingesteine: Blümling (2005) (Grimsel), Fairhurst et al. (1993) (ÄSPÖ) und
- 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 der Fluidbewegungen entlang von Erkundungsbohrungen.

#### **Funktionsdauer**

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

#### **Auslegungsanforderungen**

Hydraulische Anforderungen: Ausreichend geringe Durchlässigkeit für Fluide.

Mechanische Anforderungen: Auslegung gegen Gebirgsdruck, möglicherweise auftretende Fluiddrucke und gegen den Quelldruck eventueller Bentonitdichtelemente.

Thermische Anforderungen: Keine

Chemische Anforderungen: Langzeitstabilität in den Formationswässern während des Nachweiszeitraumes

## 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 2002b). 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 besitzt der Bohrlochverschluss ähnliche hydraulische Eigenschaften wie das umgebende Gebirge. Die Materialien zur Bohrlochverfüllung besitzen teilweise ungünstigere Sorptionseigenschaften für Radionuklide als die Tongesteine und entsprechen diesbezüglich in etwa den Verhältnissen in Kluft-/Störungszonen (Nagra 2002b).

Zur Sicherstellung der vorgesehenen Abdichtfunktion der Bohrlochversiegelung ist eine umfassende Qualitätssicherung bei der Herstellung der Verfüllmaterialien und bei der Durchführung der Verfüllarbeiten erforderlich.

Wichtig für die Funktion der Bohrlochversiegelung ist die Entwicklung der Auflockerungszone um das Bohrloch. Aufgrund des geringen Bohrdurchmessers 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 des FuE-Vorhabens ANSICHT sollte 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 sind neben der geologischen Situation das Endlagerkonzept und das Verfüll- und Verschlusskonzept. Dieser Bericht beschreibt zunächst das Endlagerkonzept, das für das Endlagerstandortmodell NORD entwickelt wurde. Darüber hinaus stellt Bericht ein erstes Verfüll- und Verschlusskonzept vor auf dessen Basis der FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD entwickelt und die notwendigen Szenarien abgeleitet werden können.

Das Endlagerkonzept für das Endlagerstandortmodell NORD wurde für die Einlagerungsoption vertikale Bohrlochlagerung entwickelt. Das zugehörige Behälter- und Rückholungs-/Bergungskonzept bestehend aus rückholbaren Kokillen und einem Bohrlochliner wurde aus der „vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) übernommen und an die Rahmenbedingungen und Anforderungen im tonigen Wirtsgesteinen angepasst. Das im Rahmen des FuE-Vorhabens ERATO entwickelte Grubengebäudekonzept für Tongesteine wurde entsprechend dem geänderten Einlagerungskonzept angepasst.

Basierend auf dem Einlagerungskonzept und der Grubengebäudeplanung wurde ein vorläufiges Verfüll- und Verschlusskonzept entwickelt, das die grundsätzliche Anforderung der Sicherheitsanforderungen nach Redundanz und Diversität erfüllt. Dieses Verschlusskonzept besteht aus den Komponenten Bohrlochverschlüsse, Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse. 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 die wesentlichen Punkte 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 Hauterivium ist prinzipiell wassergesättigt und der Buffer wird nicht komplett trocken eingebaut werden. Es ist also davon auszugehen, dass unmittelbar, spätestens jedoch nach dem Aufsättigen des Buffers (Dauer sollte noch durch Prozessanalysen bestimmt werden), eine Korrosion des Innenliners einsetzen wird. Sobald dieser ausfällt, können Lösungen zu den rückholbaren Kokillen vordringen und die Korrosion der Kokillen in Gang setzen. Aus den Korrosionsraten, die von den zur Verfügung stehenden Lösungsmengen, dem Lösungsschemismus, den Temperaturen und der Mikrobenpopulation bestimmt werden, ergibt sich, wie lange eine Kokille intakt bleibt.
- Relevanz des Streckenausbaus für die Langzeitentwicklung des Endlagersystems. Aus Gründen der Betriebssicherheit müssen alle Grubenräume durch einen Betonausbau stabilisiert werden, der nach der Schließung im Grubengebäude verbleibt. Der Streckenausbau hat Auswirkungen auf die Schließung der Firstspalte und die Versatzkompaktion. Es ist außerdem zu prüfen, ob der korrodierte Streckenausbau nicht zu unzulässig hohen Durchlässigkeiten im Streckensystem führen kann.

### 5.2 Fragen zur weiteren Präzisierung

- Prüfung zur Eignung des festgelegten Versatzmaterials (arteigenes Material, aufbereitet und ggf. mit quellfähigen Mineralen versehen) anhand von Laborversuchen.
- Es gibt Labor- und in-situ-Versuche zur Versatzkompaktion 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.
- Dauer der Aufsättigung der verschiedenen Bentonit-Dichtelemente als Grundlage zur Konkretisierung von Funktionszeiträumen einzelner Barrierekomponenten.
- 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 bzw. der Gasbildung existieren, die eine advektive Strömung ermöglichen.
- Es wird erwartet, dass das Quellvermögens 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 ist zu zeigen, dass dies nicht zu einer relevanten Veränderung der Wirkung des Buffers im Sinne der genannten Anforderungen führt.
- Gasbildungsraten und Zeitverlauf der Gasbildung gemäß Behälterkonzept als Grundlage zur Bestimmung des Druckaufbaus an den Verschlusselementen und damit zu deren Auslegung.

## 6 Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Technischer Bericht, AkEnd.
- ANDRA (2005). Dossier 2005 Argile Tome: Architecture and management of a geological repository. Technical report, Andra.
- Blümling, P. (2005). Borehole sealing project at the Grimsel Test Site. Geotechnical and Geological Engineering, 23, (DOI 10.1007/s10706-004-2144-9), 843-858.
- BMU (2002). Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002. Planfeststellungsbeschluss Konrad, BMU.
- 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 Salzdethfurth. 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., Wetingen.
- 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 WIPP. 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., & Müller-Hoeppe, N. (2011). Ermittlung der anfänglichen Porenraumsättigung vom Salzbeton Typ Asse und vom Sorelbeton A1 und Ca-Bentonit Typ Salzdethfurth (Arbeitspaket 9.1.2). Tech. rep., DBE TEC.
- Engelhardt, J., Jobmann, M., & Müller-H. (2011). Materialspezifikationen für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (VSG Arbeitspaket 9.1.2). Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Fairhurst, C., Gera, F., Gnirk, P., Gray, M., & Stillborg, M. (1993). International Stripa Project 1980–1992 Overview Volume I. Tech. rep., OECD/NEA.
- Filbert, W., Amelung, P., & Biurrun, E. et al. (2004). Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein. Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Finley, R., & Tillerson, J. (1992). WIPP small scale seal performance tests - status and impacts. Tech. rep., SANDIA.
- Gatabin, C., Guyot, J.-L., Resnikow, S., Bosgiraud, J.-M., Londe, L., & Seidler, W.-K. (2008). From bentonite powder to engineered barrier units - an industrial process. Underground disposal unit design and emplacement processes for a deep geological repository.
- Gaudin, A., Gaboreau, S., Tinseau, E., Bartier, D., Petit, S., Grauby, O., et al. (2009). Mineralogical reaction in the Tournemire argillite after in-situ interaction with steels. Applied Clay Sc, 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., Jobmann, M. & Kudla, W. (2016a). ELSA Phase II, Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse im Ton- und Salzgestein, Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, TU Bergakademie Freiberg, Peine, Freiberg.
- Herold, P., Kuate-Simo, E. & Jobmann, M. (2016b). Methode des Sicherheitsnachweises für geotechnische Barrieren in einem HAW-Endlager im Tongestein in Deutschland. In: Jobmann (ed.) (2016). Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- 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.
- Jahn, S. & Sönneke, J. (2013). Endlagerstandortmodell Nord - Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- Jobmann, M. (2002). Hydraulische Modellierungen, F+E-Vorhaben Schachtverschluss Salzdettfurth. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH.
- 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. (2015). Evaluation of temperature-induced effects on safety-relevant properties of clay host rocks with regard to HLW/SF disposal, *Mineralogical Magazine*, November 2015, Vol. 79(6), pp. 1389–1395.
- Jobmann, M. & Meleshyn, A. (2016). Analysen zu Temperatureffekten im Nahbereich der Behälter. In: Jobmann (ed.) (2016): Spezifische Prozessanalysen, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH, Braunschweig, Peine.
- Jobmann, M., Amelung, P., & Uhlig, L. (2007). Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS - Anlagenband Geologie der Referenzregionen im Tonstein. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY.
- Jobmann, M., Meleshyn, A., Maßmann, J., Polster, M. (2015). Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tongestein, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Kawakami, S., Kanno, T., Jintoku, T., Ueda, H., & Kimoto, T. (2001). Large scale manufacturing test of monolithic buffer material for geological disposal of HLW. 9th international conference on nuclear engineering, Nice.
- Kudla, W., Schreiter, F., Gruner, M., Jobmann, M., Bollingerfehr, W., Müller-Hoeppe, N., Herold, P., Freyer, D., Wilsnack, T. & Grafe, F. (2013). Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA Teil 1–, TU Bergakademie Freiberg und DBE TECHNOLOGY GmbH, Freiberg, Peine.
- Kursten, M., & Druyts, F. (2008). Methodology to make a robust estimation of the carbon steel lifetime with respect to the Belgian Supercontainer Design. *Journal of Nuclear Materials*, 379, 91-96.
- Mrugalla, S. (2014). Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Norddeutschland - ohne Endlagereinfluss. Ergebnisbericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wiczorek, 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 (2002a). Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Technical Report, Nagra.
- Nagra (2002b). SMA/WLB: Bohrlochversiegelung/-verfüllung SB4a/schräg. Tech. rep., Nagra.
- Nowak, T. & Maßmann, J. (2013). Endlagerstandortmodell Nord - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Modellberechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- Nagra (2012). Canister Design Concepts for Disposal of Spent Fuel and High Level Waste, Nagra Technical Report NTB 12-06, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- ONDRAF/NIRAS (2001). Technical overview of the SAFIR 2 report, Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. Tech. rep., ONDRAF/NIRAS.
- 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., Jahn, S., Kühnlenz, T., Ptock, L., & Sönke, J. (2013). Endlagerstandortmodell Nord - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- Reinhold, K. & Sönke, 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, Technischer Bericht GRS-338, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, GRS, Braunschweig.
- Rübel, A. (2016). Abschätzung zur Gasproduktion im Nahfeld. In: Jobmann (ed.) (2016): Spezifische Prozessanalysen, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH, Braunschweig, Peine.
- 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). Tech. rep., Galson Sciences Ltd.
- Wittke, W. (1991a). Endlager Konrad Schachtverfüllung/Alte Bohrungen Bericht Teil A II. Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (541 m Sohle). Tech. rep., Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter.
- Wittke, W. (1991b). Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (343 m Sohle) Bericht A1. Tech. rep., Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter.
- 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., Czaikowski, O., Rothfuch, T., & Wieczorek, K. (2013). Thermo-Hydro-Mechanical Processes in the Nearfield around a HLW Repository in Argillaceous Formations, Volume I, Laboratory Investigations. Tech. rep., GRS.
- Zhang, C.-L. (2012). Characterization of Excavated Claystone and Claystone-Bentonite Mixtures as Backfill/Seal Material. 5th International Clay 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
RK-BE	Rückholbare Kokille mit Leistungsreaktor-Brennelementen
RK-HA	Rückholbare Kokille mit hochradioaktiven Wärme entwickelnden Wiederaufarbeitungsabfällen
RK-ST	Rückholbare Kokille mit kompaktierten Strukturteilen aus der Brennelement-Konditionierung
RK-WA	Rückholbare Kokille mit nicht Wärme entwickelnden Wiederaufarbeitungsabfällen
SWR	Siedewasserreaktor
MOX	Mischoxid Brennelemente
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben
WWER/DWR	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor (DWR russischer Bauart)

## **ANHANG (Ergebnisse des FuE-Projektes ELSA-Phase-II)**

### **Schachtverschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD (Herold et al. (2016))**

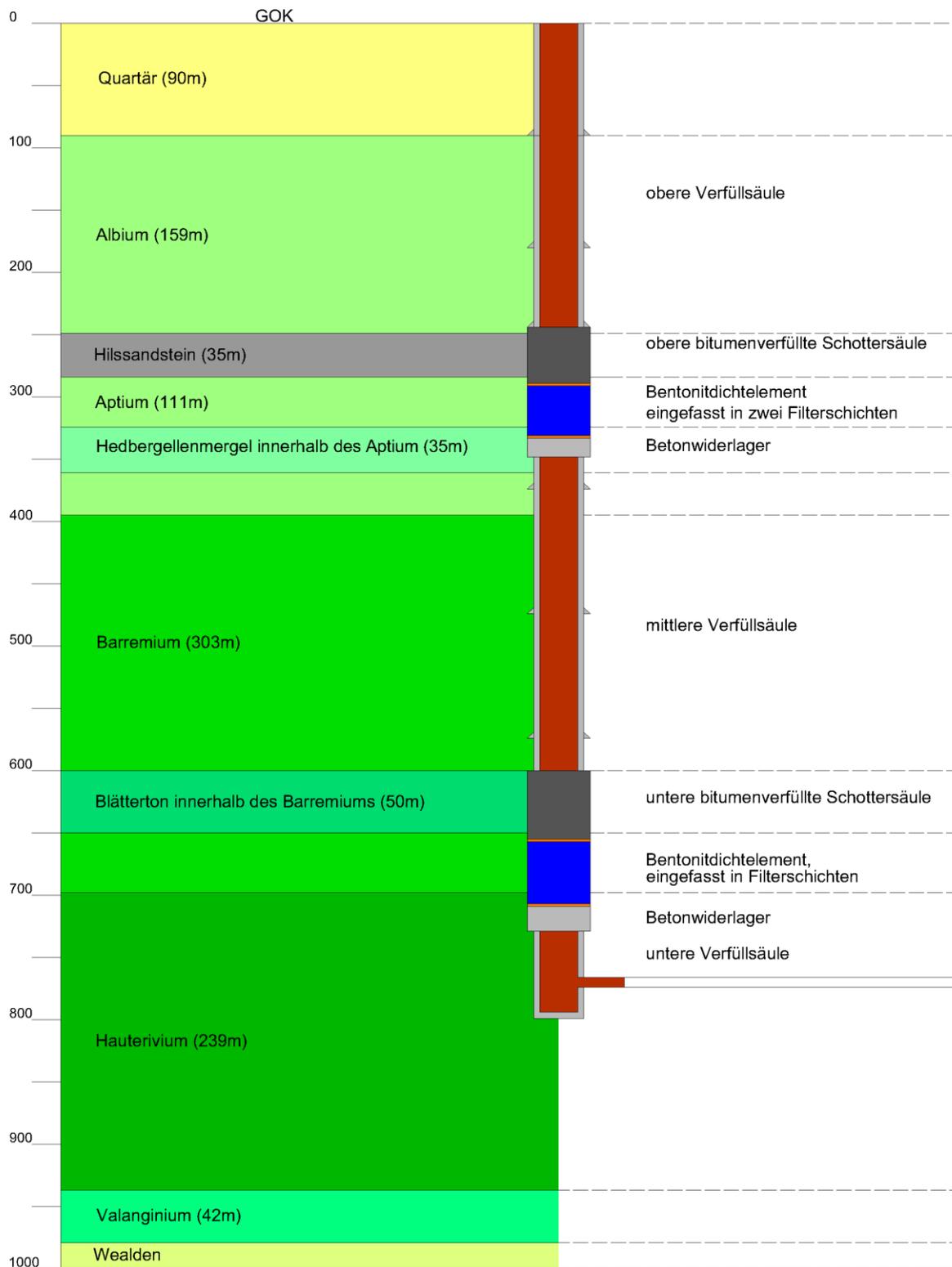
Der Schachtausbau muss bis unter den tiefsten Grundwasserleiter in wasserdichter Ausführung errichtet werden. Für das erarbeitete Verschlusskonzept wird angenommen, dass ein wasserdichter Ausbau mindestens bis ins Barremium hinein existiert. Der wasserdichte Ausbau wird als dreischaliger Ausbau mit einer inneren und äußeren Schale und einer dazwischen liegenden Asphaltfuge als Dichtfuge angenommen. Innerhalb der Wirtsgesteinsformation ist auch die Nutzung eines zweischaligen Ausbaus, ohne zusätzliche Dichtfuge, möglich. Entsprechend der an den Dichtungsstandort gestellten Anforderungen, wird im Bereich der Dichtungen und Betonwiderlager der Ausbau entfernt und die Auflockerungszone (ALZ) entsprechend ihres tiefenabhängigen Schädigungsgrades nachgeschnitten. In den übrigen Bereichen des Schachtes verbleibt der Ausbau. Alle Bereiche des Schachtes, in denen keine Dichtelemente oder Widerlager installiert sind, werden mit Verfüllsäulen aus Hartgesteinsschotter vollverfüllt. Zusätzlich zu den beschriebenen Modulen können Filterschichten zur Gewährleistung der Filterstabilität eingebracht werden.

Das Schachttiefste und der Füllortbereich werden mit einer auslaufsicheren Verfüllsäule versehen. Eine Verfüllung der angrenzenden Grubenräume wird bei der Konzeption des Schachtverschlusssystems nicht berücksichtigt.

Im Bereich zwischen Füllort und der oberen Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) soll das als "Hauptdichtung" bezeichnete Dichtsystem errichtet werden. Als langzeitstabile Dichtung soll eine in zwei Filterschichten eingefasste Bentonitdichtung dienen. Ein Betonwiderlager unterhalb der Dichtung gewährleistet die Lagestabilität der Dichtung. Der Baustoff Bentonit ermöglicht die Errichtung von Dichtungen mit ähnlich geringen Permeabilitäten wie sie auch im Wirtsgestein vorliegen. Das Bentonitdichtelement entwickelt während der Aufsättigung durch zutretende Wässer einen Quelldruck. Zusätzlich zur Gebirgskonvergenz wirkt dieser Quelldruck auch auf die ALZ und begünstigt damit das Verschließen möglicher Wegsamkeiten.

Im Grenzbereich des ewG stehen gemäß dem Standortmodell geringfeste und bituminöse Blättertone an. Dieser Bereich oberhalb der Bentonitdichtung soll mit einer Bitumenschottersäule versehen werden. Das Vergießen der Schottersäule mit Bitumen erlaubt eine sofortige Dichtwirkung am Standort. Die Verfüllsäule des Bitumens wird zweigeteilt ausgeführt. Im unteren Teil wird ein beschwertes Bitumen vergossen. Im oberen Teil soll ein reines Bitumen (B80) eingebaut werden. Das ungefüllte Bitumen hat eine geringere Dichte als die zutretenden Wässer. Bei Zuflüssen von unten schwimmt das Bitumen auf den Wässern auf. Es kommt zu keiner dichteabhängigen Umschichtung. Für eine Abdichtung gegen Lösungen von oben ist das beschwerte Bitumen vorgesehen. Langfristig kann ein Abfließen des Bitumens in die ALZ und das umgebene Gebirge zu einer Absenkung des Bitumenspiegels führen. Innerhalb des gewählten Standortes wird dieser Effekt als sehr gering abgeschätzt. Eine Erhöhung der Bitumenschottersäule zum Ausgleich des Abfließens wird nicht berücksichtigt. Füllerbestandteile im Bitumen führen in Folge des Abfließens zur Verstopfung der Wegsamkeiten. Grundsätzlich gilt, dass Partikel Risse und Poren bis zur dreifachen Korngröße mit diesem Stopfeffekt verschließen können. Mögliche Wegsamkeiten um die Verfüllsäule werden so verschlossen.

Über dem Dichtelement verbleibt der Ausbau im Schacht und der freie Querschnitt wird mit Hartgesteinsschotter verfüllt. Die Verfüllsäule reicht bis an die Untergrenze des oberen ergänzenden Dichtsystems.



Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD  
 (Herold et al. 2015, Stand 18.03.2015)

Eine weitere Dichtungskombination in der Teufenlage von ca. 200 bis 350 m unter GOK soll zum einen die Aquifere im Quartär und Hilssandstein trennen und zum anderen mögliche Zuflüsse aus diesen zur Hauptdichtung verzögern. Das Dichtungspaket soll im Bereich des Hedbergellenmergel mit einem unteren Betonwiderlager verlagert sein. Durch den Karbonatreichtum wird erwartet, dass der Hedbergellenmergel eine vergleichsweise höhere Festigkeit

aufweist als die umgebenden Formationen, was für eine Verankerung förderlich ist. Die Bentonitdichtung im unteren Teil liegt vollständig in den Tongesteinen des Aptium. Die Ausführung und auch Funktionen der Bentonitdichtung sind gleich der Hauptdichtung. Mit Hilfe des Dichtkörpers aus einem binären Bentonitgemisch soll am Dichtungsstandort eine integrale Permeabilität möglichst nah an der Permeabilität des unverritzten Gebirges erreicht werden. Zutritte zum unteren Dichtsystem werden damit verzögert. Weiterhin sollen die unterschiedlichen Salinitäten/Mineralisationen der oberflächennahen Wässer von den Tiefenwässern getrennt werden.

Der fein- bis mittelsandige Hilssandstein stellt eine vergleichsweise steife und feste Struktur dar. Im Vergleich zum Tongestein besitzt der Sandstein eine hohe Permeabilität und Porosität. Der Einbau von tonigen Materialien (wie Bentonit) im Sandstein kann entsprechend der sehr feinen Tonminerale in Verbindung mit Wasserzutritten aus dem Sandstein zu einer Suspensionsbildung und Erosion an den Rändern des Bentonit-Elementes führen. Daher soll im Bereich des Hilssandsteins auf den Einsatz von Bentonit verzichtet und stattdessen eine Bitumenschottersäule errichtet werden. Die Bitumenschottersäule soll analog der bereits beschriebenen Säule aus zwei unterschiedlichen Bitumen errichtet werden.

Die Errichtung der Bitumenschottersäule ist bewusst über die gesamte Mächtigkeit des Hilssandsteins und zusätzlich mehrere Meter ober- und unterhalb vorgesehen. Ein mögliches Abfließen des Bitumens in den Sandstein bzw. vorhandene Wegsamkeiten wie Klüfte in der ALZ, soll diese Wegsamkeiten verschließen und Zuflüsse zur Bentonitdichtung verzögern. Um ein begrenztes Abfließen und den gewollten Stopfeffekt zu fördern, muss bei der Auslegung der Dichtung darauf geachtet werden, dass der hydrostatische Druck der Bitumendichtung den Strömungsdruck im Aquifer übersteigt. Gleichzeitig muss auch die Dichtungshöhe ausreichend groß sein, um die Trennung zwischen beiden Aquiferen über den Funktionszeitraum hin zu gewährleisten. Die obere Bitumenschottersäule kann ggf. bis an das Quartär herangeführt werden.

Die verbleibende freie Schachtsäule wird mit einer Schotterverfüllung versehen. Innerhalb des Quartärs verbleibt der Ausbau im Schacht.