

# **Deutsche Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton und Kristallin**

**Bericht zum Arbeitspaket 1**

## **Anhang 6**

Anforderungen an aktuelle  
Endlagerkonzepte  
für unterschiedliche  
Wirtsgesteinsformationen

## Deutsche Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton und Kristallin

### Bericht zum Arbeitspaket 1

#### Anhang 6

Anforderungen an aktuelle  
Endlagerkonzepte  
für unterschiedliche  
Wirtsgesteinsformationen

Stephan Uhlmann

August 2017

#### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) unter dem Kennzeichen 3616E03200 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

## **Deskriptoren**

Deutschland, Endlagerkonzept, Kristallin, Rückholbarkeit, Ton

## Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens 3616E03200 „Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen“ werden internationale Endlagerkonzepte für die Wirtsgesteine Ton/Tonstein, Granit und Salz dargestellt und ausgewertet. Ein Ziel des Vorhabens ist es den internationalen Stand von W&T darzustellen und mögliche Grundanforderungen an Endlagerkonzepte abzuleiten. Hierzu gehören z. B. die Themenfelder Abfallcharakteristik, Einlagerungs- und Rückholtechnik, thermische Auslegung, Behälterkonzept und Co-Disposal. Ferner sollen notwendige Grundlagen für einen Vergleich von Endlager-Standorten aus technisch-wissenschaftlicher Sicht im Rahmen des laufenden Standortauswahlverfahrens unter Berücksichtigung einer möglichen Rückholbarkeit der hoch radioaktiven Abfälle während der Betriebszeit eines Endlagers geschaffen werden.

Der vorliegende Bericht fasst die deutschen Ansätze für Endlagerkonzepte für die Wirtsgesteine Ton und Kristallin zusammen. Dabei wird sich für das Wirtsgestein Ton bzw. Tonstein hauptsächlich dem Projekt ANSICHT /JOB 17/ und dem Projekt /BOL 14/ bedient. Die Ansätze für ein Endlager in Kristallin werden den Projekten CHRISTA /JOB 16/ und /DBE 16/ entnommen. Die Endlagerkonzepte für beide Wirtsgesteine sind bisher generischer Art, weil noch kein Standort für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Deutschland festgelegt ist. Im Wirtsgestein Ton wird ein Bohrlochlagerungs- und ein Streckenlagerungskonzept in Betracht gezogen. Die Bohrlochlagerung erfolgt in rückholbaren Kokillen und die Streckenlagerung in Supercontainern. Hingegen verfolgt das Endlagerkonzept im Wirtsgestein Kristallin nur das Bohrlochlagerungskonzept. Versetzt wird die Einlagerungs- bzw. Zugangsstrecke mit Bentonit. Querschläge und Richtstrecken werden mit einem quellfähigen Tongemisch versetzt. Im Wirtsgestein Kristallin ist in Anlehnung an das schwedische/finnische KSB-3-Konzept ein Versatz der meisten Strecken mit Bentonit bzw. Tongemischen vorgesehen. Es ist vorgesehen alle Strecken, sobald dies praktikabel ist zu verfüllen. Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ schreiben eine Rückholbarkeit während der Betriebsphase und eine Bergung bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers vor.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Gesetzliche Anforderungen .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Tonstein in Deutschland.....</b>	<b>5</b>
3.1	Endlager-Layout .....	6
3.1.1	Bohrlochlagerung.....	6
3.1.2	Streckenlagerung.....	10
3.2	Einlagerungssystem .....	13
3.2.1	Bohrlochlagerung.....	13
3.2.2	Streckenlagerung.....	15
3.3	Sicherheitskonzept .....	17
3.3.1	Barrierenkonzept .....	17
3.4	Co-Disposal .....	27
3.5	Rückholbarkeit.....	27
3.6	Monitoring.....	28
<b>4</b>	<b>Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Kristallin in Deutschland.....</b>	<b>29</b>
4.1	Endlager-Layout .....	29
4.2	Einlagerungssystem .....	30
4.3	Sicherheitskonzept .....	30
4.3.1	Barrierenkonzept .....	30
4.4	Co-Disposal .....	33
4.5	Rückholbarkeit.....	33
4.6	Monitoring.....	33

<b>5</b>	<b>Anforderungen an die Endlager- und Behälterkonzepte .....</b>	<b>34</b>
5.1	Ton/Tonstein.....	34
5.2	Kristallin .....	35
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>37</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>40</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>42</b>

# 1 Einleitung

In Deutschland wird seit vielen Jahren an dem Thema tiefengeologische Endlagerung für radioaktive Abfälle geforscht. Seit nahezu 40 Jahren wird dazu das Wirtsgestein Salz favorisiert und untersucht. Einige Jahre wurde am Standort Gorleben geforscht, ob an jenem Standort ein Endlager für hochradioaktive Abfälle errichtet werden kann. Im Rahmen des Forschungsvorhabens VSG /FIS 13/ wurde erstmals eine vorläufige Machbarkeits- und Sicherheitsanalyse für verschiedene Endlagerkonzepte am Standort Gorleben durchgeführt.

International werden neben Salz auch Ton und Kristallin als Wirtsgesteine für Endlager für radioaktive Abfälle untersucht. Auch in Deutschland gibt es Endlagerkonzepte für diese beiden Wirtsgesteinen. Diese sind jedoch im Gegensatz zum Wirtsgestein Salz weniger stark entwickelt und reichen nicht über ein Konzept hinaus.

In diesem Bericht werden die Endlagerkonzepte der DBETEC für Ton /HER 16/ und Kristallin /JOB 16/ vorgestellt.

Für das Endlagerkonzept in Ton werden zwei Optionen vorgeschlagen: die Streckenlagerung sowie die Bohrlochlagerung. Beide unterscheiden sich vor allem im Nahbereich, d. h. in den Abfallgebänden sowie dem Verfüll und Verschlusskonzept im Nahbereich. Beide Optionen haben ihren Ursprung in den Strecken- und Bohrlochlagerungskonzepten, die für Endlager im Wirtsgestein Salz erstellt wurden /PÖH 10/.

Für die Bohrlochlagerung sind Kokillen bzw. Triple-Packs vorgesehen. Kokillen oder auch BSK (Brennstabkokillen) werden für abgebrannte Brennelemente genutzt. Die Abkürzung BSK wird dabei häufig durch zusätzliche Angaben ergänzt. Bspw. steht BSK-R für eine rückholbare Kokille, BSK-2 steht für eine Kokille, die die Brennstäbe von zwei DWR-Brennelementen enthält. Triple-Packs enthalten bis zu drei Abfallbehälter aus der Wiederaufbereitung (CSD-V, CSD-B und CSD-C). Aufgrund der geringeren Auslegungstemperatur im Wirtsgestein Tonstein enthält die BSK-2 nur die Anzahl an Brennstäben, die derer von zwei DWR-Brennelementen entspricht. Im Gegensatz dazu enthält eine BSK-3, die für das Wirtsgestein Salz konzipiert wurde, die Anzahl an Brennstäben, die derer von drei DWR-Brennelementen entspricht /PÖH 10/.

Für die Streckenlagerung ist der POLLUX-Behälter vorgesehen. Dieser enthält im Tonstein die Brennstäbe und das Strukturmaterial von drei DWR-Brennelementen. Die Reduzierung des POLLUX-3-Inventars gegenüber dem POLLUX-10 für das Wirtsgestein Salz, in dem die Brennstäbe und das Strukturmaterial für 10 DWR-Brennelemente enthalten ist, liegt an der geringeren Auslegungstemperatur für das Wirtsgestein Tonstein /PÖH 10/.

## 2 Gesetzliche Anforderungen

In Deutschland sind zunächst das Atomgesetz (AtG) und die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) für ein Endlager für radioaktive Abfälle zu berücksichtigen. Weiterhin gibt es die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) /BMU 10/, welche die spezifischsten Anforderungen darstellen.

Hinsichtlich des Nachweises der Betriebssicherheit werden in /BMU 10/ folgende Punkte genannt:

„Für die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase einschließlich Stilllegung ist die Zuverlässigkeit und Robustheit von Sicherheitsfunktionen innerhalb des Endlagers in Anlehnung an das kerntechnische Regelwerk für vergleichbare Funktionen in anderen kerntechnischen Anlagen nachzuweisen. Für die Betriebsphase sind darüber hinaus in vier Sicherheitsebenen gestaffelte Maßnahmen zu planen, wie dies analog auch für Kernkraftwerke gilt. Durch die Zuordnung dieser vier Ebenen zu Anlagenzuständen und durch die Festlegung der für diese Anlagenzustände zu ergreifenden oder vorgesehenen Schutzmaßnahmen ist ein Konzept in der Tiefe gestaffelter Abwehrmaßnahmen (defence in depth) zu realisieren.“ (Punkt 8.1 in /BMU 10/).

Anforderungen bezüglich der Abfallgebinde (Abfallbehälter und Abfallprodukt) ergeben sich aus Punkt 8.6 in /BMU 10/. Abfallgebinde müssen danach 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.“

Ferner fordert /BMU 10/, dass „Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.“

Darüber hinaus sieht eine Empfehlung der Kommission eine Beobachtungsphase zwischen dem Versatz der Einlagerungsbereiche und dem endgültigen Verschluss des Endlagers vor /KOM 16/.

### **3 Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Tonstein in Deutschland**

Für Deutschland wurden im Rahmen des Projektes ANSICHT /JOB 17/ zwei Endlagerkonzepte für Tonstein in Deutschland erarbeitet. Das eine Konzept bezieht sich auf ein generisches Endlager im nördlichen Raum von Deutschland /LOM 15/ und ein weiteres auf ein generisches Endlagerkonzept im südlichen Raum Deutschlands /JOB 15/. Die Konzepte verteilen sich auf Teufen zwischen 300 und 800 m im norddeutschen Raum sowie 350 bis 800 m im süddeutschen Raum.

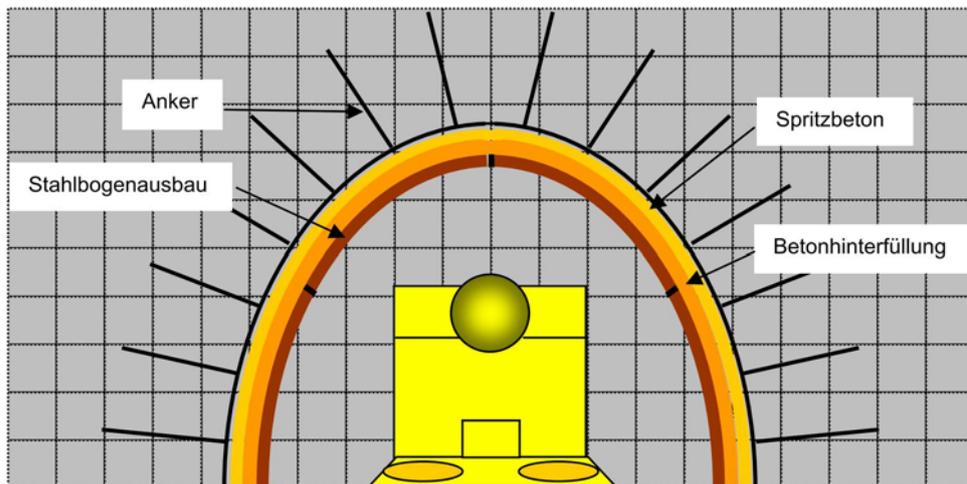
Das Projekt ANSICHT baut auf bereits abgeschlossenen Projekten zum Thema Endlager im Wirtsgestein Ton in Deutschland auf. Darunter zählen das Projekt ERATO /PÖH 10/ in dem verschiedene Ansätze in Bezug auf Einlagerungsbehälter für die Einlagerungsvarianten Bohrloch- und ein Streckenlagerung untersucht. Für die Streckenlagerung wurde das Supercontainerkonzept favorisiert, der einen POLLUX-Behälter mit den abgebrannten Brennelementen enthält. Für die Bohrlochlagerung wurde in /LOM 15/ auf die Arbeiten aus einem früheren Projekt /AME 04/ aufgebaut und weiterentwickelt. Demnach kommen je nach Abfalltyp rückholbare Brennstabkockillen (BSK-R) bzw. Gebinde aus der Wiederaufbereitung (CSD-V, CSD-B und CSD-C) zur Anwendung.

Sämtliche Endlagerbehälter werden mit einem 30 cm dicken Bentonitschicht ummantelt. Die Endlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente (POLLUX und BSK) besitzen zwischen Behälter und Bentonitschicht noch eine 20 cm Sandschicht, die die Wärmeabfuhr verbessern soll (heat spreader) /PÖH 10/.

Die Länge Betriebsphase wird mit 56,5 Jahren und die zusätzliche Stilllegungszeit mit 8 Jahren angenommen /PÖH 10/.

Ein Streckenausbau in Tonstein ist für die Betriebssicherheit unerlässlich und verbleibt im Endlager. Trotzdem ist der Stahlanteil im Ausbau zur Reduzierung der Gasbildung in der Nachverschlussphase (Langzeitsicherheit) zu minimieren /HER 16/. Der Ausbau erfolgt je nach Nutzung- bzw. Lebensdauer mit Anker-Spritzbeton oder zusätzlich mit Stahlbogenausbau (Kombiausbau). Bei letzterem wird zwischen Spritzbeton und Stahlbogen eine Betonschicht eingebracht (siehe Abb. 3.1). Ein geschlossener Ausbau (Sohle) ist nicht erforderlich. Für die kurzlebigen Einlagerungstrecken ist ein Anker-Spritzbeton- Verbundausbau ausreichend. Infrastrukturstrecken besitzen Lebensdau-

ern von mehreren Jahrzehnten und erhalten daher zusätzlich einen Stahlbogenausbau mit Betonhinterfüllung /PÖH 10/. Außerdem ist die Offenstandzeit von Zugangsstrecken bei Bohrlochlagerung länger als die der Einlagerungstrecken bei der Streckenlagerung. Dies ist beim Streckenausbau der jeweiligen Strecke zu berücksichtigen /BOL 14/.



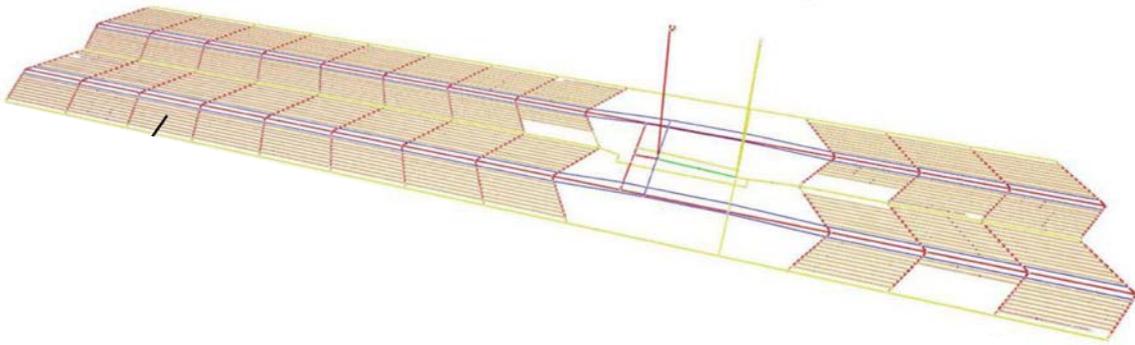
**Abb. 3.1** Schematische Darstellung des Kombi-Ausbaus /PÖH 10/

### 3.1 Endlager-Layout

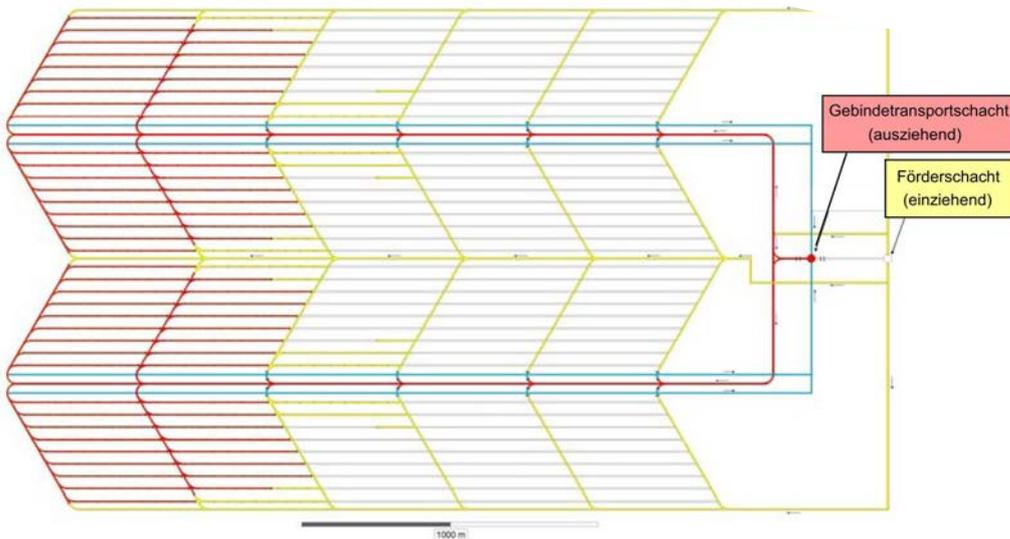
Die Einlagerungstrecken werden auf 400 m Länge begrenzt. Grund dafür ist die Vorgabe aus §49 (3) ABVO /LAN 66/, dass längere Strecken mit Rettungseinrichtungen auszustatten sind. Gleisradien für schienengebundenen Gebindetransport werden im Bereich von 25-30 m liegen. Abstände zwischen Streckenstößen benachbarter Strecken sollen mindestens das Vierfache der halben Streckenbreite betragen. Abzweigungswinkel zwischen Richtstrecken und Querschlägen sowie zwischen Querschlägen und Einlagerungstrecken sollen 60 bzw. 120 Grad betragen. Gebindetransportstrecken sind sölilig (waagrecht) auszuführen. Gebindetransportstrecken sind an Kreuzungen immer die tiefer liegende Strecke (gegenüber Abwetter- und Haufwerktransportstrecken) /PÖH 10/.

#### 3.1.1 Bohrlochlagerung

Jedes Einlagerungsfeld besitzt drei Hauptstrecken. 30m Tiefe Bohrlöcher für je 3 BSK-R Gebinde /HER 16/.



**Abb. 3.2** Endlagerlayout für eine Bohrlochlagerung in Tonstein in Deutschland /HER 16/



**Abb. 3.3** Grubengebäudezuschnitt für die Bohrlochlagerung von BSK 2 /PÖH 10/

In Abb. 3.2 und Abb. 3.3 ist das Layout des Endlagers für die Bohrlochlagerung abgebildet. Insgesamt werden 171 Einlagerungsstrecken mit jeweils 8 Bohrlochern, von denen jedes 5 Gebinden beinhaltet benötigt. Ein Einlagerungsfeld umfasst 9 Einlagerungsstrecken. 5 Einlagerungsfelder bilden eine Einlagerungsabteilung /PÖH 10/.

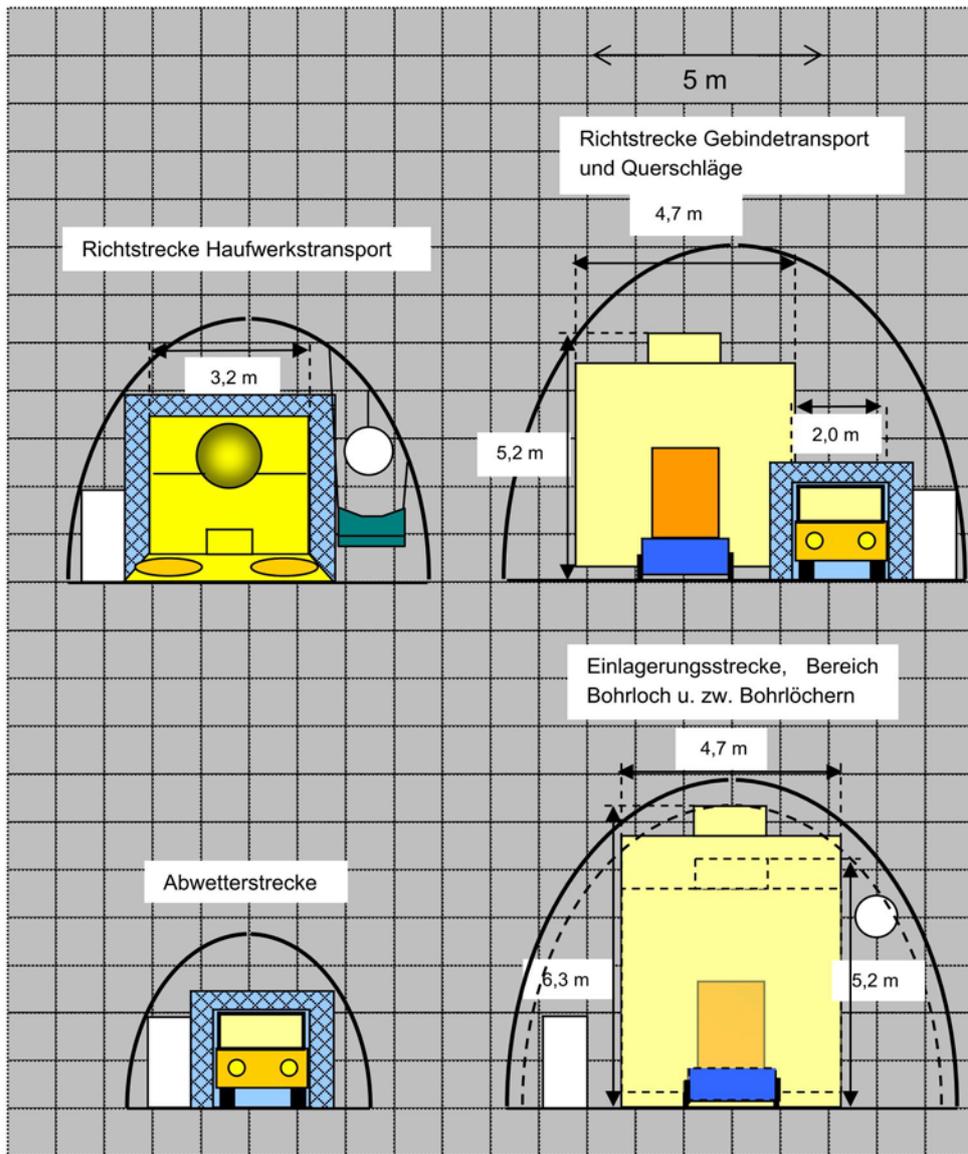
Endlagerlayout für eine Bohrlochlagerung in Tonstein in Deutschland /HER 16/

Die gelben Strecken in Abb. 3.3 stellt den Überwachungsbereich des Endlagers dar, in dem Auffahrung und Haufwerktransport stattfinden. Rote und blaue Strecken gehören zum Kontrollbereich, in denen die Einlagerung und der Gebindetransport stattfinden /PÖH 10/.

Der Querschnittsbedarf der verschiedenen Strecken ergibt sich aus den Abmessungen der jeweils größten eingesetzt Betriebsmittel (siehe Abb. 3.4) /PÖH 10/.

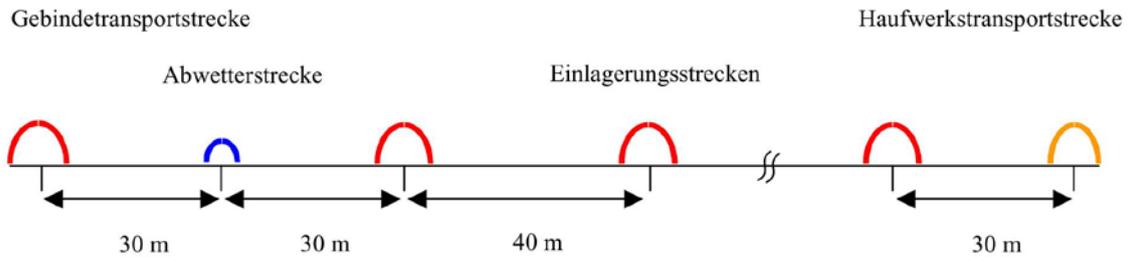
**Tab. 3.1** Streckenquerschnitte für die Bohrlochlagerung /PÖH 10/

<b>Strecke</b>	<b>Querschnitt</b>
Haufwerktransportstrecken	32 m <sup>2</sup>
Gebindettransportstrecken	52 m <sup>2</sup>
Abwetterstrecken	15m <sup>2</sup>
Querschläge	52 m <sup>2</sup>
Einlagerungsbereich (über Bohrloch für 10 m)	50 m <sup>2</sup>
Bereich zwischen Bohrlöchern:	42 m <sup>2</sup>



**Abb. 3.4** Querschnittsbedarf in Richtstrecken, Querschlägen strecken für die Bohrlochlagerung /PÖH 10/

Die Bohrlochabstände bei der Bohrlochlagerung betragen jeweils 46 m. Jedes Bohrloch enthält fünf BSK-2 Gebinde. Der Streckenmittenabstand beträgt 40 m. Grundlage dafür war der BSK-2 mit graphitisiertem Bentonit und heat spreader (Sand) sowie einer Zwischenlagerzeit von 30 Jahren /PÖH 10/. Weitere Abstände siehe Abb. 3.5.

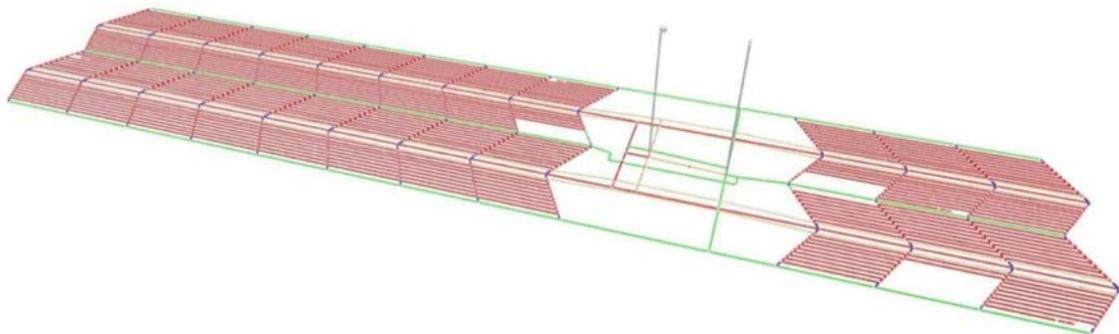


**Abb. 3.5** Abstände zwischen Richt- und Einlagerungsstrecken /PÖH 10/

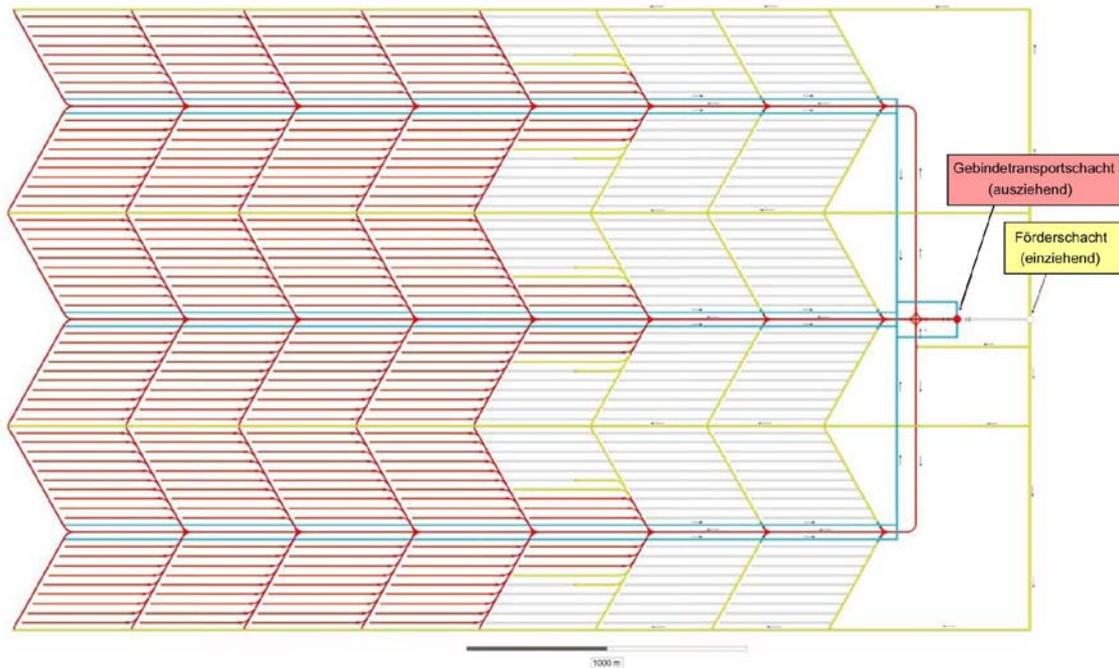
Damit ergibt sich ein Flächenbedarf von 3,79 km<sup>2</sup> für die Bohrlochlagerung von BSK-2 in Ton. Dazu kommt noch die Fläche für die Bohrlochlagerung von Abfällen aus der Wiederaufbereitung (CSD-V, CSD-B und CSD-C) i. H. v. 0,96 km<sup>2</sup>

### 3.1.2 Streckenlagerung

Das Grubengebäude ist ähnlich wie bei der Bohrlochlagerung aufgebaut. Die Einlagerungsstrecken sind kurzlebig zu halten und schnell zu verfüllen /HER 16/.



**Abb. 3.6** Endlagerlayout für eine Streckenlagerung in Tonstein in Deutschland /HER 16/



**Abb. 3.7** Grubengebäudezuschnitt für die Streckenlagerung von POLLUX-3BE /PÖH 10/

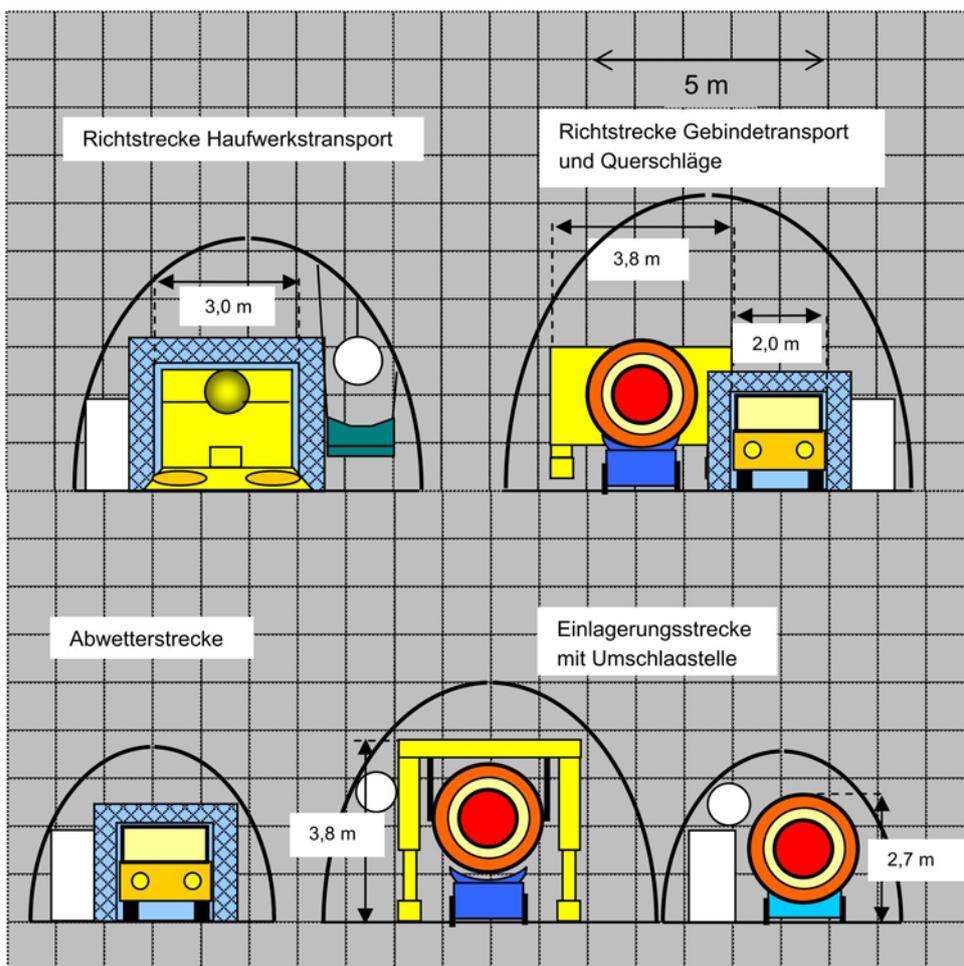
In Abb. 3.6 und Abb. 3.7 ist das Layout des Endlagers für die Streckenlagerung abgebildet. Insgesamt werden 401 Einlagerungsstrecken mit je 17 Supercontainern benötigt. Ein Einlagerungsfeld umfasst 9 bis 10 Einlagerungsstrecken. 7 Einlagerungsfelder bilden eine Einlagerungsabteilung /PÖH 10/.

Die gelben Strecken in Abb. 3.7 stellt den Überwachungsbereich des Endlagers dar, in dem Auffahrung und Haufwerktransport stattfinden. Rote und blaue Strecken gehören zum Kontrollbereich, in denen die Einlagerung und der Gebindettransport stattfinden /PÖH 10/.

Der Querschnittsbedarf der verschiedenen Strecken ergibt sich aus den Abmessungen der jeweils größten eingesetzt Betriebsmittel (siehe Abb. 3.8) /PÖH 10/.

**Tab. 3.2** Streckenquerschnitte für die Streckenlagerung /PÖH 10/

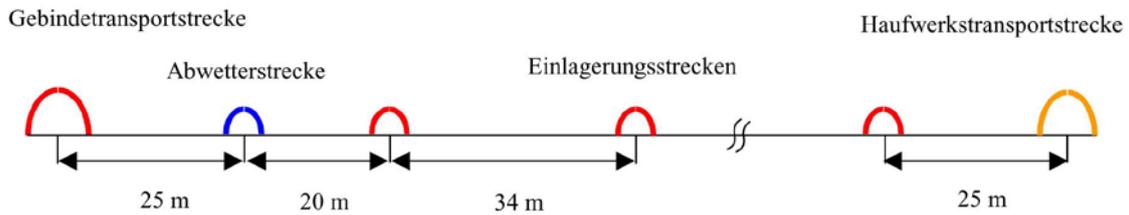
Strecke	Querschnitt
Haufwerktransportstrecken	30 m <sup>2</sup>
Gebindettransportstrecken	40 m <sup>2</sup>
Abwetterstrecken	15m <sup>2</sup>
Querschläge	40 m <sup>2</sup>
Einlagerungsbereich	14 m <sup>2</sup>
Übergabestellen	28 m <sup>2</sup>



**Abb. 3.8** Querschnittsbedarf in Richtstrecken, Querschlägen strecken für die Streckenlagerung /PÖH 10/

Die Behältermittenabstände bei der Streckenlagerung betragen streckenaxial 20,5 m. Der Streckenmittenabstand beträgt 34 m. Grundlage dafür war der POLLUX-3BE mit graphitisiertem Bentonit und heat spreader (Sand) sowie eine Zwischenlagerzeit von

20 Jahren. Abstände der Streckenenden der Einlagerungsstrecken zum Querschlag betragen 25 m /PÖH 10/. Siehe weitere Streckenabstände in Abb. 3.9.



**Abb. 3.9** Abstände zwischen Richt- und Einlagerungsstrecken /PÖH 10/

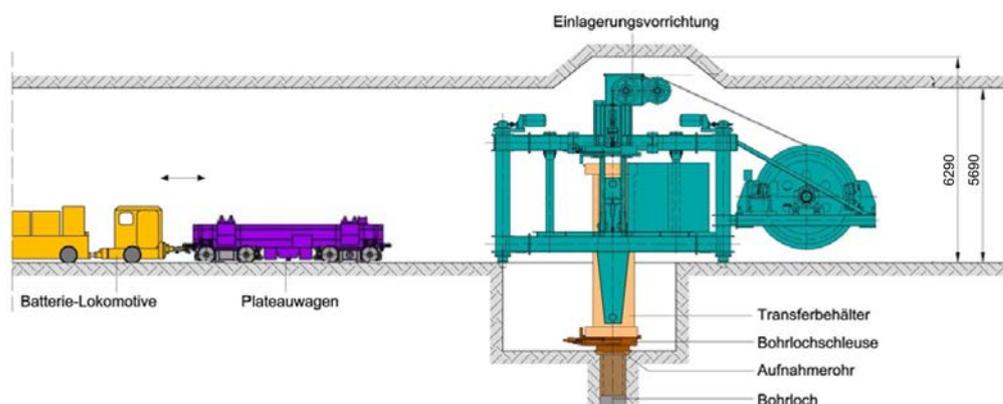
Damit ergibt sich ein Flächenbedarf von 6,92 km<sup>2</sup> für die Streckenlagerung von POLLUX-3BE in Ton.

### 3.2 Einlagerungssystem

Das Einlagerungssystem ist zu differenzieren zwischen Bohrlochlagerung und Streckenlagerung. Aufgrund der unterschiedlichen Behälter sind die benötigten Geräte und Einlagerungsschritte ebenfalls verschieden.

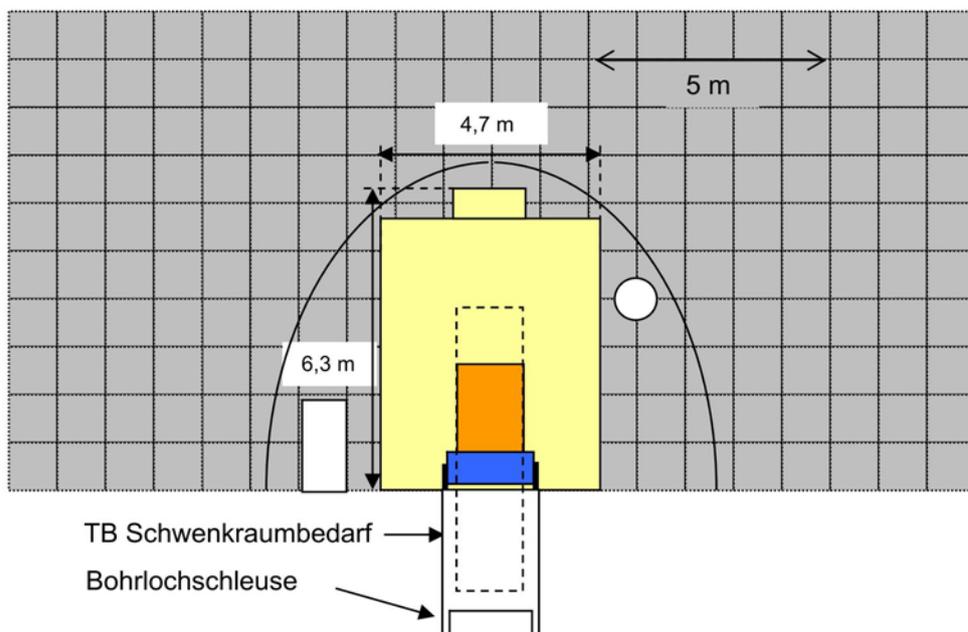
#### 3.2.1 Bohrlochlagerung

Zusammen mit der Entwicklung der Bohrlochlagerung für das Wirtsgestein Salz im Rahmen der VSG /FIS 13/ erfolgte die Entwicklung der Einlagerungstechnik für die Bohrlochlagerung (siehe Abb. 3.10).



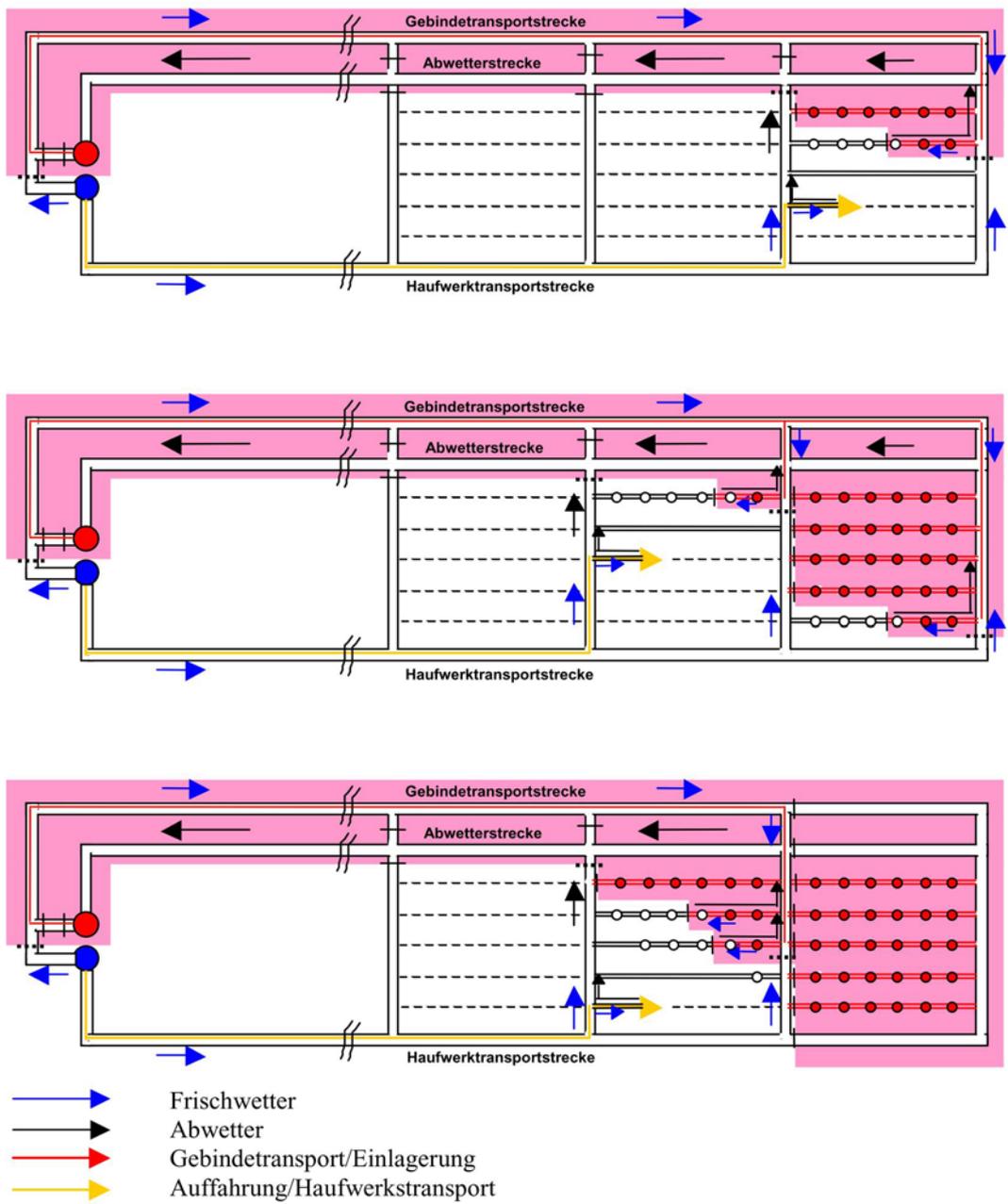
**Abb. 3.10** Komponenten für die Bohrlochlagerung von BSK 3 (Salzformation) /PÖH 10/

Die Abfallgebilde werden in einem Transferbehälter angeliefert und gehandhabt. Der Transport erfolgt in horizontaler Position. Die Transportbehälter werden bei Anlieferung auf einen schienengebundenen Plateauwagen umgeladen. Dieser kann direkt auf den Förderkorb der Schachtförderanlage geschoben werden. Die Schachtförderanlage transportiert den Plateauwagen mit dem Transferbehälter auf die Einlagerungssohle. Im Endlager erfolgt der Transport des Transferbehälters auf dem Plateauwagen, der unter Tage von einer batteriebetriebenen E-Lok geschoben wird. In der Einlagerungsstrecke wird der Transferbehälter von der Einlagerungsvorrichtung übernommen. Die Einlagerungsvorrichtung schwenkt den Transferbehälter über die Bohrlochschleuse. Der Schieber der Schleuse wird geöffnet und das Abfallgebilde wird in das Bohrloch herab gelassen /PÖH 10/ (siehe Abb. 3.11).



**Abb. 3.11** Einlagerungsvorrichtung und Transferbehälter für Salzformation /PÖH 10/

In Abb. 3.12 ist zu sehen, dass die Transportstrecken für Abfallgebilde und Haufwerk gleichzeitig als Zuwitterstrecken genutzt werden. Es gibt eine gemeinsame Abwetterstrecke. Außerdem ist in Abb. 3.14 die Aufteilung in Überwachungsbereich und Kontrollbereich (rosa Bereich) und die schrittweisen Ausbreitung des Kontrollbereichs zu sehen /PÖH 10/.

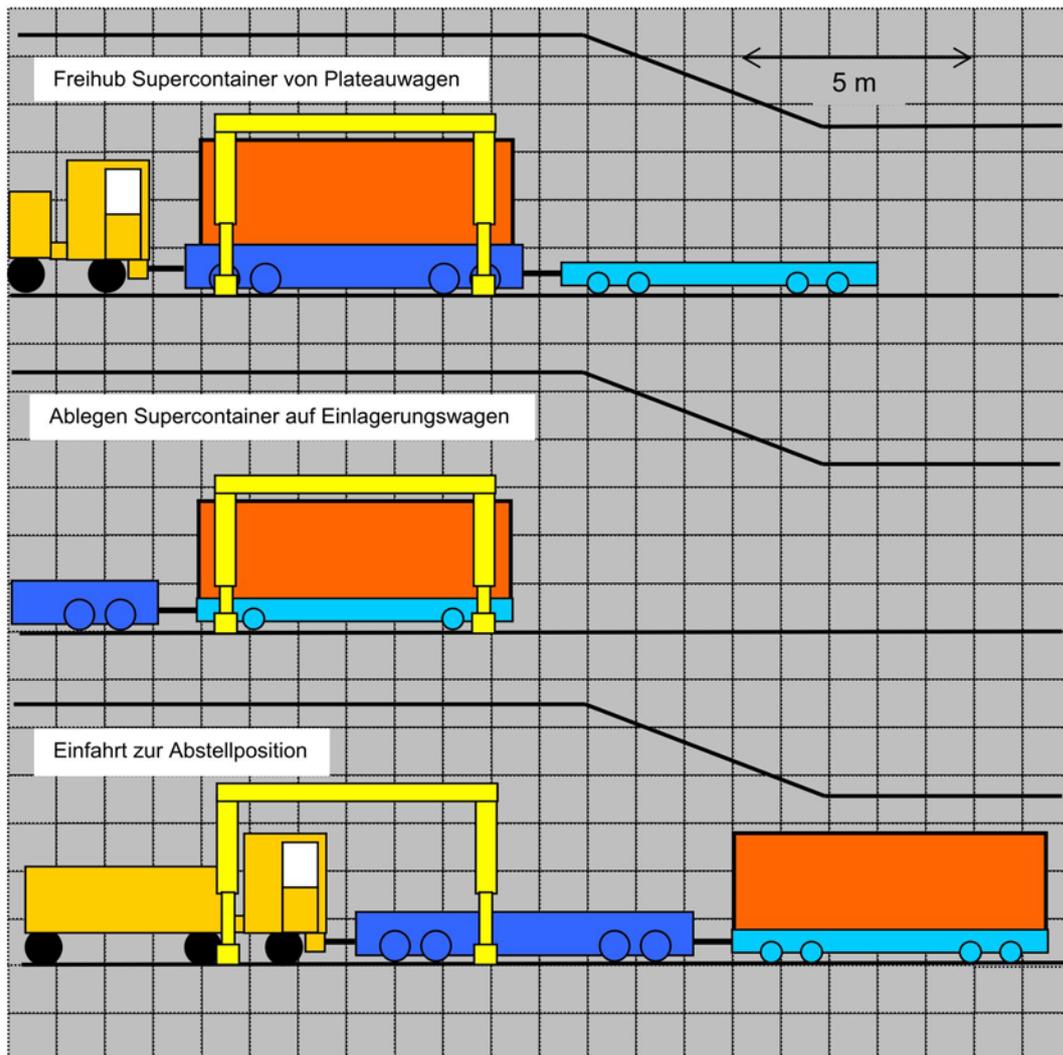


**Abb. 3.12** Schematische Darstellung des Endlagerlayouts für die Bohrlochlagerung in Ton /PÖH 10/

**3.2.2 Streckenlagerung**

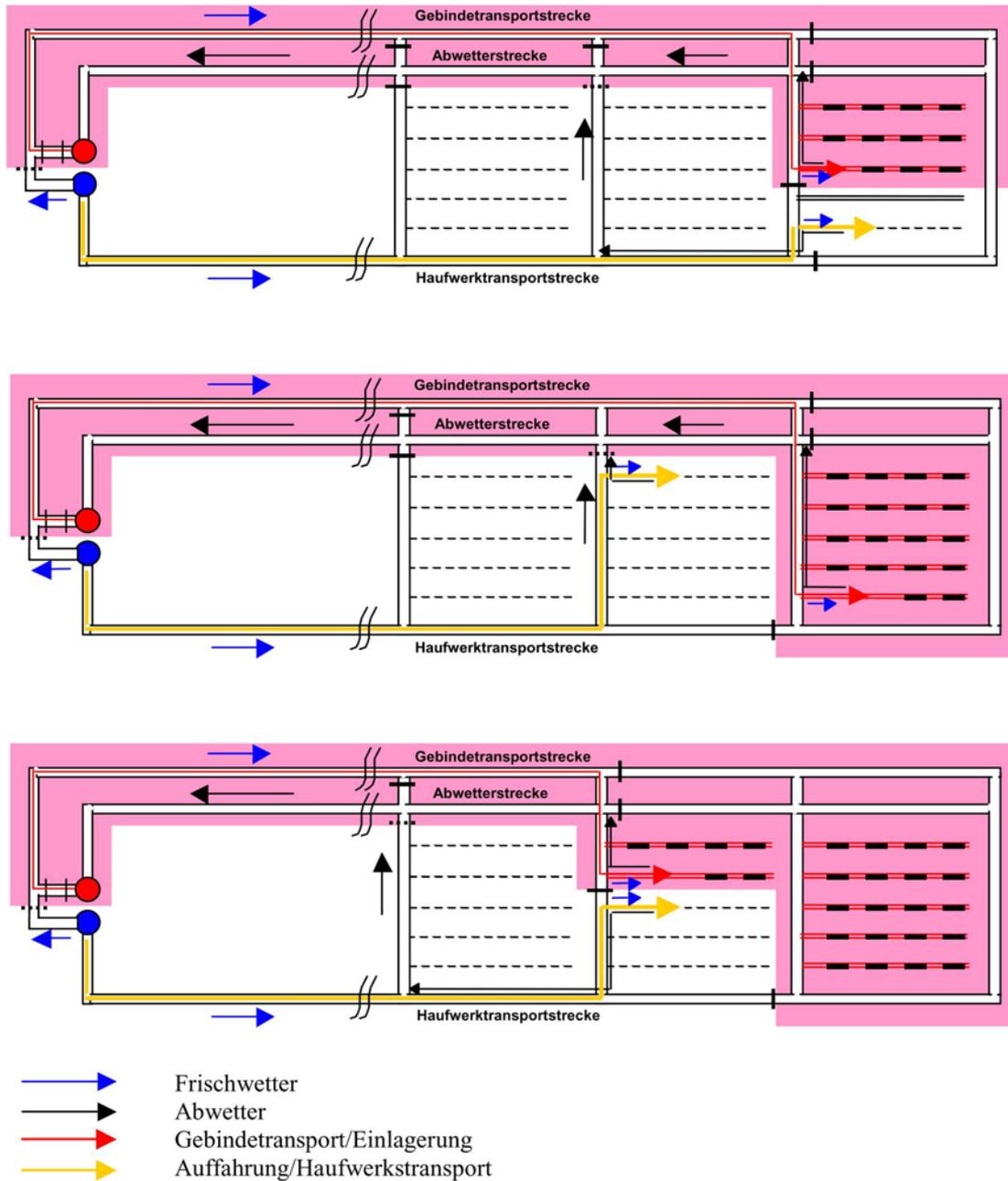
Der Transport und die Anlieferung des Abfallgebindes (Supercontainer) erfolgt in horizontaler Position. Das Abfallgebinde wird über Tage auf einen Plateauwagen umgeladen, welcher anschließend schienengebunden auf einen Förderkorb einer Schachtförderanlage geschoben wird. Die Schachtförderanlage transportiert den Plateauwagen mit dem Abfallgebinde bis auf die Einlagerungssohle. Im Füllort wird der Plateauwagen

durch eine batteriebetriebene E-Lok bis zur Einlagerungsstrecke befördert. Umladung am Eingang der Einlagerungsstrecke, durch ein temporär ortsfestes Hubportal auf einen verlorenen Einlagerungswagen (gleisgebunden). Die E-Lok schiebt den verlorenen Einlagerungswagen mit dem Supercontainer in die Einlagerungsstrecke bis zum finalen Lagerort /PÖH 10/. Siehe auch Abb. 3.13.



**Abb. 3.13** Darstellung Arbeitsstellungen des Hubportals mit Umladung Supercontainers /PÖH 10/

In Abb. 3.14 ist zu sehen, dass die Transportstrecken für Abfallgebände und Haufwerk gleichzeitig als Zuwitterstrecken genutzt werden. Es gibt eine gemeinsame Abwetterstrecke. Außerdem ist in Abb. 3.14 die Aufteilung in Überwachungsbereich und Kontrollbereich (rosa Bereich) und die schrittweisen Ausbreitung des Kontrollbereichs zu sehen /PÖH 10/.



**Abb. 3.14** Schematische Darstellung des Endlagerlayouts für die Streckenlagerung in Ton /PÖH 10/

### 3.3 Sicherheitskonzept

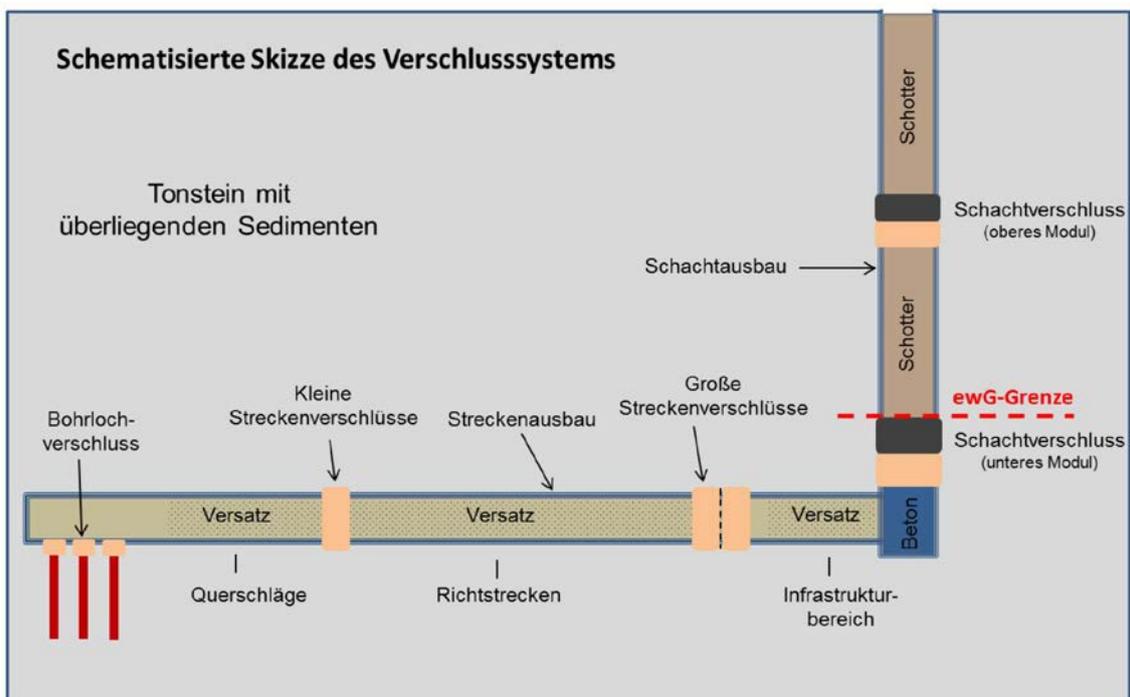
#### 3.3.1 Barrierenkonzept

#### Bohrlochlagerung

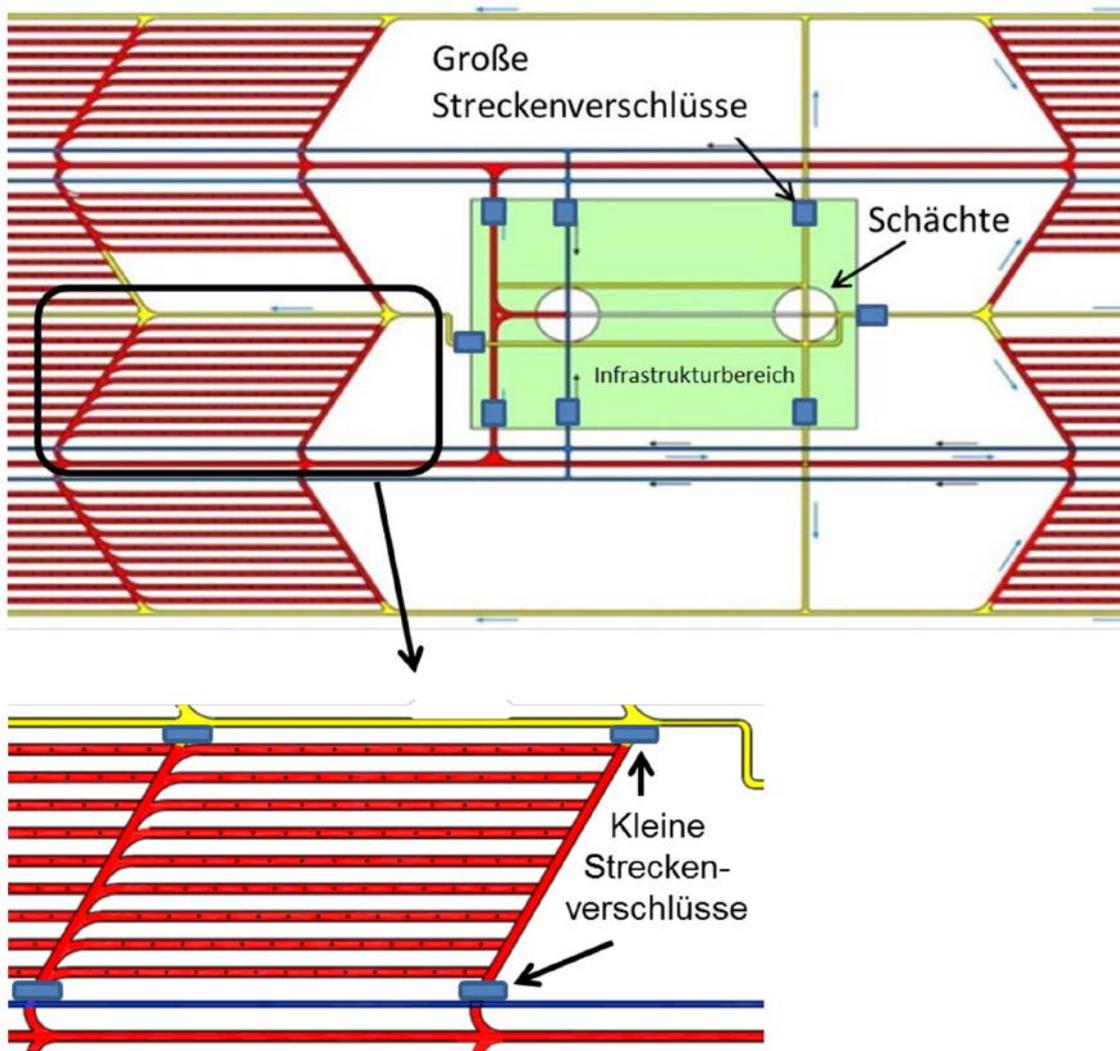
Im Rahmen des Projektes ANSICHT /LOM 15/ enthält das Endlagerkonzept für das

Wirtsgestein Tonstein für Bohrlochlagerung folgende Barrieren, die auch in Abb. 3.15 und Abb. 3.16 abgebildet sind:

- Geologische Barriere:
  - Tongestein
- Geotechnische Barrieren
  - Nahfeldsystem
    - Sandverfüllung, Innenliner, Buffer
  - Bohrlochverschlüsse der Einlagerungsbohrlöcher
  - Versatz in den Einlagerungsstrecken, Querschlägen und Richtstrecken
  - Kleine Streckenverschlüsse in den Querschlägen
  - Große Streckenverschlüsse in den Richtstrecken
  - Schachtverschlüsse

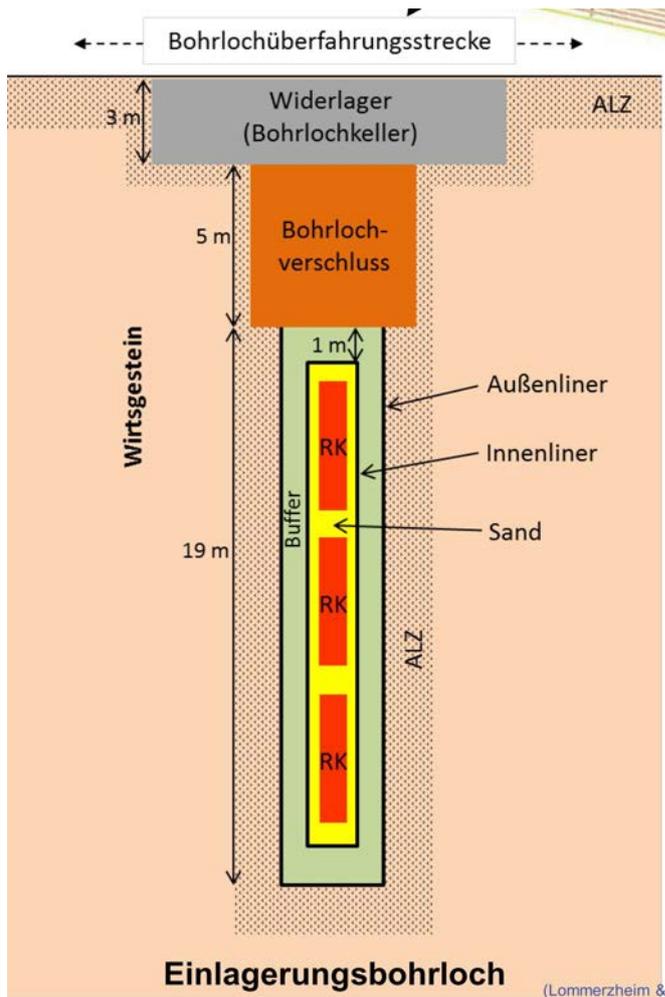


**Abb. 3.15** Schematisierte Prinzipskizze des Verschlusssystems für die Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Tonstein in Deutschland /LOM 15/



**Abb. 3.16** Lage der kleinen und großen Streckenverschlüsse im Grubengebäude /LOM 15/

Der Aufbau des Einlagerungsborloches ist Abb. 3.17 zu entnehmen.



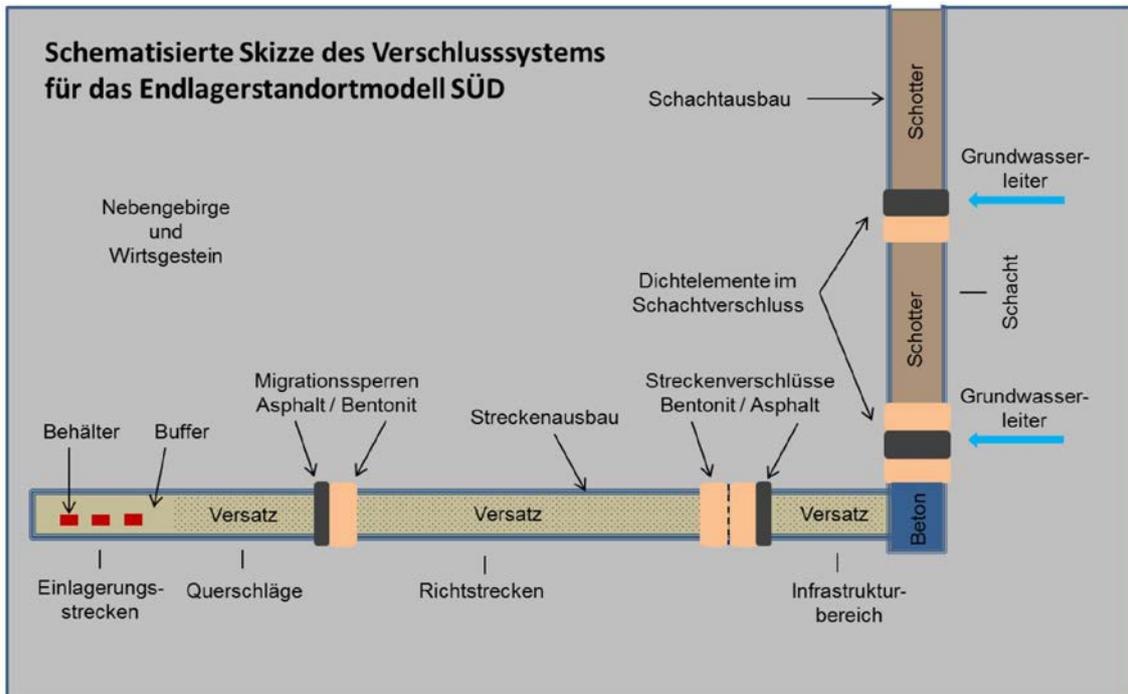
**Abb. 3.17** Barrierenaufbau für eine Bohrlöchlagerung in Tonstein in Deutschland /HER 16/

### Streckenlagerung

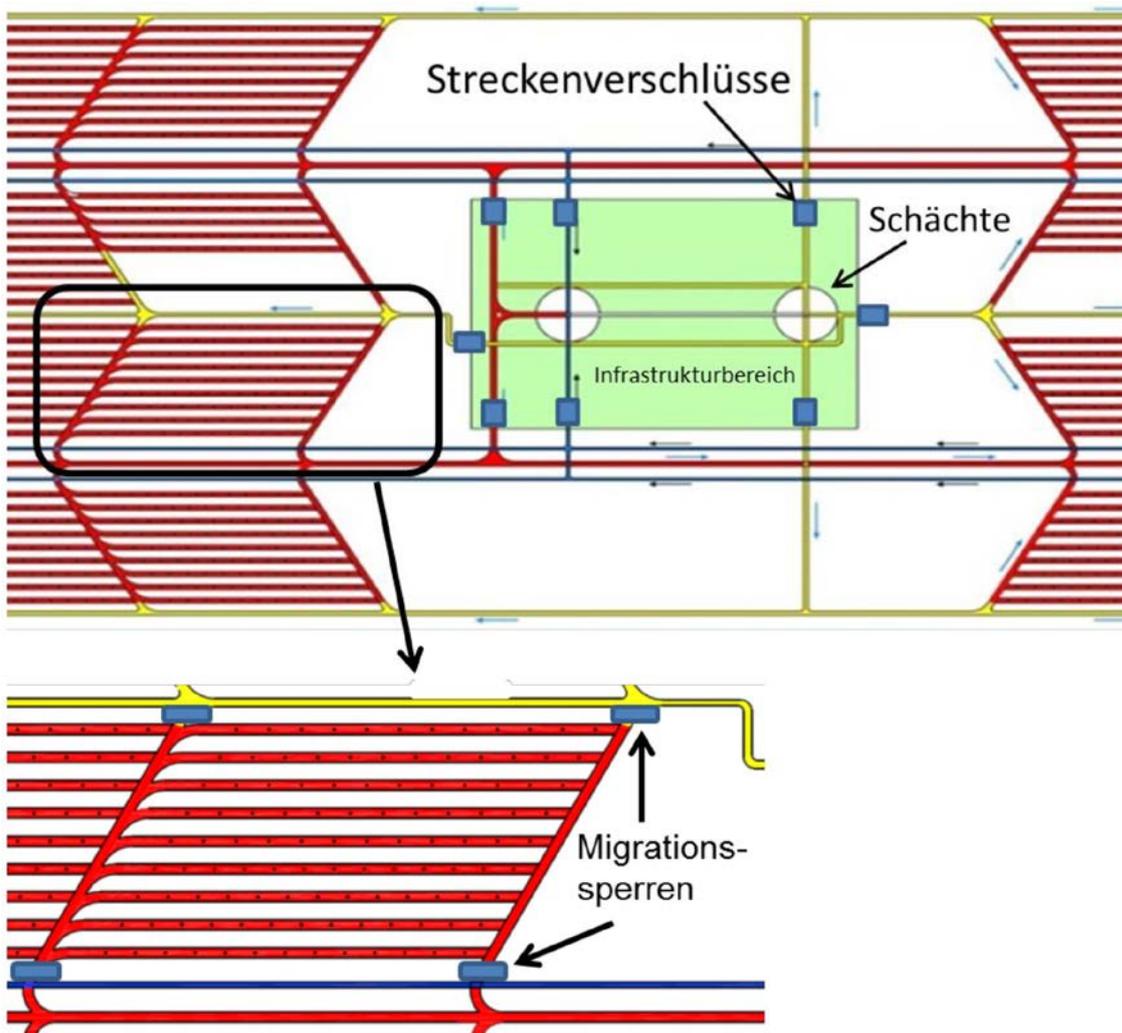
Im Rahmen des Projektes ANSICHT /JOB 15/ enthält das Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Tonstein in Streckenlagerung folgende Barrieren, die auch in Abb. 3.18 und Abb. 3.19 abgebildet sind:

- Geologische Barriere:
  - Wirtsgestein: Tonstein
- Geotechnische Barrieren:
  - Buffer in den Einlagerungsstrecken (quellfähiges Tonmaterial; Formteile und Granulat)
  - Versatz in den Querschlägen und Richtstrecken

- Migrationssperren in den Querschlägen
- Streckenverschlüsse in den Richtstrecken
- Schachtverschlüsse

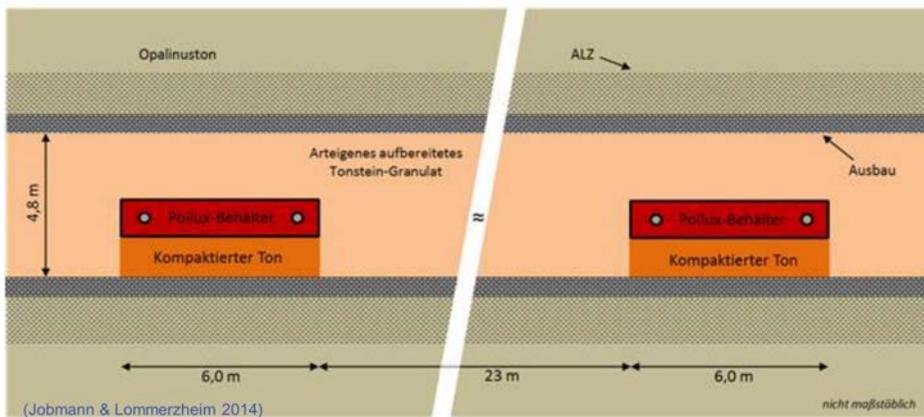
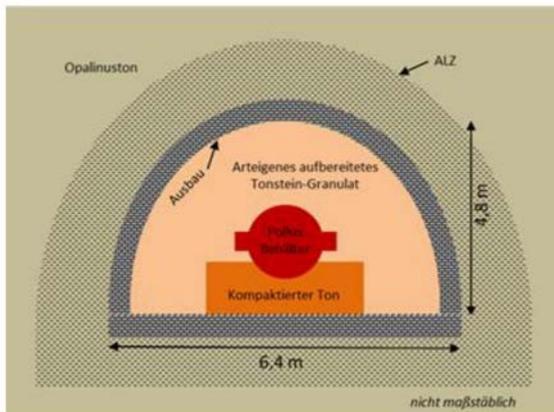


**Abb. 3.18** Schematisierte Prinzipskizze des Verschlusssystems für die Streckenlagerung im Wirtsgestein Tonstein in Deutschland /JOB 15/



**Abb. 3.19** Lage der Streckenverschlüsse und Migrationssperren im Grubengebäude /JOB 15/

Der Aufbau der Einlagerungskammern ist der Abb. 3.20 zu entnehmen. Der Endlagerbehälter wird auf kompaktierten Formelementen aus Bentonit in der Einlagerungsstrecke positioniert. Der restliche Hohlraum sowie die restlichen Strecken werden mit einem quellfähigem Tongemisch wie Bentonit verfüllt /JOB 15/.

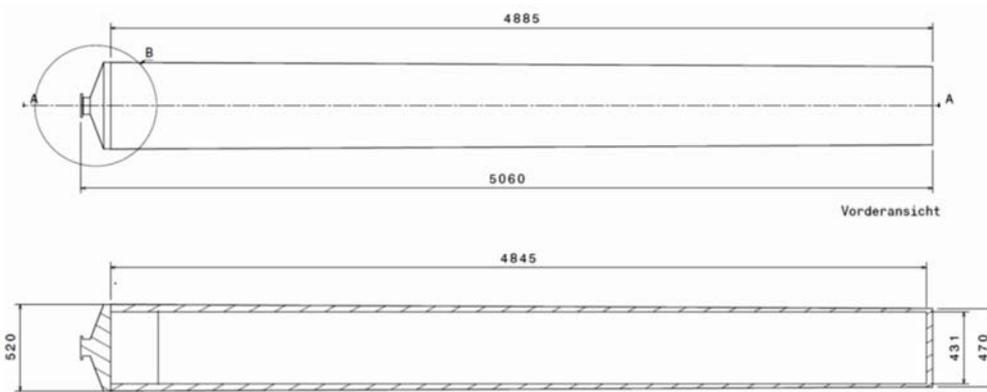


**Abb. 3.20** Aufbau der Einlagerungskammern für eine Streckenlagerung in Tonstein in Deutschland /HER 16/

### 3.3.1.1 Behälterkonzept

#### 3.3.1.1.1 Bohrlochlagerung

Nach /LOM 15/ werden rückholbare Kokillen (RK) verwendet. Die RK bestehen aus Feinkornbaustahl 15MnNi6.3 (Werkstoff 1.6210) und ist konische geformt, was die Rückholung erleichtern soll. Eine RK besitzt 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 einer RK beträgt 44,5 mm oben und 19,5 mm unten. Vor Verschluss mit dem Primärdeckel (verschraubt) und Sekundärdeckel (gasdicht verschweißt) wird eine 285 mm starke Platte aus Polyethylen bzw. Graphit als Neutronenabschirmung eingebracht /LOM 15/.

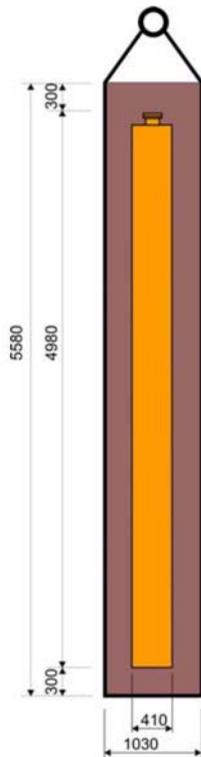


**Abb. 3.21** Abmessungen der Rückholbaren Bohrlochkokille (RK) /LOM 15/

Eine RK kann folgende unterschiedliche Beladungen erhalten /LOM 15/:

- 2 DWR-Brennelementen,
- 6 SWR-Brennelementen,
- 5 WWER-DWR- Brennelementen (in zwei Brennstabbüchsen aus Edelstahl 1.4541),
- 2 HAW-Kokillen (CSD-V),
- 3 Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen mit vernachlässigbarer Wärmeleistung (CSD-B oder CSD-C) oder
- kompaktierte Brennelement-Strukturteile

In /AME 04/ wurde die Brennstabkokille (BSK) für Ton mit einer 30 cm dicke Bentonitummantelung ausgestattet (siehe Abb. 3.22). In /LOM 15/ wird das Konzept von /AME 04/ aufgegriffen und adaptiert. Die Stärke der Betonitschicht um die RK wurde auf 1 m erhöht und in Form von Bentonitringen unabhängig vom Einlagerungsbehälter in das Bohrloch eingebracht. Siehe auch Abb. 3.17.



Masse: ca. 17 t

**Abb. 3.22** Bentonitummanteltes Endlagergebilde (BSK) /AME 04/

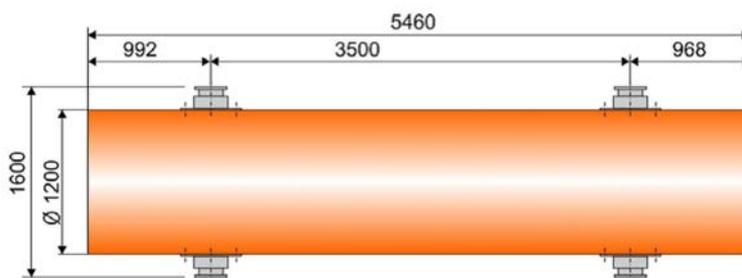
### 3.3.1.1.2 Streckenlagerung

In /JOB 15/ wird der POLLUX-Behälter genutzt, der ursprünglich für die Endlagerung im Wirtsgestein Salz ausgelegt wurde. Der POLLUX-Behälter besteht aus einem Außen- und einem Innenbehälter. Der Innenbehälter besteht aus Feinkornbaustahl (15MnNi6.3) mit einer Wandstärke von 160 mm und besitzt einen geschraubten Primärdeckel sowie einen verschweißten Sekundärdeckel. Der Außenbehälter dient der Abschirmung, besitzt keine Dichtigkeitsfunktion und weist eine Wandstärke von 270 mm auf. Das Material des Außenbehälters sowie des Außendeckels lautet Sphäroguss (GGG40, Werkstoff EN-GJS-400-15U (0.7040)). Die Wandung enthält Stäbe aus Polyethylen, die der Neutronenabschirmung dienen /JOB 15/.

Aufgrund der geringeren Auslegungstemperatur ist das Inventar des POLLUX für das Wirtsgestein Tonstein reduziert. Der POLLUX kann daher folgende Beladungen erhalten:

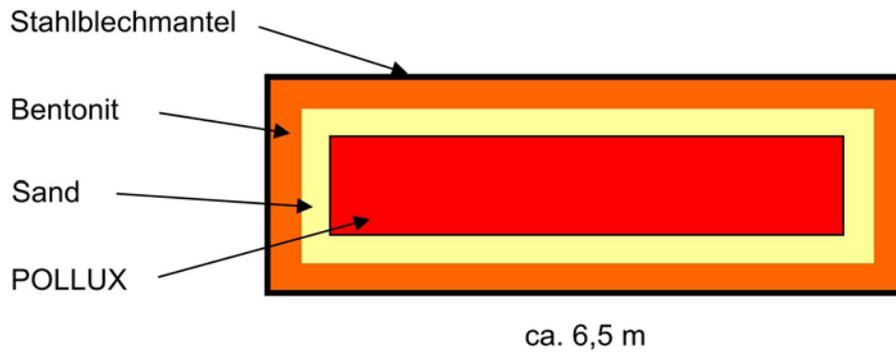
- POLLUX-3-BE
  - 3 DWR-Brennelemente
  - 9 SWR- Brennelemente
  - 7,5 WWER- Brennelemente
- POLLUX-3-CSD-V
  - 3 HAW-Kokillen aus der Wiederaufarbeitung
- POLLUX-9
  - 9 Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen mit vernachlässigbarer Wärmeleistung
- MOSAIK
  - kompaktierte Brennelement-Strukturteile

Der POLLUX-3-BE besitzt eine Länge von 5.460 mm und einen Durchmesser von 1.200 mm. Die Masse beträgt ca. 38 t. Siehe auch Abb. 3.23.



**Abb. 3.23** Abmessungen des POLLUX-3-BE /JOB 15/

Der POLLUX-3 soll in einem Supercontainer eingelagert werden. Der Supercontainer besteht aus Stahlblech und neben dem POLLUX-Behälter enthält er eine Sandschicht (heat spreader) und eine Bentonitschicht. Siehe auch Abb. 3.24. Der Supercontainer hat eine Masse von 86 t /BOL 14/.



**Abb. 3.24** Supercontainer mit POLLUX-Behälter, Bentonit und Sand (heat spreader) /PÖH 10/

### 3.4 Co-Disposal

Co-Disposal, also die Einlagerung von wärmeentwickelnden und nicht wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in einem Endlager, wird für die Konzepte in Ton bisher nicht betrachtet.

### 3.5 Rückholbarkeit

#### Bohrlochlagerung

Der erste Schritt ist die Wiederauffahrung der Richtstrecken, Querschläge und Überfahrungsstrecken bzw. Einlagerungsstrecken mit konventioneller Technik. Anschließend muss eine Kühlung installiert werden um im Grubengebäude die von der /BMJV 83/ vorgegebene Effektivtemperatur von maximal 30 °C zu erreichen. Die Wiederaufgefahrenen Strecken müssen mit entsprechenden Ausbauvarianten gesichert werden /BOL 14/.

Nach Freilegung der Bohrlöcher wird die Bohrlochschleuse installiert und die Einlagerungsmaschine über dem Bohrloch positioniert. Anschließend wird der Bohrlochversatz (Sand) mit einer Absaugung entfernt. Anschließend können die Kokillen mit den gleichen Komponenten wie bei der Einlagerung herausgezogen werden. D. h. die Kokille wird in einen Transferbehälter gezogen. Der Transferbehälter wird danach in eine waagerechte Position umgelegt und dabei auf einem Plateauwagen abgesetzt. Dieser wird anschließend nach über Tage transportiert.

### **Streckenlagerung**

Es ist vorgesehen vorwiegend die gleichen Komponenten bei der Rückholung zu verwenden wie bei der Einlagerung. Zunächst werden Richtstrecken, Querschläge und Überfahrungsstrecken wieder aufgefahren. Um die Wiederauffahrung zu erleichtern sind bei der Erstauffahrung der Strecken leicht überschneidbare Ausbauvarianten einzusetzen. Anschließend muss eine Kühlung installiert werden um im Grubengebäude die von der /BMJV 83/ vorgegebene Effektivtemperatur von maximal 30 °C zu erreichen /BOL 14/.

Weiterhin ist geplant den Supercontainer auf dem Einlagerungswagen mit einer Lok bis zum Anfang des Einlagerungsfeldes transportieren zu können. Dort wird der Supercontainer mithilfe eines Hubportals auf einen Plateauwagen umgeladen. Der Plateauwagen wird anschließend mitsamt des Supercontainers in den Förderkorb gefahren und nach über Tage transportiert /BOL 14/.

### **3.6 Monitoring**

Zum Monitoring wurden bisher weder im Projekt ANSICHT /LOM 15/, /JOB 15/ noch im Projekt ERATO /PÖH 10/ spezifische Angaben gemacht.

## **4 Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Kristallin in Deutschland**

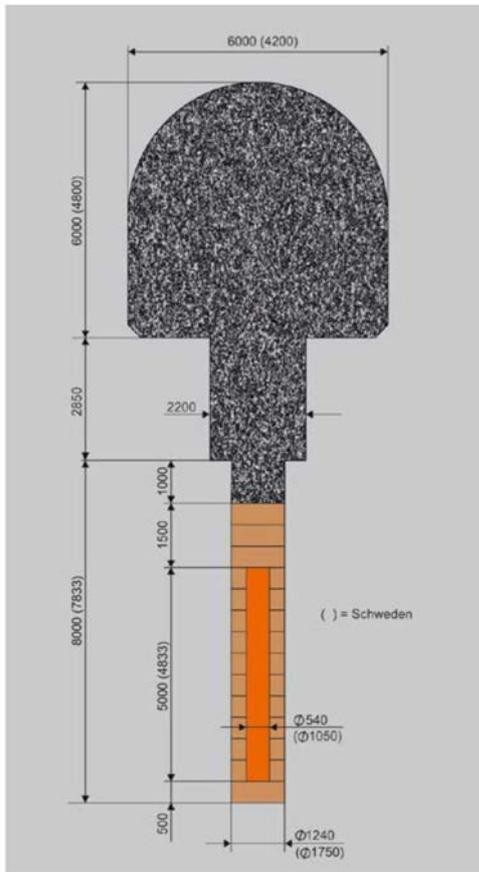
In der Endlagerforschung in Deutschland wurde eine Endlagerung im Kristallin bisher eher nachrangig betrachtet. Daher existiert bisher kein ausgereiftes technisches Endlagerkonzept für kristallines Gestein. Konzeptionelle Ansätze für ein Endlager im Kristallin, die auf dem skandinavischen KBS 3-Konzept basieren, wurden im Forschungsvorhaben GEISHA /PAP 99/ und in der Machbarkeitsstudie CHRISTA /JOB 16/ aufgestellt.

In einer Studie zum Flächenbedarf von Endlagern in verschiedenen Wirtsgesteinen /DBE 16/ wird für das Wirtsgestein Kristallin eine Teufe von 600 m angenommen. Außerdem wurden insgesamt eine Abfallgebindeanzahl mit 14.785 angegeben /DBE 16/.

### **4.1 Endlager-Layout**

Ein Layout war bisher nicht Teil der Planung. Jedoch wurden in /DBE 16/ thermische Berechnungen durchgeführt und dabei einige geometrische Maße des Endlagers ermittelt. Die Abstände zwischen den vertikalen Bohrlöchern liegen bei 4,4 bis 6,0 m und zwischen den Strecken bei 21 m. In

Abb. 4.1 ist die Bohrlochtiefe mit 8 m angegeben in das jeweils ein BSK-Cu Gebinde eingelagert wird. Der Flächenbedarf liegt bei ca. 3,56 km<sup>2</sup> /DBE 16/.



**Abb. 4.1** Einlagerungsschema von Endlagergebinden in vertikalen Kurzbohrlöchern in Granit /DBE 16/

## 4.2 Einlagerungssystem

Zum Einlagerungssystem wurde bisher lediglich angenommen, dass eine gleisgebundene Einlagerungstechnik zum Einsatz kommen soll /DBE 16/.

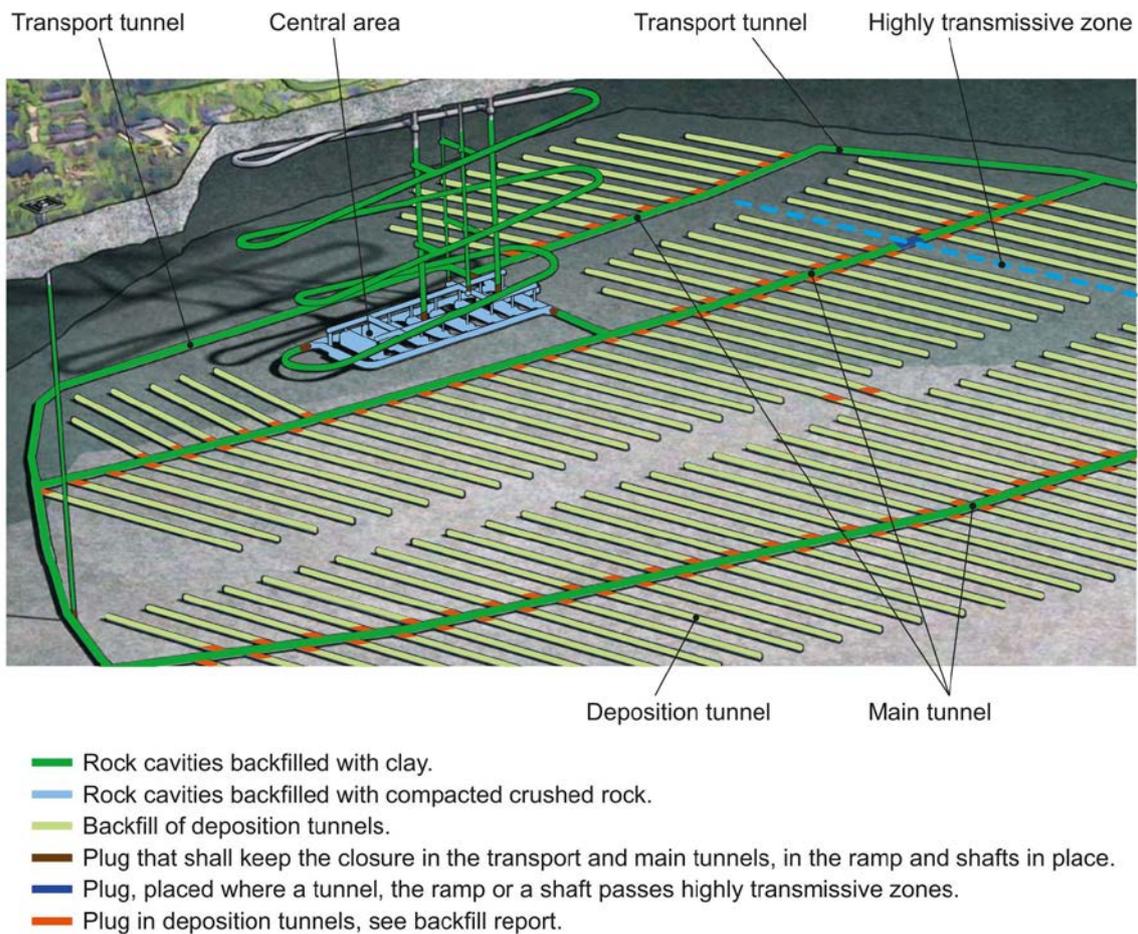
## 4.3 Sicherheitskonzept

### 4.3.1 Barrierenkonzept

Die Barrieren im Wirtsgestein Kristallin werden vom schwedischen/finnischen KSB-3-Konzept übernommen. In Abb. 4.2 ist das schwedische/finnische Endlagerlayout mit den geotechnischen Barrieren des Verfüll- und Verschlusskonzeptes dargestellt. Die Barrieren lauten /JOB 16/:

- Abfallgebinde

- Buffer (Bentonitringe und -Pellets)
- Bentonitversatz der Einlagerungsstrecken (Bentonitblöcke, -Platten und -Pellets)
- Geotechnische Verschlussbauwerke an den Einlagerungsstrecken (Plugs)
- Versatz der Transport- und Zugangsstrecken mit Materialien auf Tonbasis
- Geotechnische Verschlussbauwerke an den Schächten und Rampen
- Versatz der Schächte und Rampen mit Materialien auf Tonbasis (ab und unterhalb 200 m Teufe)
- Geotechnische Verschlussbauwerke an den hochtransmissiven Zonen

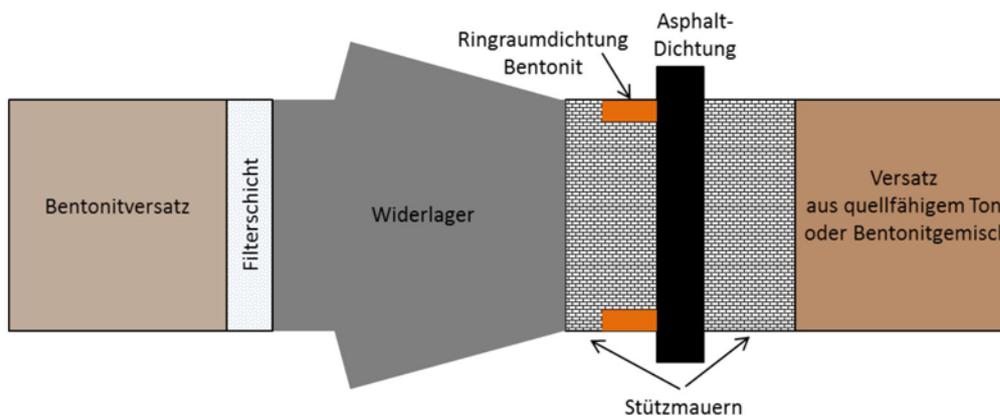


**Abb. 4.2** Verfüll- und Verschlusskonzept mit Versatz und Verschlussbauwerken im schwedischen Endlagerkonzept /SKB 10/

Für die Einlagerungsstrecken ist Bentonit als Versatz vorgesehen. Für den Versatz für die Zugangs- und Transportstrecken sowie die unteren Bereiche der Rampe und der

Schächte stehen verschiedene Bentonit- und Tongemische zur Auswahl. Der Bentonit- bzw. Tongemisch-Versatz wird eingebracht um die Kanalisierung von Wässern zu verhindern. Der Versatz des Zentralteils erfolgt mit zerkleinertem Ausbruchmaterial, welches zur mechanischen Stabilisierung eingebracht wird /JOB 16/. Das BSK-Cu Gebinde wird von Bentonitringen mit einer Stärke von 35 cm umgeben /DBE 16/.

Die Einlagerungsstrecken, die hochtransmissiven Zonen sowie die Rampen und Schächte werden mit Verschlussbauwerken abgedichtet. Die Verschlussbauwerke bestehen neben Bentonitversatz, Filterschichten, Widerlager und quellfähigem Ton bzw. Bentonitgemischen auch aus einer Asphaltichtung (siehe Abb. 4.3) /JOB 16/.



**Abb. 4.3** Konzeptvorschlag für Abdichtbauwerk im Wirtsgestein Kristallin /JOB 16/

#### 4.3.1.1 Behälterkonzept

Für das Wirtsgestein Kristallin wurde das Behälterdesign des skandinavischen Konzeptes betrachtet. Da das Behälterdesign dem BSK-3-Konzept für die Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Salz sehr ähnelt wurde das Konzept mit Modifikationen übernommen. Die Modifikation umfasst hauptsächlich, dass die Kokille mit einer 5 cm dicken Kupferschicht ummantelt wird. Der Behälter wird als BSK-Cu bezeichnet /DBE 16/.

Die BSK-Cu werden in vertikalen Bohrlöchern eingelagert und sollen für die Abfallformen CSD-V, CSD-B, CSD-C, WWER-BE, DWR- und SWR-BE genutzt werden können. Andere Abfälle aus THTR/AVR, KNK und MTR2 (BER II-BE) sowie MTR2 (FRM II-BE) werden in CASTOREN in Streckenlagerung in den Einlagerungsstrecken eingelagert, von denen die Bohrlöcher abgehen /DBE 16/.

Die BSK-Cu Behälter können bis zu 5,04 m lang sein. Der Durchmesser beträgt 0,54 m. Der Behälter besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von 15 W/kg/K /DBE 16/.

#### **4.4 Co-Disposal**

Co-Disposal, also die Einlagerung von wärmeentwickelnden und nicht wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in einem Endlager wurde im Rahmen der konzeptionellen Ansätze aus den Projekten GEISHA /PAP 99/ und CHRISTA /JOB 16/ bisher nicht betrachtet.

#### **4.5 Rückholbarkeit**

Im Rahmen der Konzeptionelle Ansätze aus den Projekten GEISHA /PAP 99/ und CHRISTA /JOB 16/ wurden bisher keine Angaben dazu getätigt wie Rückholung im Wirtsgestein Kristallin umgesetzt werden soll.

#### **4.6 Monitoring**

Im Rahmen der Konzeptionelle Ansätze aus den Projekten GEISHA /PAP 99/ und CHRISTA /JOB 16/ wurden bisher keine Angaben dazu getätigt wie Monitoring im Wirtsgestein Kristallin umgesetzt werden soll.

## **5 Anforderungen an die Endlager- und Behälterkonzepte**

In diesem Kapitel werden die Grundanforderungen genannt, die an Endlager- und Behälterkonzepte zu stellen sind. Dabei ist zunächst zwischen den grundsätzlichen Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle /BMU 10/, die in Deutschland verbindlich für alle Wirtsgesteine sind und weiteren Anforderungen, die spezifisch für bestimmte Wirtsgesteine bzw. Endlagerkonzepte sind, zu unterscheiden.

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ wurden bereits in Kapitel 2 erwähnt. Darüber hinaus werden im Folgenden spezifisch für die Wirtsgesteine Ton und Kristallin weitere Anforderungen gegeben.

### **5.1 Ton/Tonstein**

Ein Bergwerk im Wirtsgestein Tonstein bedingt hinsichtlich der bau- und geotechnischen Stabilität einen Ausbau der Strecken. Der Aufwand für den Ausbau kann im Wirtsgestein Tonstein sehr unterschiedlich ausfallen und ist u. a. von der Teufe abhängig. Nach dem deutschen Konzept für Tonstein erfolgt der Ausbau mit Anker und Spritzbeton oder zusätzlich mit Stahlbögen (Kombiausbau) /PÖH 10/.

Bei Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle in Tonformationen ist der Wärmeeintrag ins Wirtsgestein zu limitieren. International werden Maximaltemperaturen von ca. 100 °C in Tonformationen verwendet. Im deutschen Konzept gelten ebenfalls maximal 100 °C für den Bentonitversatz bzw. für die Bentonitformteile in den Einlagerungsstrecken bzw. in den Einlagerungsbohrlöchern.

Die Bewetterung in einem Endlagerbergwerk ist so auszulegen, dass die Bedingungen des Wirtsgesteins nicht negativ verändert werden. Insbesondere ist dabei auf den Feuchtigkeitseintrag in das Wirtsgestein bzw. auf eine Trocknung des Wirtsgesteins unter Tage zu achten. Beides kann zu Veränderungen der Eigenschaften des Wirtsgesteins führen.

### **Rückholung**

Die Betriebszeit für ein Endlager im Wirtsgestein Tonstein wird nach dem deutschen Konzept bisher mit ca. 65 Jahre inklusive Stilllegungsphase angesetzt. Damit ergibt sich eine Mindestanforderung für die Abfallgebinde, dass sie mindestens 565 Jahre

(ca. 65 Jahre Rückholbarkeit während der Betriebsphase + 500 Jahre Bergbarkeit nach Verschluss) Handhabbar sein müssen. Verändert sich die Betriebszeit eines Endlagers, so hat dies auch Auswirkung auf die Handhabbarkeitsanforderung an das Abfallgebirge.

Es sind weiterhin Maschinen vorzuhalten, mit denen die Rückholung und Bergung von Abfallgebirgen durchgeführt werden kann. Im deutschen Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Tonstein ist geplant, dass für die Wiederauffahrung konventionelle Technik zum Einsatz kommen soll. Um die Wiederauffahrung zu erleichtern sind bei der Erstauffahrung der Strecken leicht überschneidbare Ausbauvarianten zu favorisieren. Zudem sollen für die Rückholung möglichst die gleichen Komponenten wie bei der Einlagerung zum Einsatz kommen.

Ferner sind bei der Rückholung gleichermaßen wie auch bei der Einlagerung die maximalen Temperaturen aus dem Bergrecht einzuhalten. Je nach Einlagerungsfortschritt kann eine Kühlung der Strecken notwendig sein, bevor Arbeiter die Rückholung bzw. Bergung in den Strecken ausführen dürfen.

## **5.2 Kristallin**

Da es sich bisher nur um einen konzeptionellen Ansatz handelt und eine Vielzahl von Aspekten für diesen konzeptionellen Ansatz vom schwedischen/finnischen Endlagerkonzept übernommen wurde sind dementsprechend auch die gleichen Anforderungen wie an das schwedische/finnische Konzept abzuleiten. Dazu zählen:

Ein Bergwerk bzw. ein Endlager in kristallinem Gestein, welches nicht stark zerklüftet ist, kann i. d. R. ohne zusätzlichen Ausbau des Grubengebäudes betrieben werden. Auch im schwedischen/finnischen Endlagerkonzept im Wirtsgestein Granit ist ein Ausbau nur bei Bedarf vorgesehen.

Bei der Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen in kristallines Wirtsgestein ist der Wärmeeintrag in den Buffer, der aus Bentonit besteht, zu beachten. Im schwedischen/finnischen Konzept wird für die Behälteroberfläche eine Maximaltemperatur von 100°C angegeben.

## **Rückholung**

Eine Betriebszeit eines Endlagers kann bisher nicht genau angegeben werden. Grund dafür ist, dass die Betriebszeit eines Endlagers von vielen Faktoren abhängig ist. Da aber noch kein umfängliches Konzept für Kristallin vorliegt, kann eine Betriebszeit nur abgeschätzt werden. Die deutschen Konzepte für Salz geben eine Betriebszeit von ca. 40 Jahren an. In Tonstein setzt das deutsche Konzept bisher ca. 65 Jahre inklusive Stilllegungsphase an. Damit ergibt sich eine Mindestanforderung für die Abfallgebinde, dass sie mindestens 565 Jahre (ca. 65 Jahre Rückholbarkeit während der Betriebsphase + 500 Jahre Bergbarkeit nach Verschluss) handhabbar sein müssen. Verändert sich die Betriebszeit eines Endlagers, so hat dies auch Auswirkung auf die Handhabbarkeitsanforderung an das Abfallgebinde.

Für die Rückholung und Bergung sind Konzepte aufzustellen. Zudem sind die benötigten Komponenten vorzuhalten, die im Rahmen einer Rückholung bzw. Bergung benötigt werden.

Weiterhin sind bei der Rückholung und Bergung gleichermaßen wie auch bei der Einlagerung die maximalen Temperaturen aus dem Bergrecht einzuhalten. Je nach Einlagerungsfortschritt kann eine Kühlung der Strecken notwendig sein, bevor Arbeiter die Rückholung bzw. Bergung in den Strecken ausführen dürfen.

## Literaturverzeichnis

- /AME 04/ Amelung, P., Biurrun, E., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Müller-Hoeppe, N., Ziegenhagen, J.: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (02 E 9511), Abschlussbericht Hauptband. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Nukleare Entsorgung (FZK-INE), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Stephan Schmidt KG, 235 S.: Peine, 12.2004.
- /BMJV 83/ Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung - KlimaBergV), zuletzt geändert 9. Juni 1983 (BGBl. I 1983 S. 685).
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /BOL 14/ Bollingerfehr, W., Herold, P., Dörr, S., Filbert, W.: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-21-2013-AB, 142 S.: Peine, 2014.
- /DBE 16/ DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Gutachten Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 58, 92 S., 2016.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, P.-J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, 424 S., ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.

- /HER 16/ Herold, P.: Technische Konzepte zur Rückholung (von Behältern aus einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente). In: Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA) (Hrsg.): Fachtagung. Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.-02. November 2016: Braunschweig, 2016.
- /JOB 15/ Jobmann, M., Lommerzheim, A.: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-26-2015-TB, 63 S.: Peine, 3. August 2015.
- /JOB 16/ Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A., Wolf, J.: Projekt CHRISTA: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-20-2016-AB, 20. Oktober 2016.
- /JOB 17/ Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübél, A., Stark, L., Ziefle, G.: Projekt ANSICHT, Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland, Synthesebericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-19-2016-AB, 30. März 2017.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. 684 S., 2016.

- /LAN 66/ Allgemeine Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen im Oberbergamtsbezirk Clausthal-Zellerfeld (ABVO), in der Fassung vom 2. Februar 1966 (Nds. MBl. Nr. 15/1966 S. 337).
- /LOM 15/ Lommerzheim, A., Jobmann, M.: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-14-2015-TB, 40 S.: Peine, 28. Mai 2015.
- /PAP 99/ Papp, R.: GEISHA, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Hrsg.: Projektträgerschaft des BMBF für Entsorgung (PTE), Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Wissenschaftliche Berichte, FZKA-PTE Nr. 3, 200 S.: Karlsruhe, Mai 1999.
- /PÖH 10/ Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H. J., Filbert, W., Tholen, M.: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein, ERATO, Abschlussbericht. Hrsg.: DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-28-2008-AB, 320 S.: Peine, Juni 2010.
- /SKB 10/ Svensk Kärnbränslehantering AB: Design, production and initial state of the closure. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-17, 44 S., Dezember 2010.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Schematische Darstellung des Kombi-Ausbaus /PÖH 10/ .....	6
Abb. 3.2	Endlagerlayout Ton Deutschland Bohrlochlagerung /HER 16/ .....	7
Abb. 3.3	Grubengebäudezuschnitt für die Bohrlochlagerung von BSK 2 /PÖH 10/.....	7
Abb. 3.4	Querschnittsbedarf in Richtstrecken, Querschlägen strecken für die Bohrlochlagerung /PÖH 10/ .....	9
Abb. 3.5	Abstände zwischen Richt- und Einlagerungsstrecken /PÖH 10/ .....	10
Abb. 3.6	Endlagerlayout für eine Streckenlagerung in Tonstein in Deutschland /HER 16/.....	10
Abb. 3.7	Grubengebäudezuschnitt für die Streckenlagerung von POLLUX- 3BE /PÖH 10/ .....	11
Abb. 3.8	Querschnittsbedarf in Richtstrecken, Querschlägen strecken für die Streckenlagerung /PÖH 10/ .....	12
Abb. 3.9	Abstände zwischen Richt- und Einlagerungsstrecken /PÖH 10/ .....	13
Abb. 3.10	Komponenten für die Bohrlochlagerung von BSK 3 (Salzformation) /PÖH 10/.....	13
Abb. 3.11	Einlagerungsvorrichtung und Transferbehälter für Salzformation /PÖH 10/.....	14
Abb. 3.12	Schematische Darstellung des Endlagerlayouts für die Bohrlochlagerung in Ton /PÖH 10/ .....	15
Abb. 3.13	Darstellung Arbeitsstellungen des Hubportals mit Umladung Supercontainers /PÖH 10/ .....	16
Abb. 3.14	Schematische Darstellung des Endlagerlayouts für die Streckenlagerung in Ton /PÖH 10/ .....	17
Abb. 3.15	Schematisierte Prinzipskizze des Verschlusssystems für die Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Tonstein in Deutschland /LOM 15/ .....	18
Abb. 3.16	Lage der kleinen und großen Streckenverschlüsse im Grubengebäude /LOM 15/ .....	19
Abb. 3.17	Barrierenaufbau für eine Bohrlochlagerung in Tonstein in Deutschland /HER 16/ .....	20

Abb. 3.18	Schematisierte Prinzipskizze des Verschlusssystems für die Streckenlagerung im Wirtsgestein Tonstein in Deutschland /JOB 15/.....	21
Abb. 3.19	Lage der Streckenverschlüsse und Migrationssperren im Grubengebäude /JOB 15/ .....	22
Abb. 3.20	Aufbau der Einlagerungskammern für eine Streckenlagerung in Tonstein in Deutschland /HER 16/ .....	23
Abb. 3.21	Abmessungen der Rückholbaren Bohrlochkokille (RK) /LOM 15/ .....	24
Abb. 3.22	Bentonitummanteltes Endlagergebäude (BSK) /AME 04/.....	25
Abb. 3.23	Abmessungen des POLLUX-3-BE /JOB 15/ .....	26
Abb. 3.24	Supercontainer mit POLLUX-Behälter, Bentonit und Sand (heat spreader) /PÖH 10/.....	27
Abb. 4.1	Einlagerungsschema von Endlagergebänden in vertikalen Kurzbohrlöchern in Granit /DBE 16/ .....	30
Abb. 4.2	Verfüll- und Verschlusskonzept mit Versatz und Verschlussbauwerken im schwedischen Endlagerkonzept /SKB 10/.....	31
Abb. 4.3	Konzeptvorschlag für Abdichtbauwerk im Wirtsgestein Kristallin /JOB 16/ .....	32

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 3.1	Streckenquerschnitte für die Bohrlochlagerung /PÖH 10/ .....	8
Tab. 3.2	Streckenquerschnitte für die Streckenlagerung /PÖH 10/ .....	12

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)

**ISBN 978-3-946607-54-0**