

## **Endlagerkonzept im Tonstein (Schweiz)**

**Bericht zum Arbeitspaket 1**

### **Anhang 1**

Anforderungen an aktuelle  
Endlagerkonzepte  
für unterschiedliche  
Wirtsgesteinsformationen



## Endlagerkonzept im Tonstein (Schweiz)

### Bericht zum Arbeitspaket 1

#### Anhang 1

Anforderungen an aktuelle  
Endlagerkonzepte  
für unterschiedliche  
Wirtsgesteinsformationen

Torben Weyand

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**

Endlagerkonzept, Co-Disposal, Rückholbarkeit, Schweiz, Tonstein

## 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 befasst sich mit dem Endlagerkonzept der Schweiz im Opalinuston. In der Schweiz wird derzeit ein Standort für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle im Rahmen eines dem in Deutschland ähnelnden Standortauswahlverfahrens gesucht. Es sollen verglaste Abfälle und abgebrannte Brennelemente eingelagert werden. Ferner wird die Option offengehalten am selben Standort in zwei untertägig räumlich voneinander getrennten Lagern auch schwach- und mittel radioaktive Abfälle einzulagern (Co-Disposal). Die Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle erfolgt in Stahlbehältern, die auf verdichteten Bentonitblöcken (Bentonitauflagern) in horizontalen Einlagerungstollen eingelagert werden. Die Einlagerungstollen werden anschließend mit Bentonit verfüllt und abschließend versiegelt. Die Infrastrukturbereiche der untertägigen Anlage werden in einer sogenannten Beobachtungsphase für mehrere Jahrzehnte offengehalten. Hierdurch wird eine vereinfachte Rückholung ermöglicht, die gesetzlich bis zum endgültigen Verschluss des gesamten Endlagers gesetzlich vorgeschrieben ist. Eine Überwachung (Monitoring) findet in einem sogenannten Pilotlager statt. Hierbei handelt es sich um einen vom Hauptlager räumlich und hydraulisch getrennten Lagerteil, der für das Hauptlager repräsentativ ausgelegt wird und in dem Messinstrumente installiert werden. Im Pilotlager ablaufende Prozesse bilden eine Grundlage für die Entscheidung über den Verschluss des Endlagers und auch über eine mögliche Rückholung der hoch radioaktiven Abfälle aus dem Hauptlager.

# Inhaltsverzeichnis

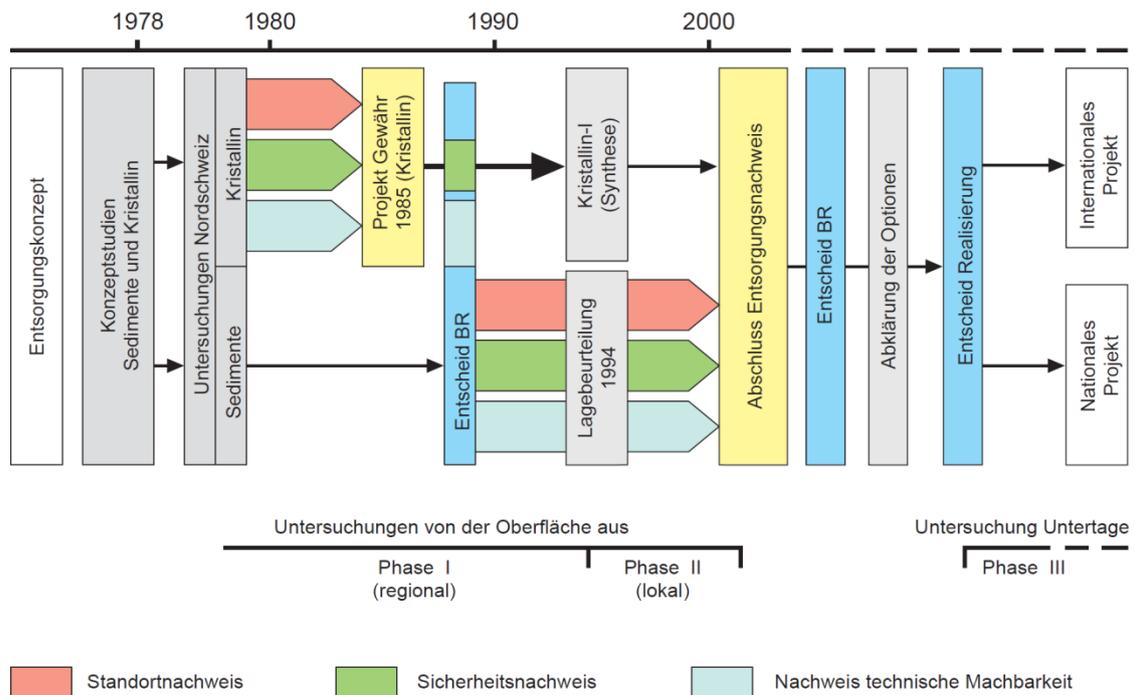
	<b>Kurzfassung.....</b>	<b>I</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Endlagerkonzept und -design.....</b>	<b>9</b>
2.1	Abfallinventar und -charakterisierung.....	13
2.2	Behälterkonzept.....	15
2.3	Untertägige Anlage .....	19
2.3.1	Hauptzugangsbauwerk .....	20
2.3.2	Nebenzugangsbauwerke (Schächte) .....	24
2.3.3	Zentralbereich.....	25
2.3.4	Hauptlager (BE/HAA).....	27
2.3.5	Pilotlager (Monitoring).....	32
2.3.6	Testlager (Felslabor).....	33
2.3.7	Lagerbereich (LMA) .....	34
2.3.8	Haupttunnel .....	35
2.4	Obertägige Anlage.....	35
2.4.1	Verpackungsanlagen .....	38
2.4.2	Betriebsabfallbehandlungsanlage .....	41
2.4.3	Aufbereitungsanlage für Verfüll- und Versiegelungsmaterialien .....	42
2.4.4	BE-Transportbehälter-Innenreinigungsanlage.....	42
2.4.5	Service- und Administrationseinrichtungen .....	42
2.5	Strahlenschutz zonen .....	43
2.6	Bewetterungskonzept .....	45
2.7	Ver- und Entsorgungskonzept (Wasser, Energie) .....	50
2.8	Co-Disposal .....	54
2.9	Rückholbarkeit.....	57

<b>3</b>	<b>Anforderungen an ein Endlagerkonzept .....</b>	<b>62</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>65</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>75</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>79</b>

# 1 Einleitung

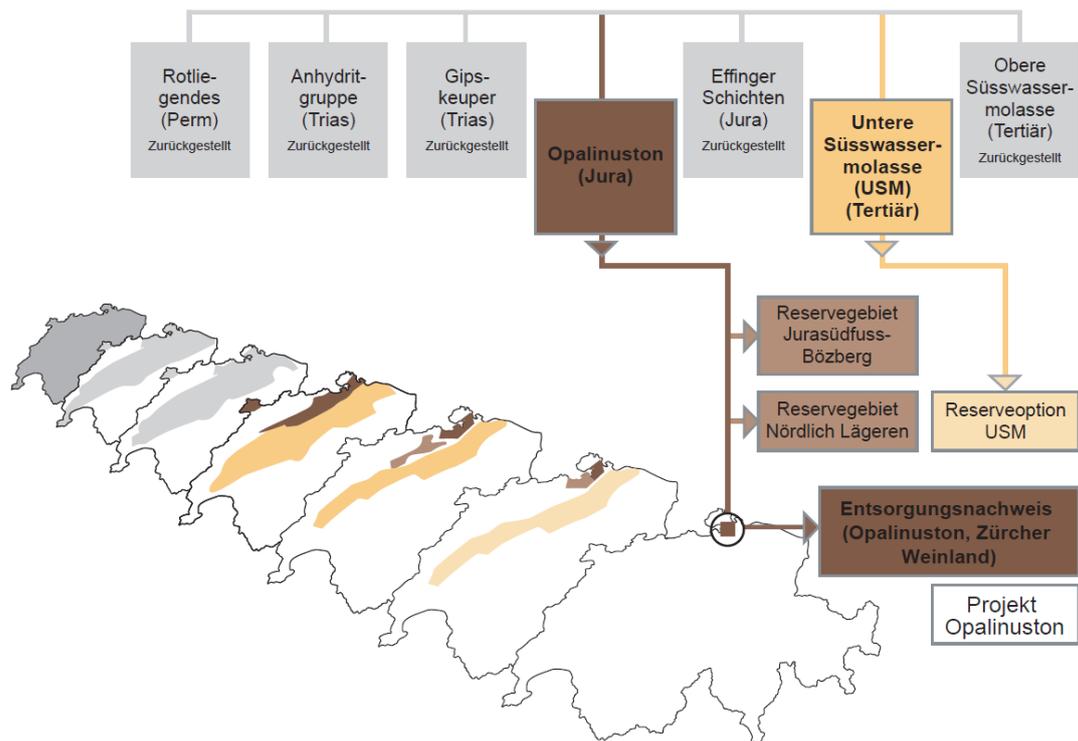
Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen wird in der Schweiz durch das **Kernenergiegesetz** (KEG) /KEG 03/ und die **Kernenergieverordnung** (KEV) /KEV 04/ geregelt. Die Schweiz setzt wie Deutschland auf das Konzept der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in einem Bergwerk mit der Möglichkeit einer Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zum Verschluss des Endlagers. Die Ziele und Vorgaben für die Lagerung der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen wurden in einem sog. Sachplanverfahren verbindlich festgelegt /KEV 04/. Hierzu gehören auch die Anforderungen und Auslegungsgrundsätze für ein Standortauswahlverfahren /BFE 08/, /ENSI 09a/, das auf dem Konzept des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) basiert /AKE 02/.

Für **hochaktive Abfälle** (HAA) (äquivalent zum Begriff „hoch radioaktive Abfälle“) wurde in der Schweiz ab dem Jahr 1985 zunächst die Option der Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin verfolgt und das Felslabor Grimsel errichtet (Abb. 1.1). Die guten felsmechanischen Eigenschaften von Kristallingesteinen sollten den Bau und Betrieb des Endlagers erleichtern und für die großräumigen, ungestörten Gesteinsformationen im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz wurde eine geringe Wasserbewegung angenommen. Im Jahr 1988 beurteilte der Bundesrat der Schweiz auf Basis der Ergebnisse des Projektes Gewähr der **Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle** (NAGRA) den Standortnachweis als nicht ausreichend, da nicht genügend ausgedehnte Kristallinvorkommen mit den erforderlichen Eigenschaften vorhanden seien und entschied auch nichtkristalline Wirtsgesteine näher zu untersuchen /BFE 08/.



**Abb. 1.1** Zeitliche Entwicklung zur Realisierung eines Endlagers in der Schweiz /NAG 03/

Ab dem Jahr 1995 wurden daher auch Sedimentgesteine als potentielle Wirtsgesteine untersucht: Rotliegendes (Perm), Gipskeuper (Trias), Opalinuston (Jura), Effinger Schichten (Jura), Unter- und obere Süßwassermolasse (Tertiär). Ab 1996 wurde im Opalinuston das Felslabor Mont Terri errichtet und der Opalinuston als potentielles Wirtsgestein für hoch radioaktive Abfälle in einer Endlagertiefe von 500 m bis 700 m ausgewählt, wo dieser eine Mächtigkeit von 110 – 120 m aufweist und dieser im Vergleich zu den anderen Sedimentgesteinen die besten sicherheitsgerichteten Vorteile erzielte /BFE 08/. Falls kein geeigneter Standort im Opalinuston gefunden wird, dient die untere Süßwassermolasse als Reserveoption (Abb. 1.2). Im sogenannten Entsorgungsnachweises wurde gezeigt, dass sich der Opalinuston als Wirtsgestein zur grundsätzlichen Machbarkeit eines Endlagers in tiefengeologischen Formationen in der Schweiz nach dem KEG eignet /BFE 08/. Der Flächenbedarf wird auf ca. 2 km<sup>2</sup> geschätzt.



**Abb. 1.2** Verlauf der Untersuchungen zur Auswahl des Wirtsgesteins Opalinuston /NAG 03/

Bei dem Standortauswahlverfahren der Schweiz handelt es sich um ein mehrstufiges Verfahren, das in drei Etappen gliedert ist:

- Etappe 1: Auswahl von geologischen Standortgebieten je für HAA und SMA<sup>1</sup>
- Etappe 2: Auswahl von mindestens zwei Standorten je für HAA und SMA
- Etappe 3: Standortwahl und Rahmenbewilligungsverfahren für SMA und HAA

In der ersten Etappe wurden geologische Standortgebiete jeweils für ein Endlager für HAA und SMA ausgewählt. Ein geologisches Standortgebiet ist als geologischer Gesteinskörper im Untergrund definiert, der für die Lagerung von radioaktiven Abfällen geeignet ist /BFE 08/. Eine Gemeinde, unter der innerhalb der Gemeindegrenzen ein geologisches Standortgebiet ganz oder teilweise liegt, gilt als Standortgemeinde. Die Auswahl der geologischen Standortgebiete wurde anhand Kriterien zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit beurteilt (Abb. 1.3) unter Berücksichtigung des vorgesehenen Abfallinventars und der vorläufigen Auslegung der technischen Barrieren.

<sup>1</sup> Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)

Es ist insbesondere für die geologischen Standortgebiete darzulegen, ob eine Endlagerung von HAA und SMA grundsätzlich möglich ist.

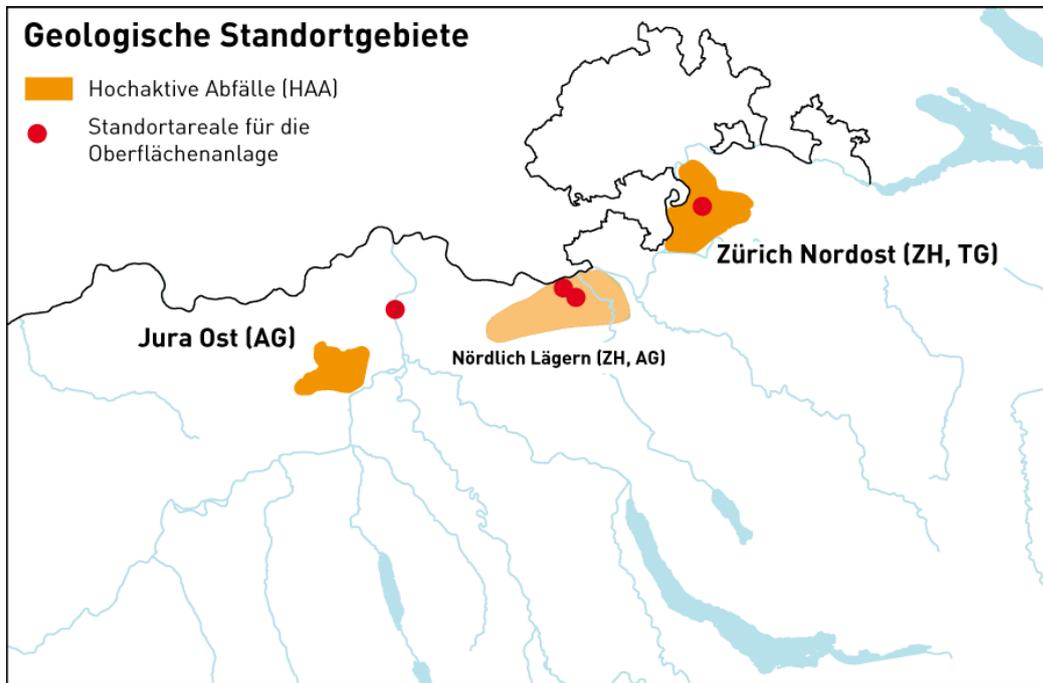
Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2. Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4. Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

**Abb. 1.3** Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und bautechnischer Machbarkeit /BFE 08/

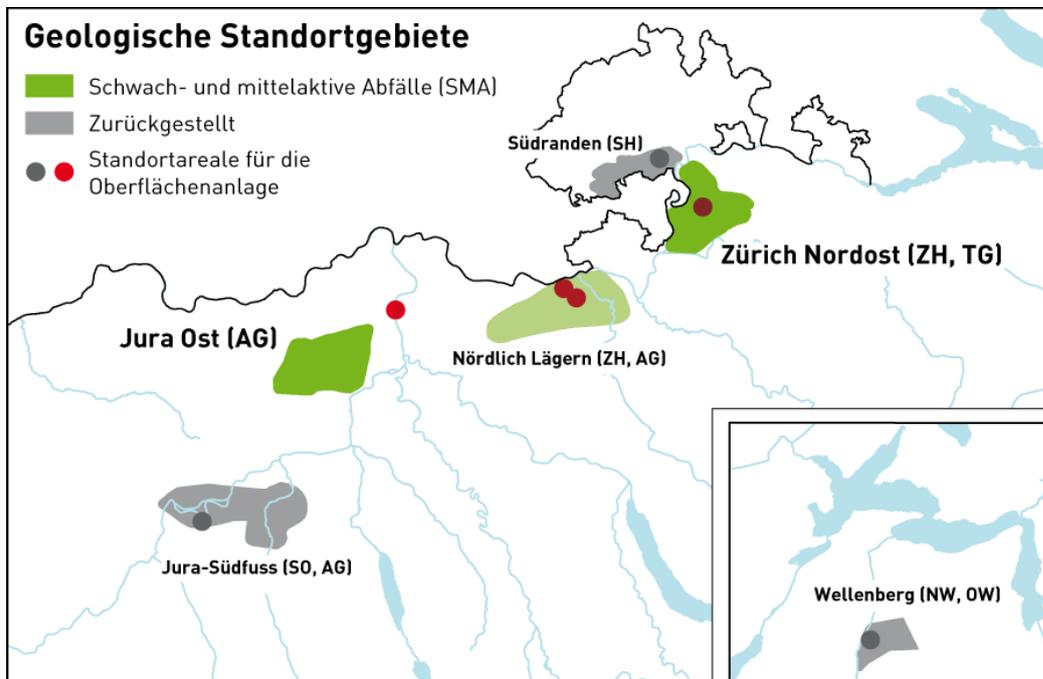
Für die in der ersten Etappe ausgewählten geologischen Standortgebiete werden in der zweiten Etappe in Bezug auf die Standortregion abgestimmt auf die bautechnische Machbarkeit Vorschläge zur Anordnung und Ausgestaltung der unter- und obertägigen Anlage entwickelt. Ferner werden quantitative provisorische Sicherheitsanalysen durchgeführt, die sich auf die Langzeitsicherheit nach Verschluss des Endlagers beziehen. Diese sollen das Rückhaltevermögen der Radionuklide durch die geologischen und technischen Barrieren aufzeigen und darlegen inwiefern das Dosis-Schutzziel von 0,1 mSv nach /HSK 93/ erfüllt wird. Abschließend sollen nur Standortvorschläge erfolgen, die sicherheitstechnisch nicht eindeutig als weniger geeignet bewertet wurden. Zur Bewertung der Eignung eines Standortes aus sicherheitstechnischen Gründen wurde in /BFE 08/ ein standardisiertes Verfahren erarbeitet und festgelegt.

In /ENSI 17/ wurden die aus den provisorischen Sicherheitsanalysen resultierenden Standortvorschläge von /ZUI 14/ bewertet und empfohlen die drei geologischen Standortgebiete Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost (Abb. 1.4, Abb. 1.5) in der dritten Etappe weiter zu untersuchen. Für diese drei geologischen Standortgebiete wurden spezifische Erkundungsprogramme für die dritte Etappe entwickelt /NAG 16a/, /NAG 14a/. In allen drei Standortgebieten besteht die Möglichkeit das SMA- und HAA-Lager am selben Standort anzuordnen und ein sogenanntes Kombilager zu errichten.

Aus den drei Standortregionen soll am Ende der dritten Etappe ein konkreter Standort ausgewählt und die Entscheidung über ein mögliches Kombilager beschlossen werden.



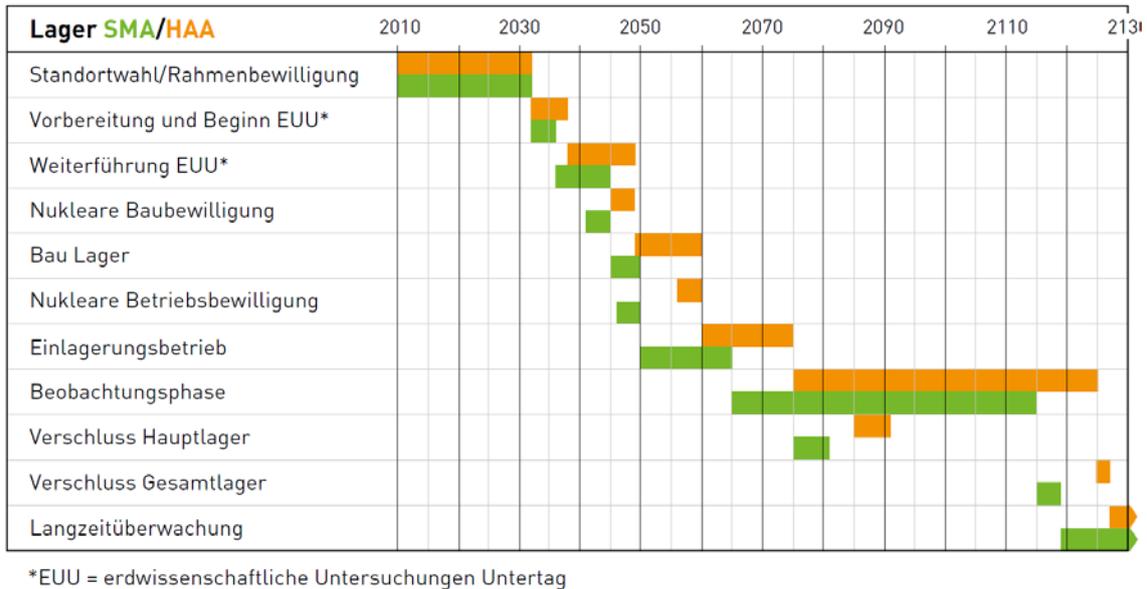
**Abb. 1.4** Geologische Standortgebiete für ein Endlager mit HAA /NAG 17a/



**Abb. 1.5** Geologische Standortgebiete für ein Endlager mit SMA /NAG 17b/

Die dritte Etappe des schweizerischen Standortauswahlverfahrens soll bis zum Jahr 2031 abgeschlossen und die Rahmenbewilligung erteilt sein (Abb. 1.6). Anschließend

werden untertägige erdwissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt bis der Bau des Endlagers für HAA ab 2050 beginnt. Der Einlagerungsbetrieb für HAA soll 2060 beginnen und nach 15 Jahren abgeschlossen sein. Bis zum vollständigen Verschluss des Endlagers soll in einer jahrzehntelangen Beobachtungsphase ein Teil des untertägigen Endlagers (Infrastrukturbereiche und Zugangsbauwerke) offengehalten werden um eine vereinfachte Rückholung der radioaktiven Abfälle im Bedarfsfall zu ermöglichen.



**Abb. 1.6** Realisierungsplan des SMA- und HAA-Lagers /NAG 16b/

Die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen ist nach der schweizerischen Kernenergiegesetzgebung eine kerntechnische Anlage, für welche die Grundsätze der nuklearen Betriebssicherheit und des Strahlenschutzes einzuhalten sind. Hierzu gehören insbesondere

- das Kernenergiegesetz /KEG 03/,
- die Kernenergieverordnung /KEV 04/,
- die Verordnung über die Gefährdungsmaßnahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in kerntechnischen Anlagen /UVEK 09/,
- das Strahlenschutzgesetz /StSG 17/,

- die Strahlenschutzverordnung /StSV 14/,
- und weitere ENSI<sup>2</sup>-Richtlinien (wie z. B. /HSK 03/, /ENSI 10a/)

Hierdurch sollen Mensch und Umwelt vor Gefährdungen durch ionisierende Strahlung geschützt werden und radioaktive Stoffe werden im Normalbetrieb und bei Störfällen nur in einem nicht gefährdenden Umfang freigesetzt /KEG 03/. Ferner müssen Vorsorgeaufwendungen getroffen werden um eine unzulässige Strahlenexposition von Personen durch Direktstrahlung zu vermeiden. Hierzu gehören Schutzmaßnahmen im Störfall außerhalb und innerhalb der kerntechnischen Anlage.

In den spezifischen Auslegungsgrundsätzen für ein tiefegeologisches Endlager und den Anforderungen an den Sicherheitsnachweis /ENSI 09b/ werden Schutzkriterien für die Betriebsphase definiert. Diese gelten für das geologische Tiefenlager und auch für dessen Oberflächenanlagen. Es gelten die generellen Anforderungen, dass

- sicherzustellen ist, dass in der Betriebsphase (Normalbetrieb und Störfall) und nach dem Verschluss durch technische und administrative Maßnahmen eine nukleare Kritikalität ausgeschlossen ist,
- Abluft und Abwässer radiologisch überwacht und Abfälle sowie Abwässer über ein geeignetes System gesammelt und kontrolliert entsorgt werden,
- Die erforderliche Bewegungsfreiheit in den Räumlichkeiten für den operationellen Strahlenschutz gewährleistet ist und die Erfordernisse zum Zonenbetrieb berücksichtigt werden /HSK 95/ sowie durch feste oder bewegliche Abschirmungen die erwartete Ortsdosisleistung niedrig gehalten wird,
- Brandschutzmaßnahmen sowohl den Vorgaben der Kantone als auch den sicherheitstechnischen Anforderungen in Kernanlagen /HSK 03/ entsprechen wobei die Maßnahmen zum Brandschutz nicht die Langzeitsicherheit beeinträchtigen dürfen,
- Und die Auslegung der Anlagen entsprechend der KEV /KEV 04/ sicherheitstechnisch zu klassifizieren ist.

---

<sup>2</sup> Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI)

Für die Oberflächenanlage bzw. oberflächennahe Zugangsbauwerke gelten zusätzlich grundsätzlich die Anforderungen nach /ENSI 10b/ und die Auslegungsanforderung, dass ein Wassereintrich von der Oberfläche in das tiefengeologische Endlager verhindert wird.

Für die unterirdische Anlage muss ferner

- die bauliche Stabilität überwacht werden,
- die thermische Verträglichkeit der technischen und natürlichen Barrieren durch den Wärmeeintrich der wärmeentwickelnden Abfälle gewährleistet sein,
- eine räumliche und lüftungstechnische Trennung von Bereichen ermöglicht werden, in denen mit radioaktiven Abfällen umgegangen wird,
- die Dimensionierung den Erfordernissen des Normalbetriebs und der Störfallbewältigung entsprechen,
- und die Vermeidung von Wassereintrichen gewährleistet bzw. betriebliche und bauliche Maßnahmen vorgenommen werden, um die Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers sicherzustellen.

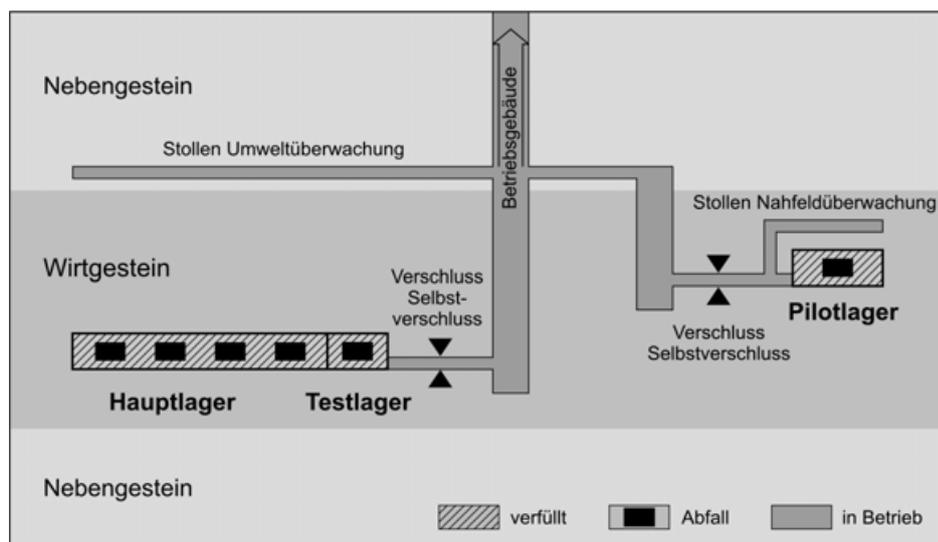
Für ein Bergwerk mit vertikalen Schächten in einer Teufe von über 100 m gelten die Vorschriften der Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen /BVOS 03/ und dem zugehörigen technischen Regelwerk über technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen /TAS 05/. Diese sind nach der SUVA<sup>3</sup>-Richtlinie „Schachtförderanlagen“ /SUVA 16/ auf zukünftige Anlagen in der Schweiz anzuwenden /SIN 14/.

---

<sup>3</sup> Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA)

## 2 Endlagerkonzept und -design

Die in der Schweiz entwickelte Strategie für eine geologische Endlagerung entspricht den Forderungen des Kernenergiegesetzes /KEG 03/ bezüglich einer "kontrollierten geologischen Langzeitlagerung". Dieses Endlagerkonzept sieht neben dem eigentlichen Endlager mit Einlagerungsfeldern (Hauptlager, s. Kap. 2.3.4) die Errichtung eines Test- und eines Pilotlagers vor. Das Testlager dient als Felslabor zur Erhebung von feldmechanischen Gesteinseigenschaften und zum Testen des Einlagerungs- und Rückholungsbetriebes (s. Kap. 2.3.6) und das Pilotlager der Überwachung der endgelagerten Abfälle in räumlich zum Hauptlager getrennten, aber mit identischen Eigenschaften errichteten Einlagerungsstrecken (s. Kap. 2.3.5). Neben den drei unterschiedlichen Lagern sind als Systemkomponenten die Zugangsbauwerke, das Streckensystem (Infrastrukturbereich) und ein Stollen zur Umweltüberwachung für eine Fernfeldüberwachung im Nebengestein vorgesehen (Abb. 2.1).

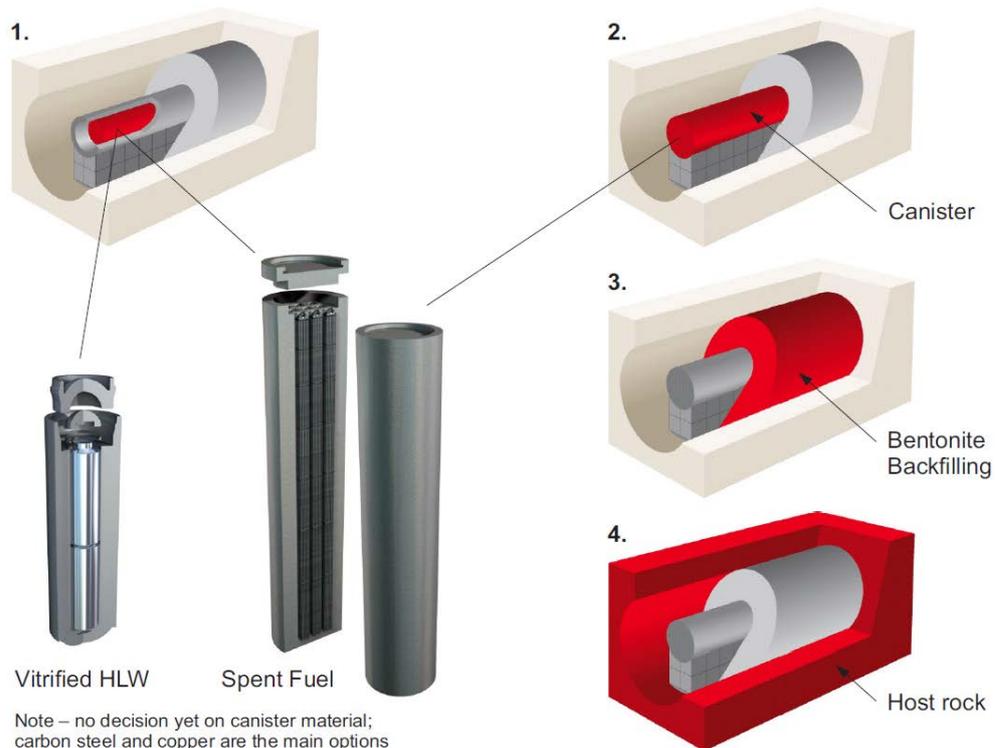


**Abb. 2.1** Schematisches Lagerkonzept mit Haupt-, Test- und Pilotlager /EKRA 00/

Die Langzeitsicherheit des Endlagers beruht auf einem Mehrbarrierenkonzept. Hierzu gehören technische Barrieren (Behälter, Konditionierungsmaterialien), geotechnische Barrieren (Verfüll-, Verschluss-, Versiegelungsmaterialien) und geologische Barrieren (Wirtsgestein und umgebendes Gestein) /NAG 03/. Das Barrierenkonzept (Abb. 2.2) basiert auf der Voraussetzung, dass die Behälter eine Einschlusswirksamkeit von mindestens 1.000 Jahren gewährleisten (s. Kap. 2.1). Nach diesem Zeitraum gewährleisten der Bentonit als Verfüll- und Versatzmaterial, die Bentonitauflager und der Opalinuston als Wirtsgestein die einschlusswirksamen Eigenschaften. Der Bentonit als Verfüll- und

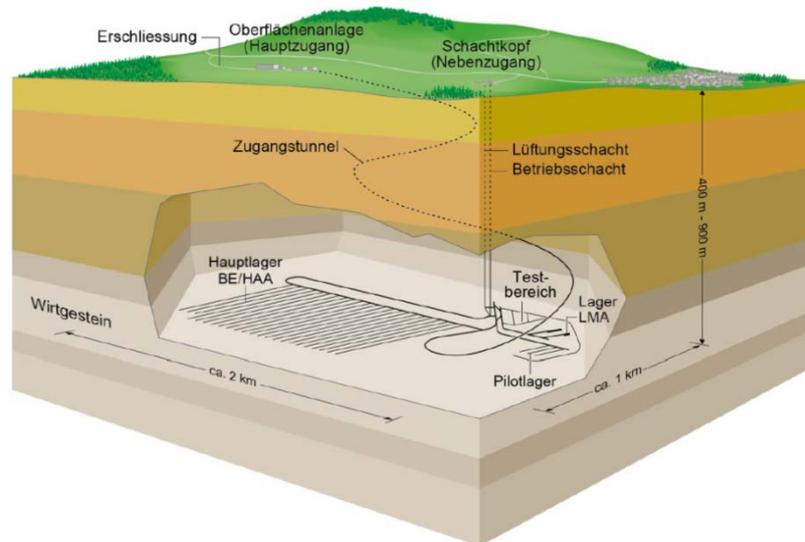
Versatzmaterial in Form von Pellets in Einlagerungsstrecken eingebracht, die über den Zeitverlauf Wasser aus dem Wirtsgestein aufnehmen und somit eine Barriere mit einer sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeit darstellen. Als mögliche Alternative zum Bentonit dient ein zementbasiertes Verfüllmaterial, falls die Bedingungen keinen ausreichend guten Einbau von kompaktiertem Bentonit zulassen. Aufbereiteter Opalinuston als Verfüllmaterial wird nicht weiter verfolgt, da dessen Quellfähigkeit vergleichsweise gering ist und mikrobielle Aktivitäten begünstigt werden und sich nachteilig bzgl. Interaktion mit Behältern auswirken können /ENSI 17/.

Durch die Einlagerung von hoch radioaktiven Abfällen wird die Temperatur in den technischen Barrieren bzw. des Wirtsgesteins erhöht. Hierdurch können sicherheitstechnische Eigenschaften (z. B. Quellfähigkeit des Bentonits, Anstieg des Porenwasserdrucks) der technischen und geologischen Barrieren beeinträchtigt werden /SCH 08/. Die Wärmeentwicklung in einem Endlager darf daher nicht zu Temperaturen führen, welche die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren signifikant beeinträchtigen /ENSI 10c/. Der Entsorgungsnachweis schreibt in der äußeren Hälfte des Bentonitbuffers eine Maximaltemperatur von 125 °C vor /JOH 02/. Beim erwarteten Wassergehalt von ca. 2 Gew.% im Bentonit wurde hieraus die Anforderung an eine Maximaltemperatur von 140 °C bis 160 °C an der Behälteroberfläche definiert und eine Maximaltemperatur von etwa 70 °C bis 95 °C an der Grenze zwischen Bentonit und Wirtsgestein.

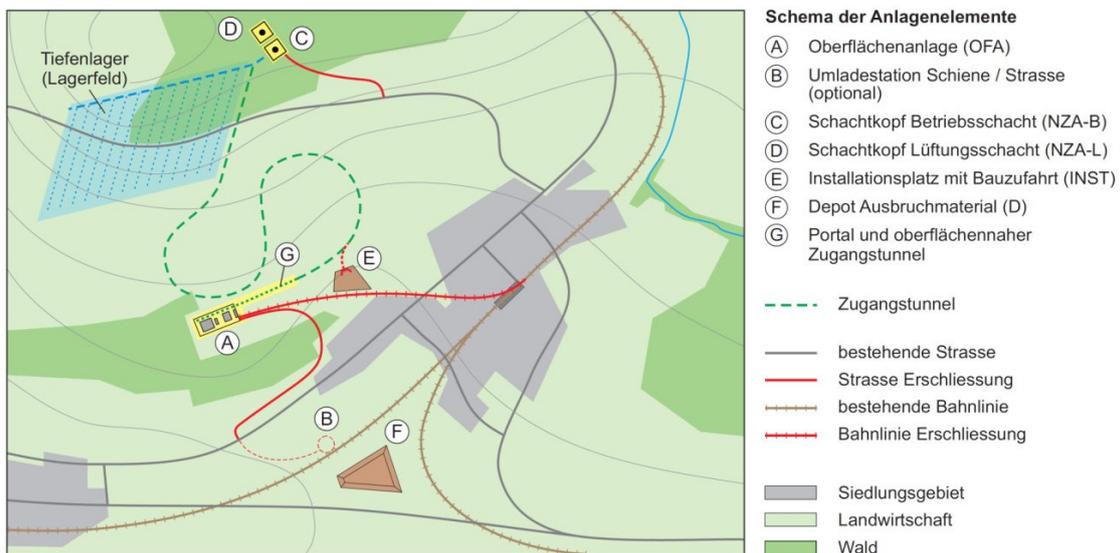


**Abb. 2.2** Barrierenkonzept (Behälter, Verfüllmaterial, Wirtsgestein) /PAT 12/

Zu einem Endlager für radioaktive Abfälle gehören eine obertägige und eine untertägige Anlage (Abb. 2.3, Abb. 2.4). Die obertägige Anlage umfasst die notwendigen Einrichtungen an der Erdoberfläche zur Realisierung des untertägigen Endlagers /BFE 13/. Hierzu gehören insbesondere die Annahme und ggfls. Umverpackung der radioaktiven Abfälle sowie die Zugangsbauwerke in die untertägige Anlage. In der untertägigen Anlage wird das Endlagerbergwerk errichtet, in dem die radioaktiven Abfälle eingelagert werden. Im Folgenden werden die Systemkomponenten der unter- und obertägigen Anlage sowie deren Verwendungszweck näher beschrieben.



**Abb. 2.3** HAA-Lagerkonzept /NAG 16c/



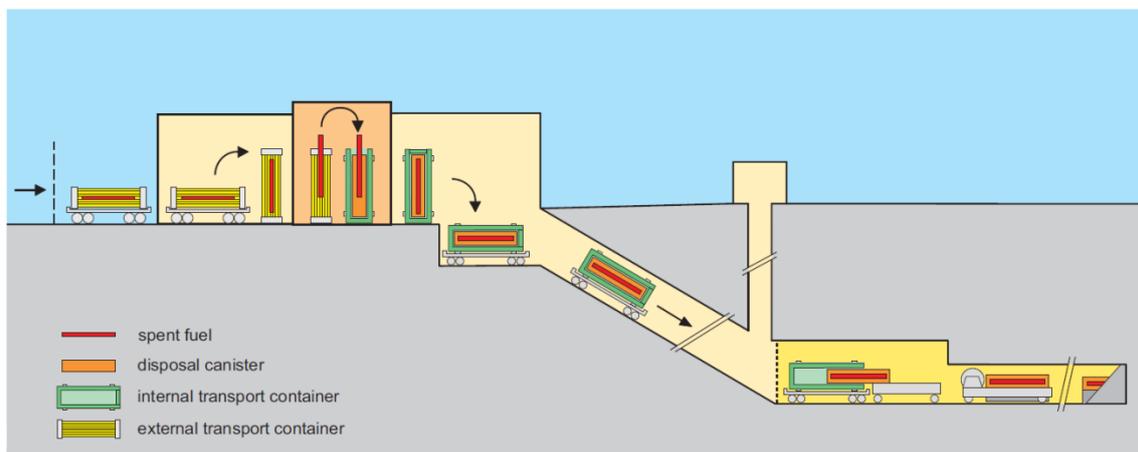
**Abb. 2.4** Aufsicht einer oberirdischen- und unterirdischen Anlage /NAG 16d/

Die Behälter werden bis zur tatsächlichen Einlagerung mehrfach gehandhabt. In der Oberflächenanlage werden die konditionierten Endlagerbehälter für den Transport in die untertägige Anlage bereitgestellt und in einen internen Transportbehälter verpackt, die Endlagerbehälter vor äußeren Einflüssen beim Transport im Hauptzugangswerk und in der untertägigen Anlage auf Lagerebene zu schützen /NAG 14b/, /NAG 13/. Die Endlagerbehälter mit den internen Transportbehältern sind so ausgelegt, dass ein ausreichender Schutz gegen zu erwartende Belastungen von Auslegungstörfällen gewährleistet ist. Hierzu gehören Störfälle, für die durch das Verhalten der Sicherheitssysteme keine radioaktiven Stoffe unzulässig freigesetzt werden und keine unzulässig hohe Bestrahlung von Personen gemäß /UVEK 09/ auftritt. Ferner dienen die Trans-

portbehälter der Abschirmung von Direktstrahlung und sind ein wesentlicher Teil des Strahlenschutzkonzeptes. Der Transport der Endlagerbehälter in den Transportbehältern erfolgt ausschließlich über das Hauptzugangswerk liegend auf einem entsprechenden Transportsystem /MES 14/, /SIN 14/, /WIE 14/.

Auf Lagerebene werden die Endlagerbehälter im Zentralbereich aus den internen Transportbehältern entnommen und auf einen Einlagerungstrolley in die Einlagerungsstrecken hineingefahren und eingelagert. Die Einlagerungsstrecken werden anschließend mit einem Bentonitgranulat vollständig verfüllt und versiegelt. Die Versiegelung verhindert einen das äußere Einwirken wie z. B. Wassereinbruch, Brand oder Explosion auf den Endlagerbehälter und das Verfüllmaterial.

Nach heutigem Planungsstand /NAG 13/ sollen 200 HAA-Endlagerbehältern pro Jahr eingelagert werden, wofür die Oberflächenanlage ausgelegt ist.



**Abb. 2.5** Schema zur Handhabung der HAA-Behälter bis zur Einlagerung /PAT 12/

## 2.1 Abfallinventar und -charakterisierung

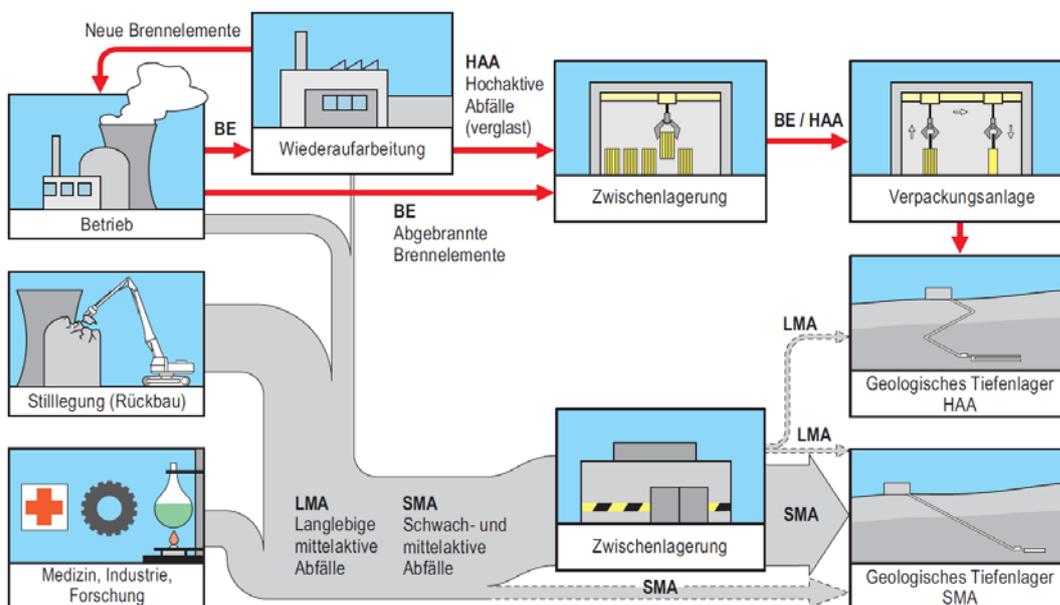
In der Schweiz fallen radioaktive Abfälle bei Betrieb und Stilllegung der Kernkraftwerke sowie des zentralen Zwischenlagers, bei der Wiederaufarbeitung von Brennelementen und in der **M**edizin, **I**ndustrie und **F**orschung (MIF-Abfälle) an. Die Abfälle werden in vier Kategorien eingeteilt /NAG 08a/:

- **S**chwach- und **m**ittelaktive **A**bfälle (SMA)
- Abgebrannte **B**rennelemente (BE)
- **H**ochaktive **A**bfälle (HAA)

- Langlebige mittelaktive **Abfälle** (LMA)

Das Inventar für radioaktive Stoffe in der Schweiz wurde erstmals im „Projekt Gewähr 1985“ /NAG 84/ erfasst und basierend auf modellhaften Abschätzungen im Vorhaben „Modellhaftes Inventar radioaktiver **Abfälle**“ (MIRA) /ALD 94a/, /ALD 94b/ aktualisiert. Im Rahmen des Entsorgungsnachweises wurde eine Teilrevision für BE/HAA durchgeführt /MCG 02/ und anschließend grundlegend für SMA, LMA und HAA/BE aktualisiert, das als „Modellhaftes Inventar für radioaktive **M**aterialien“ (MIRAM) weitergeführt wird /NAG 08a/. Seitens der NAGRA sind nach dem Sachplanverfahren die radioaktiven Abfälle den beiden Lagertypen (HAA und SMA) zuzuteilen, woraus sich unterschiedliche Abfallströme ergeben (Abb. 2.6). Maßgebend sind hierfür /BFE 08/

- das Inventar und die Halbwertszeiten der Radionuklide,
- die sicherheitstechnische Relevanz der Radionuklide (Wertung der radiologischen Toxizität),
- das Abfallvolumen,
- die Materialeigenschaften der Abfallmatrix und der Abfallbehälter mit ihren möglichen Auswirkungen auf das Wirtsgestein,
- die Wärmeentwicklung der Abfälle,
- sowie der Gehalt an potentiell gasbildenden Bestandteilen (Metalle, Organika) und an Komplexbildnern.



**Abb. 2.6** Nach dem Entsorgungsprogramm zu behandelnden Elemente /NAG 16e/

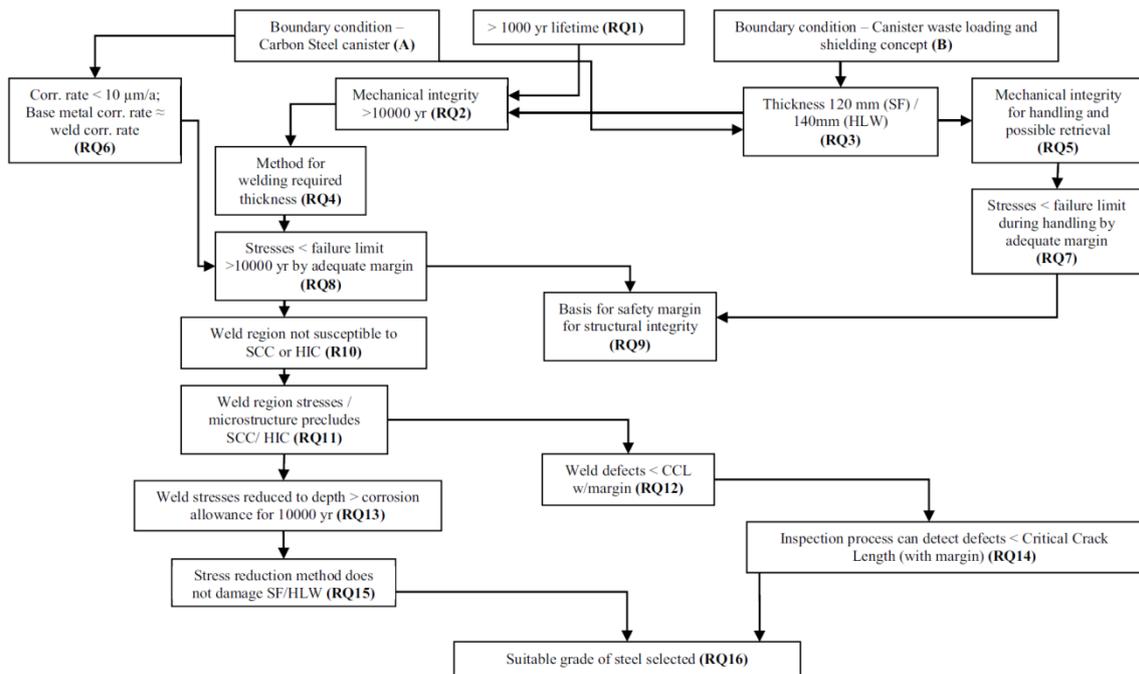
Die abgebrannten Brennelemente werden nach ihrem Reaktortyp (**D**ruck- oder **S**iedewasserreaktor, DWR bzw. SWR) und ihrer Zusammensetzung ( $\text{UO}_2$  oder **M**isch**o**xid MOX) unterschieden. Insgesamt ist mit ca. 4070 t abgebranntem Brennstoff zu rechnen, die sich auf 8.667 SWR- und 3.617 DWR-Brennelemente verteilen /NAG 17c/. Unverpackt entspricht dies einem Gesamtvolumen von  $1.357 \text{ m}^3$ .

Die anfallenden Wiederaufarbeitungsabfälle (entstanden aus ca. 1.140 t Uran /NAG 17c/) stammen von den AREVA-Anlagen sowie aus Sellafield. Die verglasten Abfälle befinden sich in 180-l-Kokillen. Von AREVA fallen konditioniert  $79 \text{ m}^3$  und verpackt  $496 \text{ m}^3$  mit einer Masse von 480 kg an, aus Sellafield konditioniert  $37 \text{ m}^3$  und verpackt  $232 \text{ m}^3$  ebenfalls mit einer Masse von 480 kg /NAG 08a/. Insgesamt sind  $115 \text{ m}^3$  konditioniert und  $380 \text{ m}^3$  verpackt /NAG 15/. Die Rückführung der Glaskokillen ist seit dem Jahr 2016 abgeschlossen /NAG 17c/.

Das Gesamtvolumen aller HAA beträgt (inkl. weitere  $8 \text{ m}^3$  HAA des Bundes) unverpackt  $9.402 \text{ m}^3$  /NAG 17c/.

## **2.2 Behälterkonzept**

Das Auslegungskonzept der Behälter für ein Endlager in der Schweiz soll die Einschusswirksamkeit der Behälter für mindestens 1.000 Jahre gewährleisten /ENSI 09b/ (Abb. 2.7). Die NAGRA entwickelt zwei unterschiedliche Behälterkonzepte: Für abgebrannte Brennelemente und für hoch radioaktive Verglasungsabfälle aus der Wiederaufbereitung. Bis zum Jahr 2025 sollen die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Behälterdesign inkl. Materialuntersuchungen abgeschlossen sein und ein finaler Beschluss gefasst werden. Danach erfolgen bis 2035 Optimierungs- und Detailstudien und anschließend bis 2045 die Herstellung von Prototypen /PAT 12/.



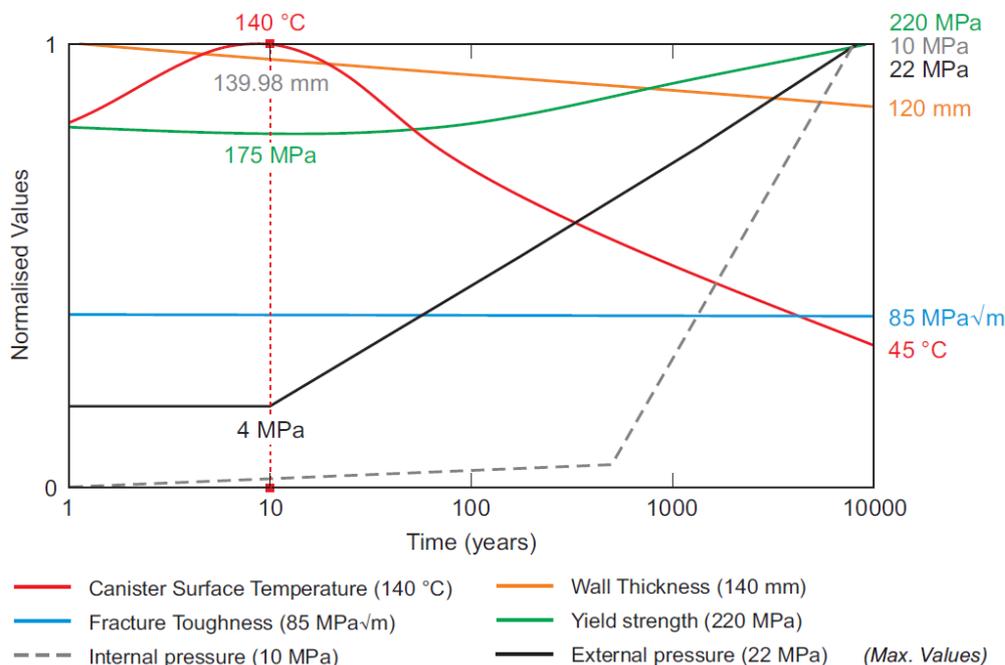
**Abb. 2.7** Anforderungen einen Behälter für HAA/BE /PAT 12/

Die Behälter sollen aus geschmiedetem Stahl ohne Beschichtung /ZUI 14/ des Typs „ASTM 1516 Grade 70“ bestehen /PIK 10/. Die erhöhte Gasbildung durch die mögliche Korrosion des Edelstahls wird bzw. dessen Auswirkungen gelten als unproblematisch /NAG 16f/. Ggfls. kann ein beschichteter Stahl gewählt werden und metallische Einbauten entfernt werden um die Gasbildung zu reduzieren. Zur Entscheidung einer Beschichtung/Ummantelung muss zunächst die Frage der gewählten Stollenverfüllung geklärt werden. Keramik wird ausgeschlossen /ENSI 17/.

Die Stahlbehälter werden so ausgelegt, dass deren mechanische Standfestigkeit für 1.000 Jahre gewährleistet wird. Hierfür werden für die mögliche Endlagertiefe typische mechanische Parameter zum geochemischen Spannungsfeld und dem hydrostatischen Druck gewählt und der zunehmende Druck durch das Aufquellen des Bentonits als Verfüllmaterial um die Behälter herum berücksichtigt /PAT 12/. Ferner ist vorgeschrieben (RQ 18, s. Abb. 2.7), dass Maßnahmen zum Lifting an einem Behälter angebracht werden müssen, sodass die Handbarkeit mit Rückholbarkeitsoption während der Betriebsphase gewährleistet ist /PAT 12/. Als Alternativkonzept zu den Stahlbehältern soll an einem kupferbeschichteten Behälter geforscht werden /NAG 16g/.

Die Behälterauslegung nach /PAT 12/ zeigt, dass

- nach 10 Jahren eine maximale Temperatur an der Behälteroberfläche von 140 °C erreicht wird und nach 10.000 Jahren lediglich 45 °C beträgt /LAN 09/,
- der maximal zulässige Innendruck von 10 MPa infolge der Diffusion von gasförmigem Wasserstoff entstanden durch Korrosionsprozesse an der Behälteroberfläche in den Behälter hinein nach 8.000 Jahren erreicht wird /TUR 09/,
- durch die Gebirgsauflast und das Quellen des Bentonits innerhalb von 10 Jahren ein isostatischer Druck von 10 MPa und nach 8.000 Jahren von 22 MPa erreicht wird,
- und nach 10.000 Jahren bei einer Korrosionsrate von 2 µm/a /LAN 09/ die Materialwandstärke durch eine flächenhafte Korrosion um ca. 20 mm gesunken sein wird. Das Auftreten von lokalem Lochfraß in einem signifikanten Maß wird nicht erwartet /KIN 08/, /JOH 03/.



**Abb. 2.8** Zeitliche Entwicklung der Parameter zur Gewährleistung der Einschlusswirksamkeit des Behälters /PAT 12/

Als Endlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente sollen zylindrische Stahlbehälter mit integrierter Abschirmung verwendet werden, die eine Mindestwandstärke von

0,15 m, eine Länge von ca. 5 m und einen Durchmesser von ca. 1 m besitzen (Abb. 2.9). Es wird beabsichtigt 4 DWR- oder 9 SWR-Brennelemente pro Endlagerbehälter zu verpacken. Das Volumen der verpackten abgebrannten Brennelemente in Endlagerbehälter aus Stahl beträgt insgesamt 8.996 m<sup>3</sup> /NAG 17c/.



**Abb. 2.9** Stahlbehälter für abgebrannte Brennelemente /NAG 17c/, /PAT 12/

Kokillen mit verglastem hoch radioaktivem Abfall sollen in Endlagerbehälter aus Stahl (bzw. als Alternativmaterial Kupfer /PAT 12/) mit verschweißtem Deckel gepackt werden. Eine Stahlkokille des Typs „AREVA Sellafield Ltd.“ /PAT 12/ besitzt ein Volumen von 0,18 m<sup>3</sup> und wiegt 489 kg. Insgesamt sollen 632 Stahlkokillen mit einem Gesamtvolumen von 114 m<sup>3</sup> endgelagert werden. Jeweils drei Stahlkokillen werden in einen Endlagerbehälter geladen, der ein Volumen von 1,89 m<sup>3</sup> besitzt. Hierdurch ergibt sich ein Gesamtvolumen von insgesamt 398 m<sup>3</sup> /NAG 17c/. Die Endlagerbehälter sind so ausgelegt, dass deren Standfestigkeit für 1.000 Jahre gewährleistet wird /PAT 12/.

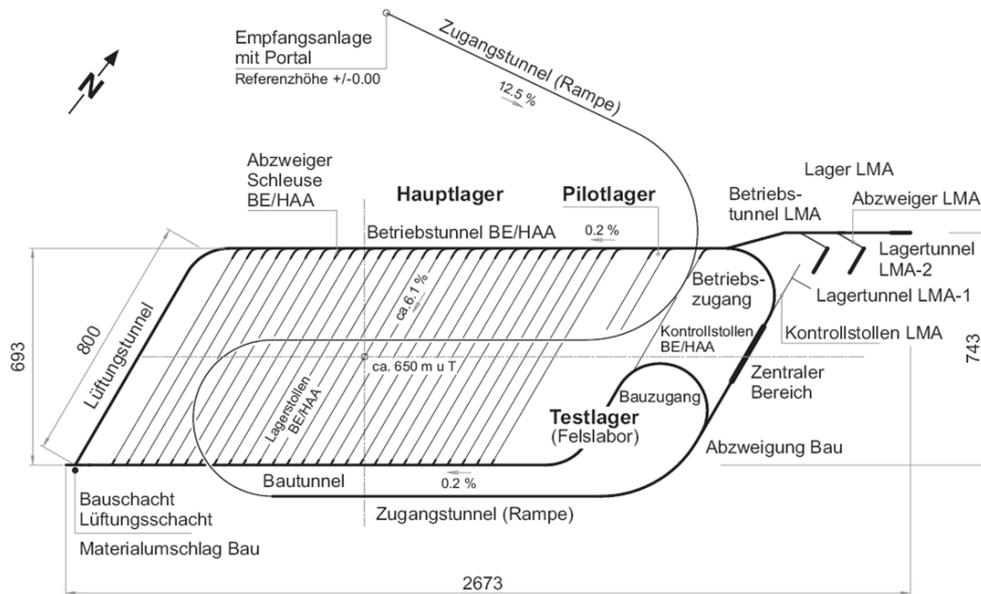


**Abb. 2.10** Behälter aus Stahl mit drei Kokillen /NAG 17c/

### **2.3 Untertägige Anlage**

Im Folgenden werden die Systemkomponenten der untertägigen Anlage, d. h. des Endlagerbergwerkes / Grubengebäudes, beschrieben (Abb. 2.11). Hierzu gehören

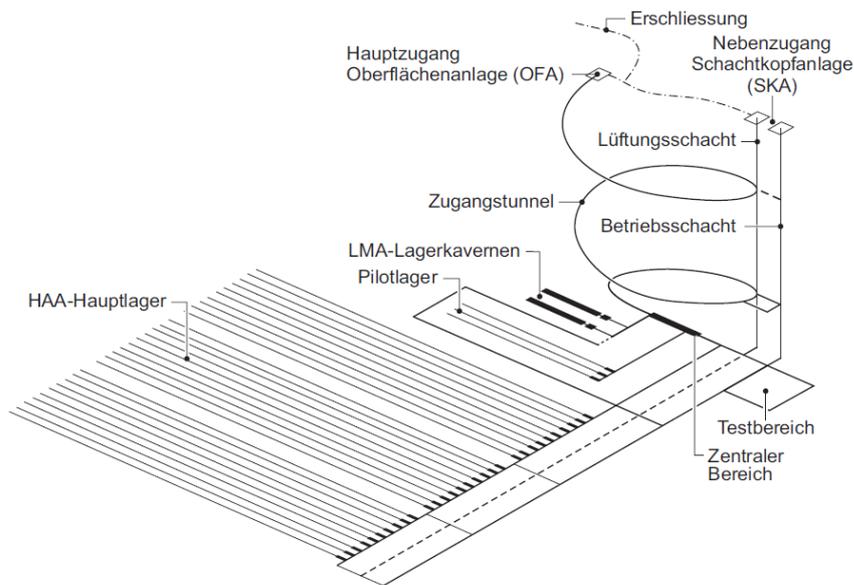
- Das Hauptzugangsbauwerk (vor. Rampe),
- Nebenzugangsbauwerke (vor. Betriebs- sowie Lüftungsschacht),
- der Zentralbereich als Umschlagplatz,
- die Haupttunnel (Betriebs-, Bau- und Lüftungstunnel),
- das Testlager als Felslabor,
- das Pilotlager für das Monitoring-Konzept,
- das Hauptlager mit Lagerstollen für BE/HAA,
- und die LMA-Lagertunnel.



**Abb. 2.11** Untertägige Anlage mit Systemkomponenten. Abmessungen in m /NOL 02/

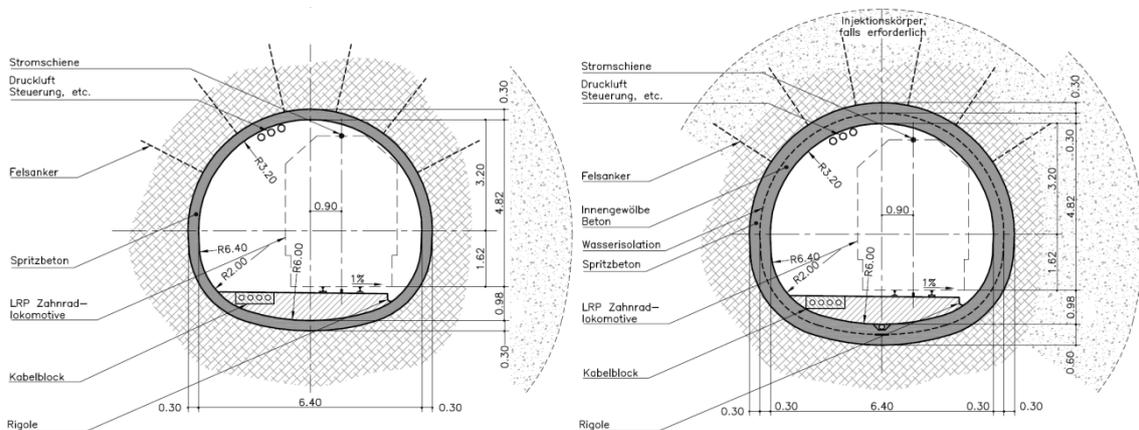
### 2.3.1 Hauptzugangsbauwerk

Im schweizerischen Endlagerkonzept wird eine Rampe favorisiert, die als Zugangstunnel von der Oberflächenanlage zum Zentralbereich in der untertägigen Anlage dient /NOL 02/. Vor dem Zentralbereich zweigt die Rampe auch zum Testlager (Felslabor) ab. Die Rampe ist mehrfach gewunden und ist in seinem Grundriss modellhaft als Doppelkurve eingezeichnet (Abb. 2.12). Insgesamt muss die Rampe eine Höhendifferenz von ca. 620 m überwinden. Auf Basis einer Optimierung bzgl. betrieblicher, baulicher und sicherheitstechnischer Aspekte ist die Rampe um 12,5 % geneigt und besitzt eine daraus resultierende Länge von ca. 5 km /NOL 02/.



**Abb. 2.12** Systemskizze mit einer gewundenen Rampe als Zugangstunnel /NAG 16d/

Die Rampe übernimmt in der untertägigen Explorations- und Bauphase andere Funktionen als in der Betriebsphase zur Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle. In der Explorations- und Bauphase dient die Rampe dem Personen- und Materialtransport (v. a. Bentonitgranulat und –auflager) mit Pneufahrzeugen zur Errichtung des Grubengebäudes sowie der Frischluftzufuhr /ZIE 08/. Die Frischluftzufuhr durch die Rampe während der Explorations- und Bauphase erfolgt über den gesamten Querschnitt (ca. 7 m Breite, 6,5 m Höhe). In stark wasserführenden Schichten (im Hangenden des Opalinustons /ZIE 08/) wird ein zweischaliger Ausbau verwendet und das Bergwasser in einer Drainage zur nächsten Pumpanlage geleitet (Abb. 2.13). In wenig durchlässigen Formationen erfolgt die Felssicherung durch Anker und einen einschaligen Ausbau aus Spritzbeton /NOL 02/.



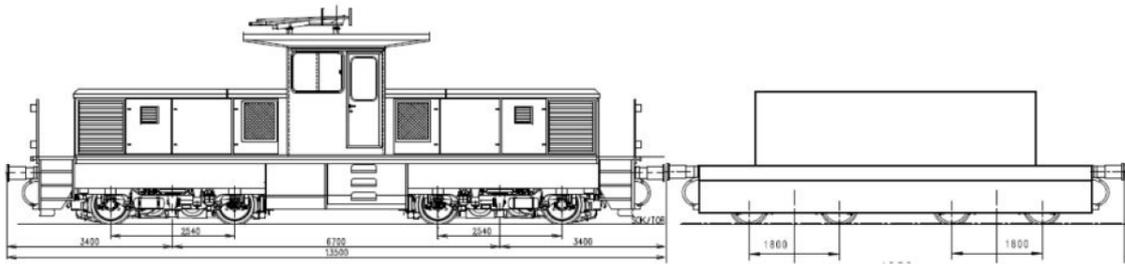
**Abb. 2.13** Ein- (links) und zweischaliger Ausbau (rechts) der Rampe /NOL 02/

Mit Beginn der Einlagerung wird die Rampe ausschließlich für den Transport der Abfallgebinde genutzt. Hierfür wird voraussichtlich unmittelbar zuvor auf einen Schienenbetrieb mit Zahnradbahn umgerüstet, um einen sicheren Transport schwerer Lasten bei einer starken Neigung (hier 12,5 %) zu gewährleisten.

Eine Zahnradbahn ist ein schienengebundenes Fördermittel, für das zwischen den Schienen auf den Schwellen Zahnstangen befestigt werden und das durch mehrere Zahnräder am Triebfahrzeug in Bewegung gesetzt wird. Der Zahnradbetrieb erlaubt die Überwindung stärkerer Steigungen als ein reiner Adhäsionsbetrieb, bei dem die Stahlräder bei einer stärkeren Steigung bzw. Last auf den Schienen durchdrehen oder gleiten können /WIE 14/. Bei Kurven sollte der Radius mindestens 120 m (besser 150 m) betragen um eine Entgleisungssicherheit zu gewährleisten. Nach /NOL 02/ ist ein Kurvenradius von mindestens 250 m vorgesehen, wodurch die Mindestanforderung nach /WIE 14/ erfüllt ist. Zur Energieversorgung wird eine Stromschiene am First des Zugangstunnels angebracht, die eine zuverlässigere Stromaufnahme als ein Fahrdrabt darstellt und die Bauhöhe des Zugangstunnels reduziert. Eine elektrisch betriebene Zahnradlokomotive wirkt sich positiv auf das Bewetterungskonzept und die Arbeitssicherheit aus, da keine Abgase emittiert werden. Als Transportmittel für die Endlagerbehälter ist ein vierachsiger Flachwagen vorgesehen, der eine Länge von 9 m und ein zulässiges maximales Bruttogewicht von 100 Tonnen /WIE 14/ besitzt (Abb. 2.14).

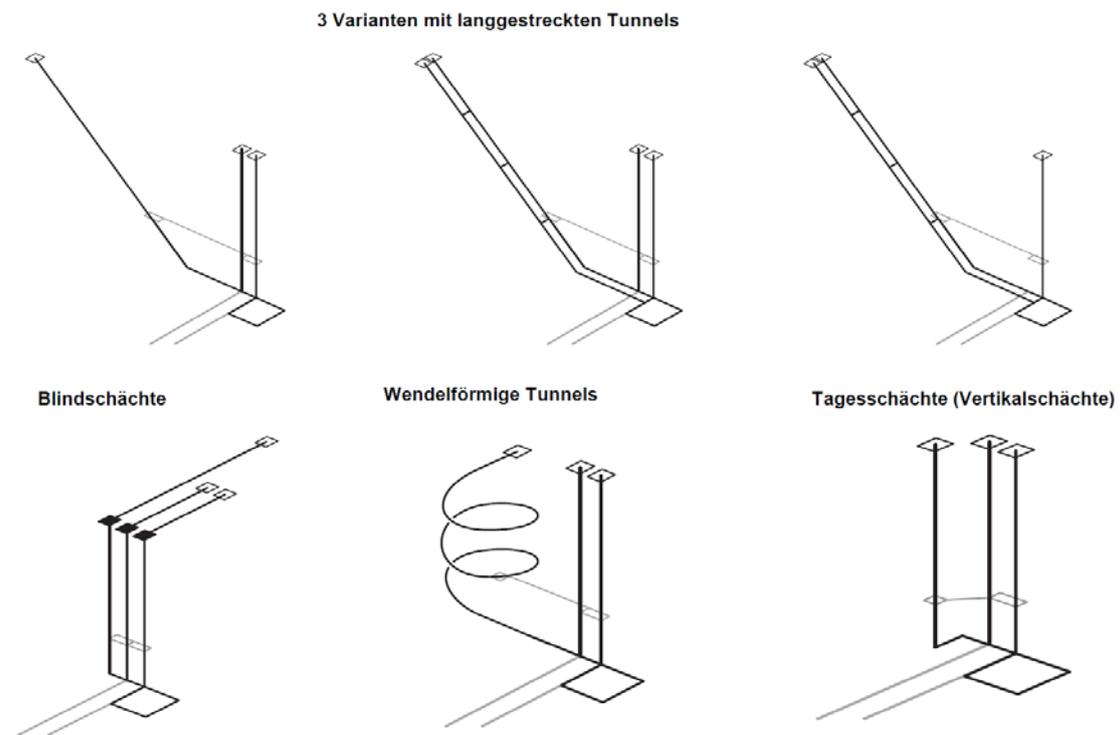
Grundsätzlich ist auch eine Standseilbahn für den Einlagerungsbetrieb im Zugangsbauwerk denkbar /MES 14/.

Auch ein Gleislostransport wird diskutiert /RIC 14/. Diese könnten bei einer geringeren Steigung (ca. 10 %) eingesetzt werden. Diese Art der Schwerlastfördermittel würde bereits und mit Diesel betrieben eingesetzt, was die Brandlast in der untertägigen Anlage erhöhen würde /NAG 14b/. Durch die Verwendung eines Verbrennungsmotors und eines Treibstofftanks wären zusätzliche Brandbekämpfungssysteme notwendig.



**Abb. 2.14** Zugkomposition (Zahnradbetrieb) für den Einlagerungsbetrieb /WIE 14/

Es ist noch nicht abschließend entschieden, dass eine Rampe als Zugangsbauwerk verwendet wird. Grundsätzlich ist als Zugangsmöglichkeit auch eine Schachtförderanlage /SIN 14/ (Blindschächte oder Tagesschächte) oder ein langgestreckter Zugangstunnel denkbar (Abb. 2.15). Die Variante „langgestreckter Tunnel“ ist eine favorisierte Option als Zugangsbauwerk falls die Oberflächenanlage sehr weit vom Lagerbereich entfernt errichtet werden sollte /NAG 16d/. Alle Varianten des Zugangsbauwerkes können die erforderlichen Funktionen erbringen und es ergeben sich keine grundsätzlichen Vorbehalte /ENSI 17/. Daher können bei der standortortspezifischen Beurteilung und Auswahl des Zugangsbauwerkes standortspezifische bauliche und betriebliche Aspekte berücksichtigt werden.

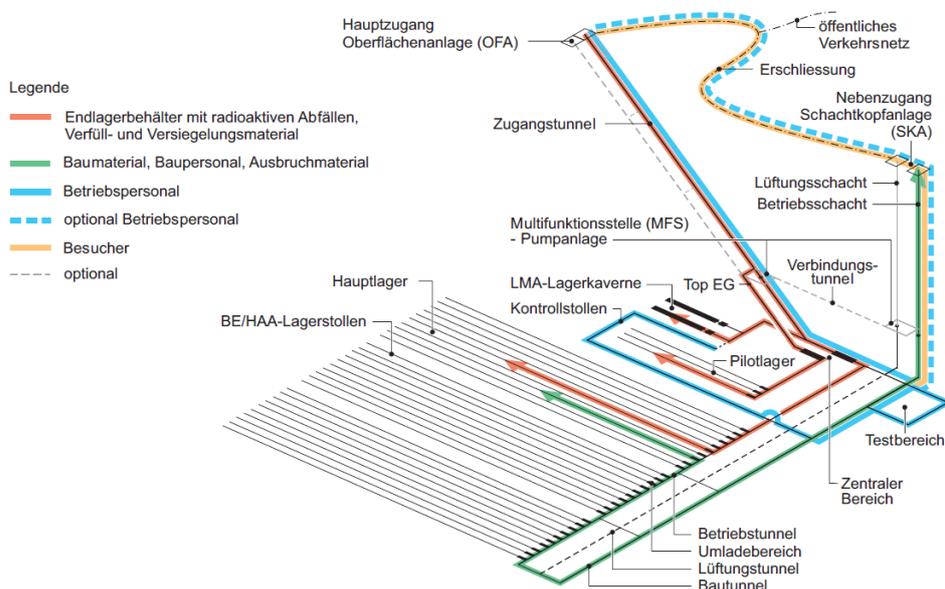


**Abb. 2.15** Systemskizzen für unterschiedliche Zugangsbauwerke /NAG 14c/

### 2.3.2 Nebenzugangsbauwerke (Schächte)

Im Endlagerkonzept sind zwei Schächte vorgesehen. Einer dient dem Ein- und Ausbringen von Personen und Material in der Bau- und Explorationsphase und insbesondere während des Einlagerungsbetriebes, da dann der Zugangstunnel dem Einbringen der Abfallgebinde dient /NOL 02/. Ein Zugang für das Betriebspersonal ist auch über das Hauptzugangsbauwerk während der Einlagerungsphase möglich, allerdings ermöglicht der Betriebsschacht den Zugang zu den nichtnuklearen Anlagenteilen ohne Übergang in eine kontrollierte Zone /NAG 16d/.

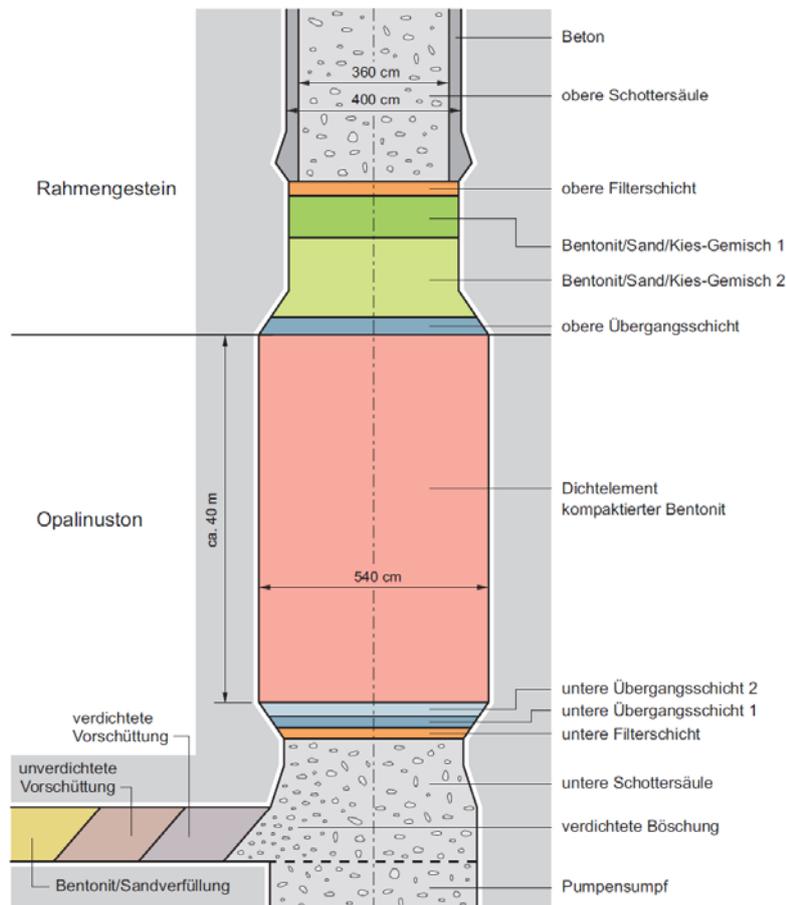
Zusätzlich wird ein Lüftungsschacht errichtet, durch den die Abluft aus dem Grubengebäude an die Oberfläche erfolgt und ferner als Notausstieg dient /ZIE 08/. Eine Übersicht über die Personen- und Materialströme während des Einlagerungsbetriebs zeigt Abb. 2.16. Zukünftig soll die Einrichtung unabhängiger Fluchtwege zur Oberfläche detaillierter untersucht werden, insbesondere wenn bautechnische Gefährdungen an neutralgischen Stellen im Bereich der Zugangsbauwerke vorhandene Fluchtwege unbrauchbar werden /ENSI 17/.



**Abb. 2.16** Systemskizze mit Personen- und Materialströmen /NAG 14b/

Im Bereich wasserführender Schichten ist ein zweisechaliger Ausbau mit Wasserisolation und Injektionsbohrungen geplant. In dichten Felsformationen erfolgt ein einschaliger Ausbau. Am Schachtfuß befindet sich ein Pumpensumpf mit einer Pumpanlage, welche das nicht verdrängbare Bergwasser zur Oberfläche bringt /NOL 02/.

An den Verschluss bzw. die Versiegelung der Schächte werden besonders hohe Anforderungen gestellt, da diese eine direkte Verbindung zwischen Lagerzone und Biosphäre darstellen. Ein erster Vorschlag zur Schachtversiegelung /NOL 02/ sieht am Schachtfuß eine Schottersäule vor, die innerhalb des Wirtsgesteins Opalinuston von einem ca. 40 m mächtigen Dichteelement aus kompaktiertem Bentonit überdeckt wird (Abb. 2.17). Im Rahmengestein oberhalb des Opalinustons soll nach einer Übergangs- bzw. Filterschicht eine weitere Schottersäule eingebracht werden, die von Beton an der Schachtwand umgeben wird.

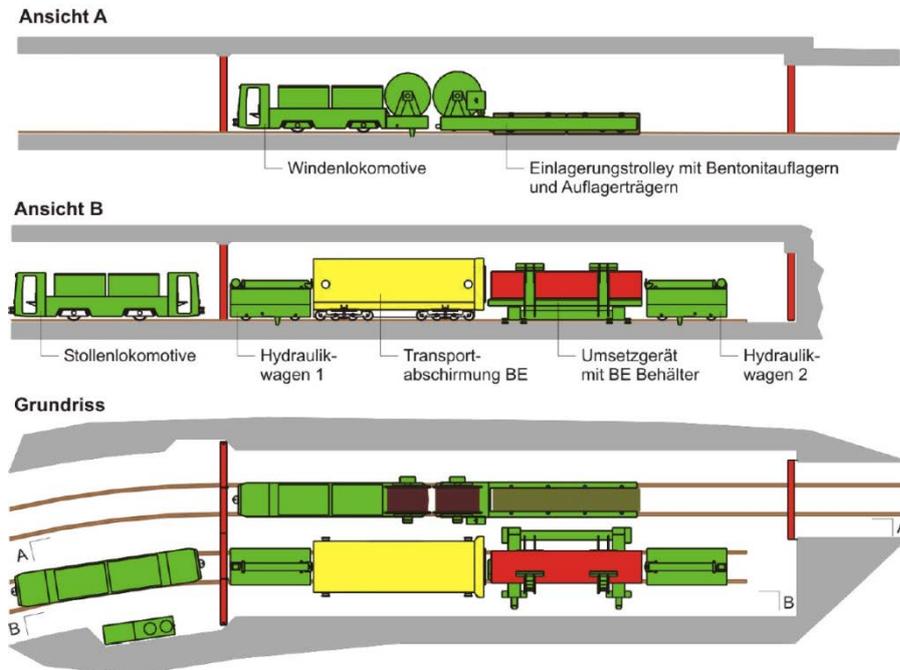


**Abb. 2.17** Konzeptvorschlag für die Schachtversiegelung /NOL 02/

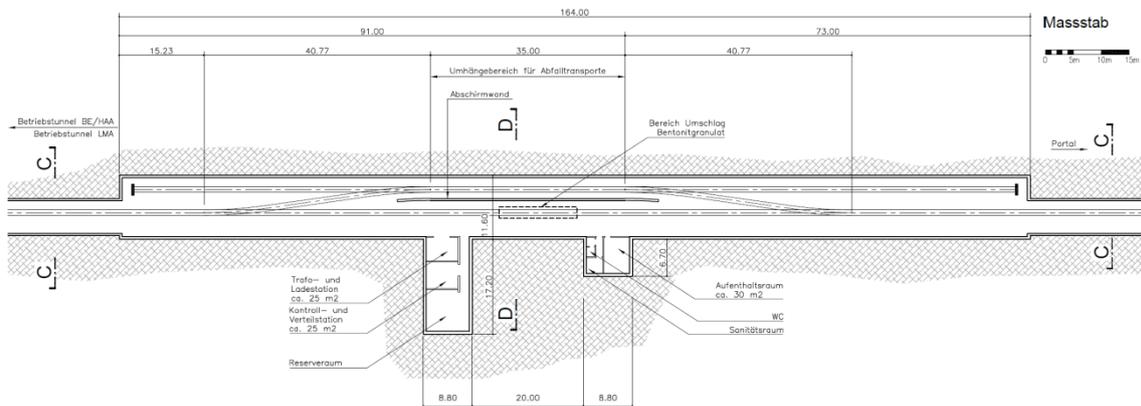
### 2.3.3 Zentralbereich

Der Zentrale Bereich (auch Zentralbereich genannt) dient als untertägige Schnittstelle zum Wechsel vom Zahnradbetrieb im Zugangstunnel auf Adhäsionsbetrieb in den Haupttunneln. Der Zentralbereich wird durch den Zugangstunnel erreicht und ist ohne Gefälle angelegt, sodass eine Adhäsionsbahn eingesetzt werden kann. Durch die Adhäsionsbahn erfolgt u. a. die Verteilung der befüllten Abfallbehälter auf Bentonitauf-

gern sowie des Bentonitgranulats. Hierfür werden die Endlagerbehälter von dem Zugspann der Stollenlokomotive auf den Einlagerungstrolley der Windenlokomotive umgeladen (Abb. 2.20). Zum Wechsel der Zugmaschine wird ein Doppelgleis mit Umfahrmöglichkeit sowie mehrere Abstellgleise errichtet (Abb. 2.19).



**Abb. 2.18** Schleuse mit Umladevorgang /NOL 02/



**Abb. 2.19** Technische Zeichnung des Zentralbereiches (Aufsicht) /NOL 02/

Eine Abschirmwand zwischen dem Doppelgleis soll das Personal in den angrenzenden technischen Infrastrukturräumen vor Strahlung schützen, wenn sich Abfalltransporte im Gleisabschnitt befinden. Ferner befindet sich im Zentralbereich eine Umschlaganlage, für die Staubschutzvorkehrungen eingerichtet werden /NOL 02/.

Der Zentralbereich befindet sich vollständig im hydraulisch dichten Opalinuston. Daher ist ein einschaliger Ausbau geplant. Aus Stabilitätsgründen wird der Stollen entsprechend des geomechanischen Spannungsfeldes in Richtung der maximalen Hauptspannung aufgeföhren /NOL 02/.

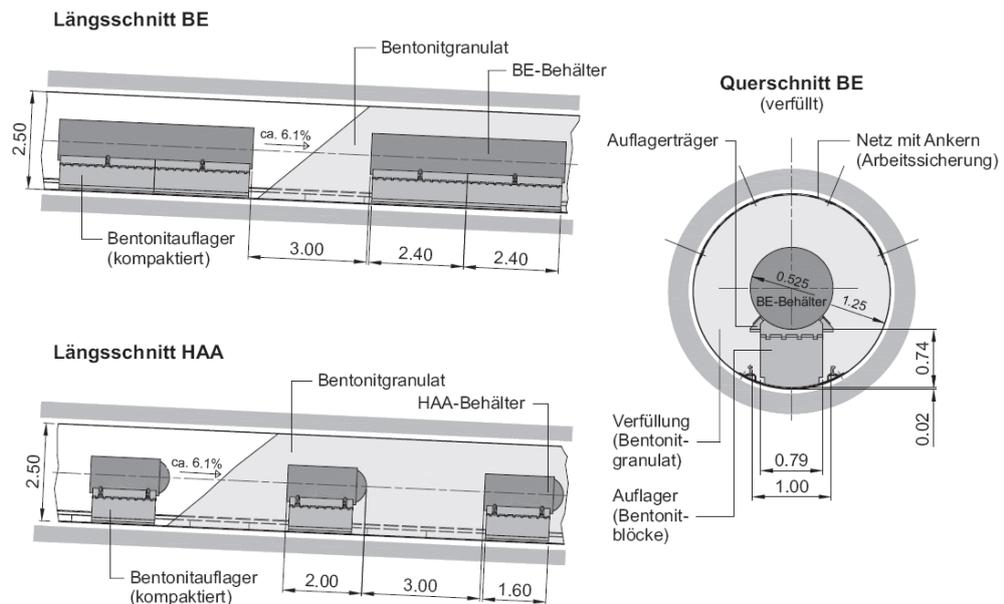
#### **2.3.4 Hauptlager (BE/HAA)**

Die Endlagerung der befüllten BE/HAA-Behälter ist im Hauptfeld vorgesehen. Dieses besteht aus 27 Einlagerungsstrecken (Lagerstollen) mit einer Länge von 800 m und einem Durchmesser von 2,5 m. Stollenlänge und –durchmesser basieren auf ausfüh- rungstechnischen, betrieblichen, sicherheitsrelevanten und wirtschaftlichen Optimie- rungsansätzen für ein generisches Endlager im Opaloinuston /NOL 02/. Die Anzahl an Einlagerungsstrecken ergibt sich aus der gewählten Streckengeometrie und dem anfal- lenden Abfallvolumen. Sollte zukünftig ein größerer Platzbedarf notwendig sein, ist es nach Ansicht von /NOL 02/ möglich die Anzahl an Einlagerungsstrecken zu erhöhen. Als Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken ist 40 m vorgesehen, um eine ausrei- chende Wärmeabfuhr zu ermöglichen und mögliche integritätsgefährdende thermisch induzierte Prozesse zu verhindern /NOL 02/. Es ist ein paralleler Bau- und Einlage- rungsbetrieb der Einlagerungsstrecken geplant. Hierfür erfolgt der Bauzugang über den Betriebsschacht. Die kontinuierliche Einlagerung soll wenige Monate bis maximal ein Jahr nach Bau einer Einlagerungsstrecke erfolgen. Es ist vorgesehen zwei Einlage- rungsstrecken pro Jahr zu errichten /HUF 05/.

Die Einlagerungsstrecken werden entlang der maximalen horizontalen Hauptspannun- gen des geomechanischen Spannungsfeldes im Opalinuston aufgeföhren. Damit wer- den die Einlagerungsstrecken in ihrem Querschnitt am wenigsten beansprucht und ge- ringe Felssicherungsmaßnahmen (Verankerung mit Draht- und Armierungsnetzen) sind ausreichend. Zukünftige detaillierte Konzepte sollen auf dieser Annahme basieren, wodurch das Aufföhren der Einlagerungsstrecken parallel zum Schichtverlauf des Wirtsgesteins favorisiert wird /ENSI 17/. Diese Felssicherungsmaßnahme zur Sicher- stellung der Arbeitssicherheit wurde bereits im Opalinuston im Felslabor Mont Terri er- probt /NOL 02/ und für den Opalinuston im Tafeljura des Zürcher Weinlands für eine Lagertiefe von ca. 650 m entwickelt /NAG 09/. Sollten ungünstigere felsmechanische Bedingungen am ausgewählten Standort vorliegen (z. B. größere Teufe der Einlage- rungsstrecken, tektonisches Regime mit evtl. höherer Trennflächendichte als im Tafel- jura), sind können zusätzliche stabilisierende Ausbauten notwendig sein. Für diesen

Fall wird das alternative Ausbaukonzept „Liner concepts“ entwickelt, auf das bei Bedarf zurückgegriffen werden kann /NAG 09/. Hierbei handelt es sich um einen Stahlbogen-Ringausbau, der zusätzlich mit Reibrohrankern und Spritzbeton kombiniert werden kann.

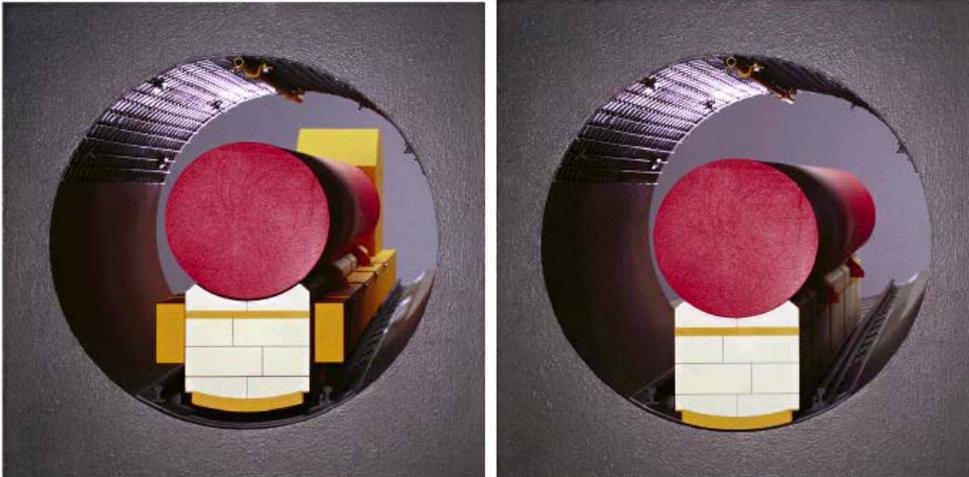
Die Einlagerungsstrecken des Hauptlagers werden von einem Tunnel aus mit einer Tunnelbohrmaschine schichtparallel aufgeföhren. In einem generischen Konzept im Opalinuston der Schweiz werden die Einlagerungsstrecken in N-S-Richtung mit einem Gefälle von ca. 7° errichtet /NOL 02/. Dies kann zu einem Gefälle in den Einlagerungsstrecken vom Betriebstunnel aus föhren (Abb. 2.20). Auf der Lagerebene wird allerdings aufgrund der trockenen Verhältnisse im Opalinuston sehr wenig Sickerwasser erwartet, sodass aus Gründen der Wasserhaltung keine Bedenken bestehen /NAG 16d/.



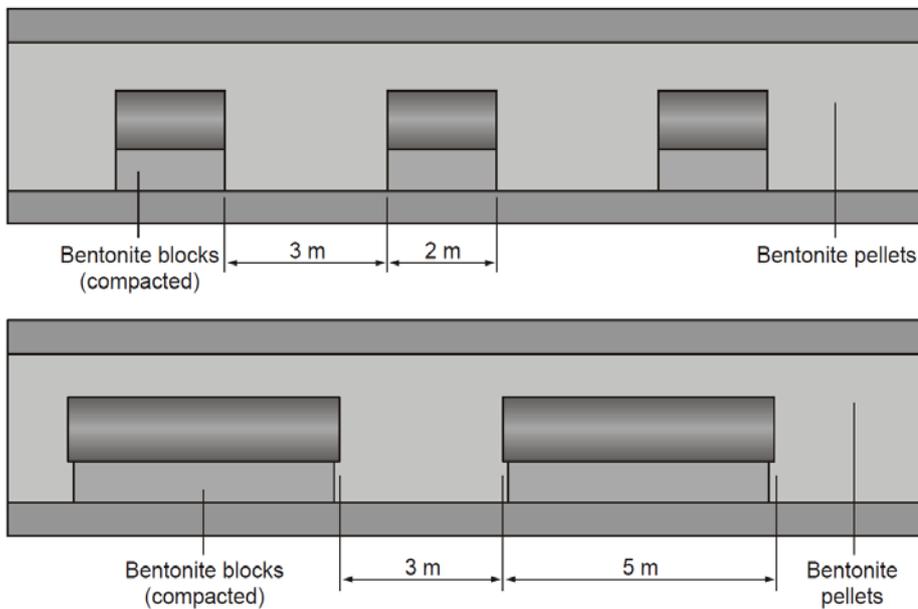
**Abb. 2.20** Längsschnitt einer Einlagerungsstrecke für BE (oben) und HAA (unten) sowie der Querschnitt einer Einlagerungsstrecke /NOL 02/

Am Übergang zwischen Betriebstunnel und Einlagerungsstrecke wird ein Abzweiger mit Schleuse errichtet, in der die Abfallgebinde aus ihrer Transportabschirmung entnommen und für die Einlagerung auf den Bentonitauflagern vorbereitet werden. Die Abzweiger besitzen den gleichen Querschnitt wie die Einlagerungsstrecken und werden durch Anker und Spritzbeton als einschaliger Ausbau gesichert, da diese aufgrund ihrer Ausrichtung (vor. 60° zwischen Einlagerungsstrecke und Betriebstunnel im generischen Konzept /NOL 02/) größeren geomechanischen Beanspruchungen ausgesetzt

ist. Von hier aus werden die Endlagerbehälter liegend auf kompaktierten Bentonitblöcken in den Einlagerungsstollen mit einem Abstand von 3 m zwischen den Behältern entlang der Stollenachse platziert (Abb. 2.21, Abb. 2.22). Die geplanten Abzweiger gelten als bautechnisch anspruchsvoll und sollen detaillierter betrachtet werden /ENSI 17/.

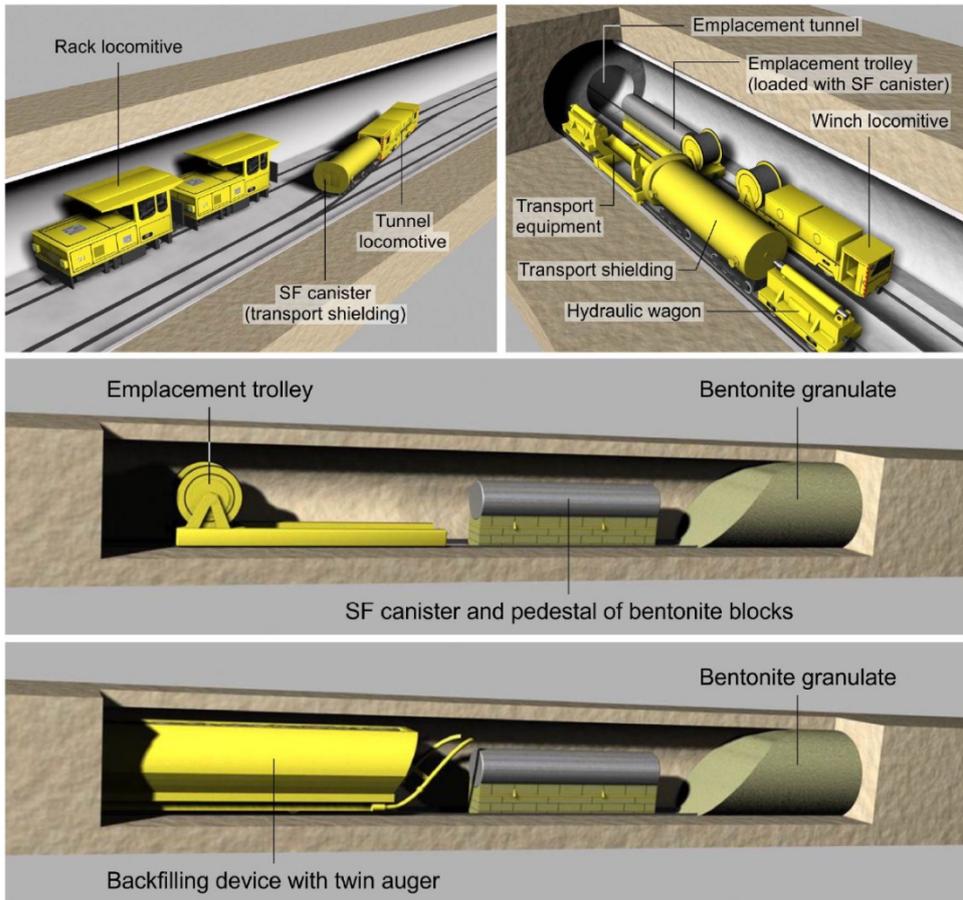


**Abb. 2.21** Endlagerbehälter mit Bentonitauflager /NOL 02/

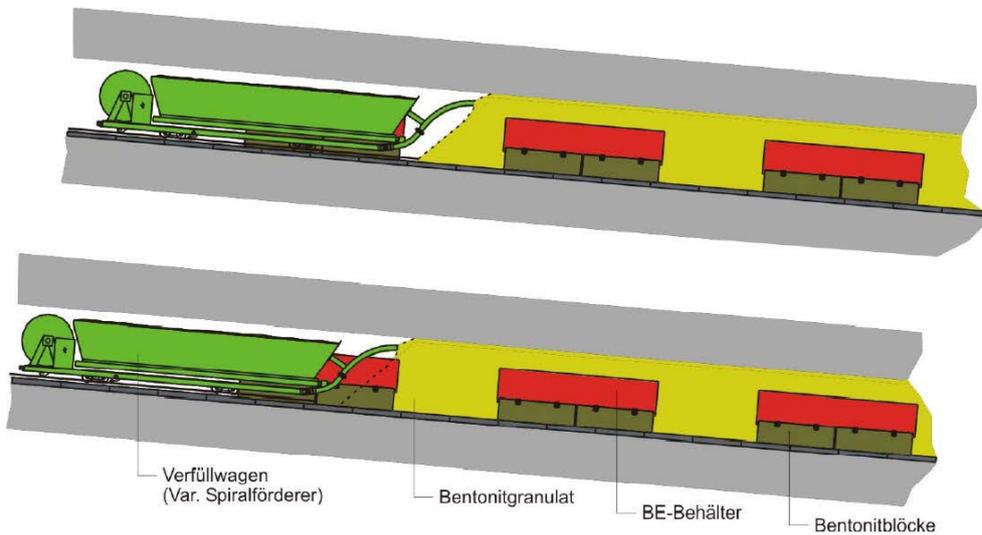


**Abb. 2.22** Exemplarische Einlagerungsstrecke für Behälter mit verglasten Abfällen (oben) und bestrahlten Brennelementen (unten) /GRI 02/

Die Hohlräume zwischen den Bentonitblöcken und dem Stoß bzw. First einer Einlagerungsstrecke werden mit Bentonitgranulat unmittelbar nach Einlagerung eines Endlagerbehälters verfüllt. Dieser Vorgang wird für jeden Endlagerbehälter wiederholt bis eine Einlagerungsstrecke vollständig gefüllt ist. Hierfür wird ein Verfüllwagen mit einem Spiralförderer eingesetzt, der das Bentonitgranulat einbläst (Abb. 2.24, Abb. 2.26).



**Abb. 2.23** Einlagerungsbetrieb /PAT 12/

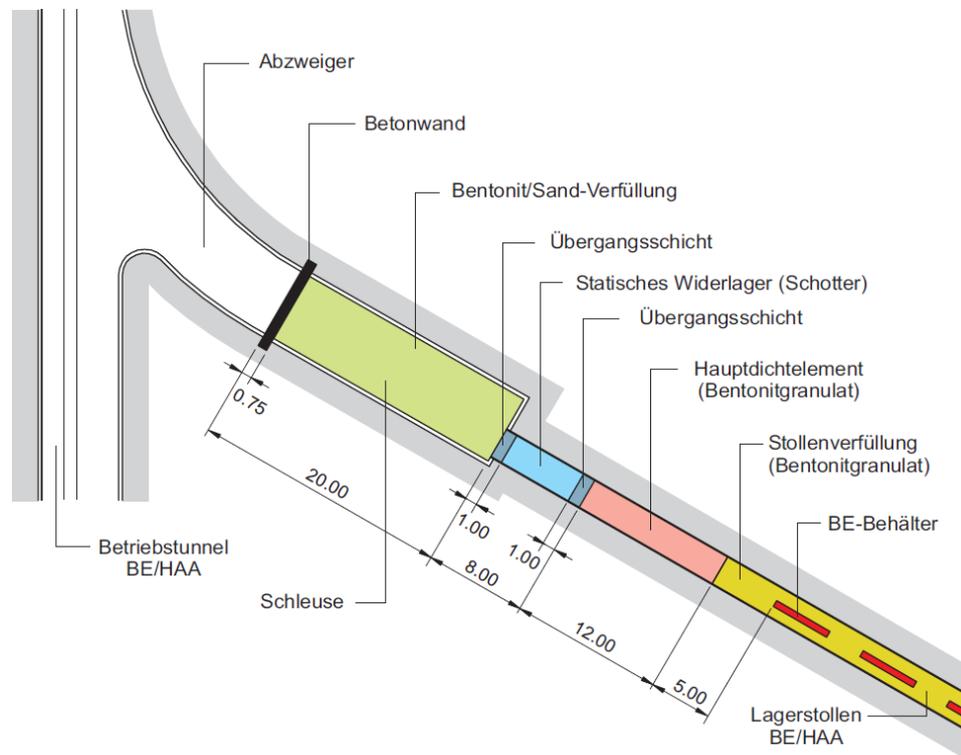


**Abb. 2.24** Verfüllen der Einlagerungsstrecken mit Bentonitgranulat /NOL 02/

Die zur Einlagerung notwendigen Schienen werden auf gekrümmten an den Stollendurchmesser angepassten Flachstahlschwellen in den Strecken fixiert. Diese verbleiben nach der Einlagerung in den Strecken um eine mögliche Rückholbarkeit zu erleichtern.

tern /NOL 02/. Durch eine mögliche Korrosion der Stahlschienen kann die Gasbildungsrate im Einlagerungsbereich erhöht werden. Die sich bildende Gasmenge durch die Korrosion der Stahlschienen ist im Vergleich zu der Gasbildung bei der Korrosion der Endlagerbehälter allerdings deutlich geringer /POL 16/. Zur Verringerung der Gasproduktion könnten dennoch alternative Bautechnologien entwickelt werden /NAG 17d/.

In der Schweiz wurden bisher im Wesentlichen nur konzeptionelle Untersuchungen zum Einlagerungskonzept sowie zur Einlagerungs- und Verfülltechnik durchgeführt. Praktische Erfahrungen zur Einlagerungstechnologie und zur Verfüll- und Verschluss-technologie stehen noch aus /ZIE 08/. Der Verschluss des Endlagers besteht aus einem System gestaffelter, passiver Sicherheitsbarrieren aus Streckenverfüllungen, Betonpfropfen und Versiegelungen /NAG 03/. An dem Übergang zwischen Einlagerungsstrecke und Betriebstunnel existieren sogenannte Versiegelungsstrecken (Abb. 2.25). Als Hauptdichtelement wird wie zur Stollenverfüllung Bentonitgranulat sowie eine Bentonit/Sand-Verfüllung genutzt, die von einer Betonwand abgeschlossen wird. Zwischen Bentonitgranulat und der Bentonit/Sand-Verfüllung wird ein statisches Widerlager aus Schotter eingebracht /NOL 02/.



**Abb. 2.25** Schematische Versiegelung der Einlagerungsstrecken /NOL 02/

/ENSI 17/ ist der Ansicht, dass die Ausführung möglicher Versiegelungsstrecken (inkl. Zwischensiegel) im bisherigen Konzept aus bautechnischer Sicht kritisch ist. Mit der Stützung durch Stahlbögen ist der Ausbauwiderstand eingeschränkt, wodurch größere Konvergenzen und das Wirtsgestein zusätzlich geschädigt werden kann. Durch die punktuelle Stützung kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Wirtsgestein über die Stahlbögen hinaus nachbricht. Hieraus ergeben sich Bedenken aus geo- und bautechnische Sicht sowie der Arbeitssicherheit (nach /EGT 16/ aus /ENSI 17/). Grundsätzlich sind die Zwischensiegel (ohne oder mit reduzierter Stollensicherung) bislang nicht weiter ausgeführt /ENSI 17/ und es ist offen inwiefern Zwischensiegel zwingend notwendig sind /NAG 16f/. Offene Punkte bestehen auch bzgl. der Herstellung eines satten Kontaktes zwischen Versiegelung und Gebirge. Eine vollständige Verfüllung ist bereits mit pumpfähigem Material (z. B. zementbasiertem Verfüllmittel) schwierig, mit einem losen Material wie Bentonitgranulat ist die Verfüllung zusätzlich anspruchsvoller (nach /EGT 16/ aus /ENSI 17/).

### **2.3.5 Pilotlager (Monitoring)**

Vor der Errichtung der Einlagerungsstrecken im Hauptfeld wird das Pilotendlager errichtet. Dieses besteht aus zwei Einlagerungsstrecken und einer Kontrollstrecke. Diese Strecken sind von beiden Seiten zugänglich und mit Messgeräten ausgerüstet /NOL 02/.

Das Pilotlager dient nach /KEV 04/ dazu, das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtsgesteins bis Ende der Beobachtungsphase zu überwachen. Die Ergebnisse der Überwachung im Pilotlager müssen auf die ablaufenden Prozesse im Hauptlager übertragbar sein. Diese bilden eine Grundlage für die Entscheidung über den Verschluss des Endlagers und auch über eine mögliche Rückholung der radioaktiven Abfälle. Die Auslegung des Pilotlagers erfolgt so, dass

- die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse mit denen im Hauptlager vergleichbar sind,
- eine räumliche und hydraulische Trennung vom Hauptlager erfolgt,
- die Bauweise und die Art der Einlagerung der Abfälle und der Verfüllung der des Hauptlagers entspricht,
- und es eine kleine, repräsentative Menge an Abfällen enthält.

Es ist sicherzustellen, dass Störfälle im Pilotlager die Betriebs- und Langzeitsicherheit des Hauptlagers nicht unzulässig beeinträchtigen und umgekehrt Störfälle im Hauptlager das Pilotlager nicht beeinflussen /ENSI 09b/. Die Einlagerung im Pilotlager erfolgt vor dem Einlagerungsbeginn im Hauptlager.

Das Überwachungskonzept für das Pilotlager muss Messungen zur zeitlichen Entwicklung enthalten, mit denen Aussagen

- über sicherheitsrelevante Zustände und Vorgänge im Pilotlager und in dessen geologischen Umfeld,
- über die frühzeitige Erkennung unerwarteter Entwicklungen,
- über die Wirksamkeit des Barrieresystems,
- und zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises möglich sind.

Falls aufgrund unerwarteter Entwicklungen der Zustand der Sicherheitsbarrieren des Pilotlagers bis zum Ende der Beobachtungsphase nicht mehr den Voraussetzungen des Sicherheitsnachweises genügt und eine zielführende Instandsetzung nicht mehr möglich ist, müssen die Abfälle aus dem Pilotlager in das Hauptlager umgelagert werden können /ENSI 09b/.

### **2.3.6 Testlager (Felslabor)**

Das Testlager dient als Felslabor und soll die standortspezifischen Untersuchungen zur Erlangung der Betriebsbewilligung des Endlagerbergwerkes ermöglichen. Das Testlager liegt inmitten des Opalinustons und soll somit repräsentative Untersuchungen für das Hauptlager zulassen /NOL 02/. Es ist vorgesehen Nischen und Kurzstollen einzurichten, ein genaues Konzept inklusive der durchzuführenden Tests soll während der Explorationsplanung standortspezifisch konkretisiert werden /NOL 02/. Hierbei soll auf Erfahrungen durch die Errichtung und den Betrieb des Felslabors Mont Terri zurückgegriffen werden /HUF 05/.

Grundsätzlich ist das Testlager so anzuordnen, das von Beginn der Bauphase bis hin zum Verschluss der Gesamtanlage Langzeittests durchgeführt werden können. Während der Einlagerungsphase erfolgt der Zugang mit Pneufahrzeugen, ansonsten auch via Adhäsionsbahn vom Zentralbereich aus. Ein weiterer Zugang via Bauschacht und Bautunnel ist denkbar /NOL 02/.

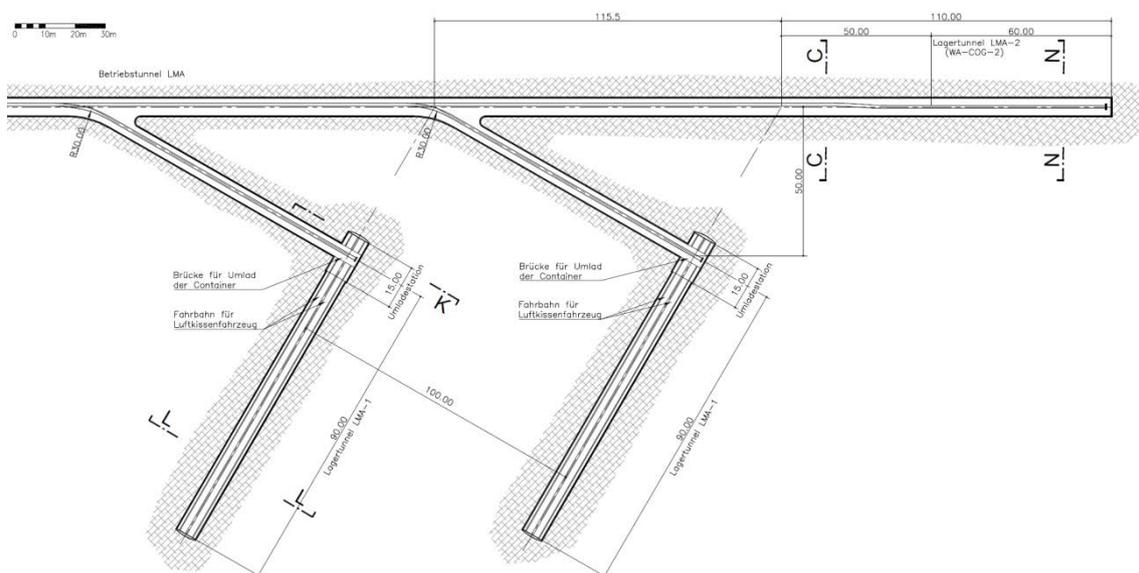
### 2.3.7 Lagerbereich (LMA)

Im Endlagerkonzept ist es vorgesehen neben HAA auch LMA in das Endlagerbergwerk einzubringen. Auf das Sicherheitskonzept zu diesem Co-Disposal wird in Kap. 2.8 näher eingegangen und im Folgenden die untertägige Infrastruktur beschrieben.

Es wird zwischen zwei unterschiedlichen LMA-Lagerbereichen unterschieden (LMA-1 und LMA-2). Diese Unterteilung wird vorgenommen, um Abfälle mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften räumlich zu separieren /NOL 02/.

LMA-1 besteht aus zwei Lagertunneln mit einer Länge von je ca. 90 m sowie einer Umladestation (Abb. 2.26). In der Umladestation soll der LMA von den Bahnwagen auf Luftkissenfahrzeuge umgeladen werden, mit denen die Abfälle in den Lagertunneln eingelagert werden. Ferner dient die Umladestation als Abstellort für das Luftkissenfahrzeug. Die LMA-Lagertunnel sind in N-S-Richtung angelegt. Als Felssicherungsmaßnahme ist ein einschaliger Ausbau bestehend aus Ankern und Spritzbeton vorgesehen /NOL 02/.

LMA-2 besteht aus einem Lagertunnel mit einer Länge von 60 m und stellt eine Verlängerung des Betriebstunnels dar /NOL 02/ (Abb. 2.26).



**Abb. 2.26** Zwei LMA-1-Lagertunnel mit Umladestation (links) und der LMA-2-Lagertunnel (rechts) /NOL 02/

Im Gegensatz zu dem Hauptlager für BE/HAA ist für LMA aufgrund der geringen und heterogenen Abfallmenge sowie den kleinen Abmessungen des LMA-Lagerbereichs

kein Pilotlager vorgesehen. Stattdessen wird ein LMA-Kontrollstollen vorgeschlagen, von welchem aus ein LMA-1-Lagertunnel überwacht werden kann /NOL 02/.

### **2.3.8 Haupttunnel**

Bei dem Begriff Haupttunnel handelt es sich im Endlagerkonzept der Schweiz um einen Sammelbegriff. Dieser beinhaltet

- den Betriebszugang zwischen Pilotlager, Zentralbereich und LMA-Lagertunnel,
- die Betriebstunnel in den Lagerzonen für BE/HAA und LMA,
- den Bauzugang zwischen Testlager, Rampe und Zentralbereich,
- der Bautunnel als Verlängerung des Bauzugangs bis hin zum Schachtfuß,
- und der Lüftungstunnel.

Die Querschnitte aller Tunnel sollen weitestgehend ähnlich sein um zusätzliche bautechnische Beanspruchungen zu vermeiden /ENSI 17/. Sie unterscheiden sich maßgeblich durch ihren Innenausbau und den Werkleitungen.

Der Betriebszugang und die Betriebstunnel sind sehr gering geneigt und ermöglichen einen Adhäsionsbetrieb auf Schienen mit Stromabnehmern und auch im Notfall ein Befahren mit schmalen Pneufahrzeugen.

Im Bauzugang und dem Bautunnel ist eine Befahrung nur mit Pneufahrzeugen möglich.

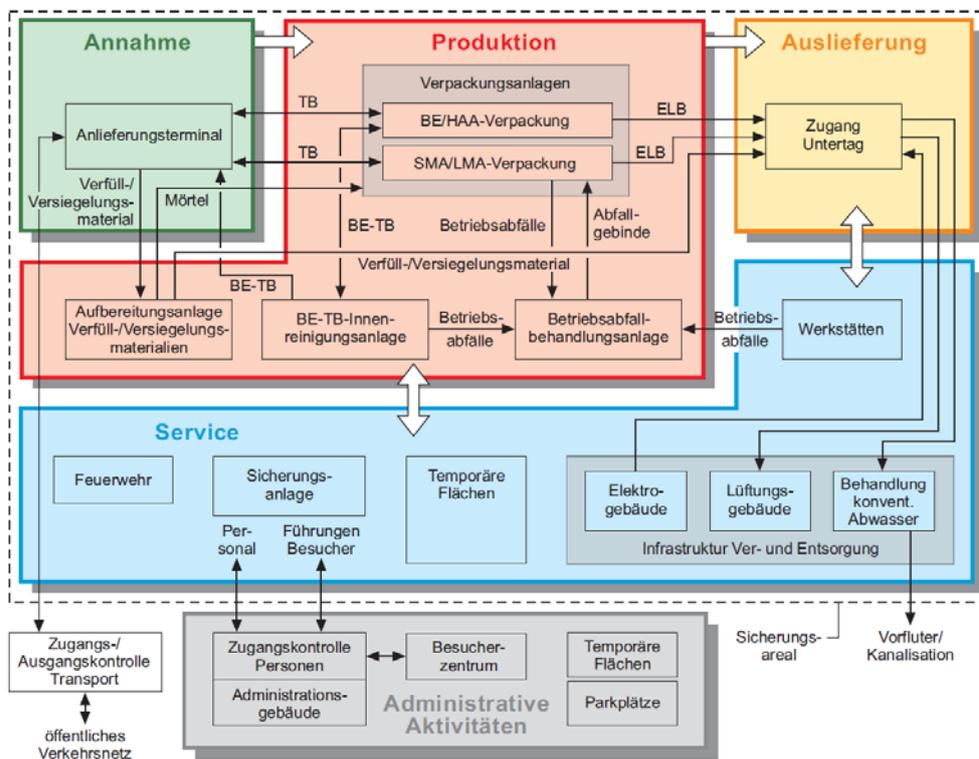
Der Lüftungstunnel dient dazu, die im Betrieb anfallende Verbrauchsluft zum Lüftungsschacht hinzuführen, der die Abluft an die Oberfläche transportiert. Der Lüftungstunnel dient ferner als Sicherheitsstollen für den Betrieb und Bau.

## **2.4 Obertägige Anlage**

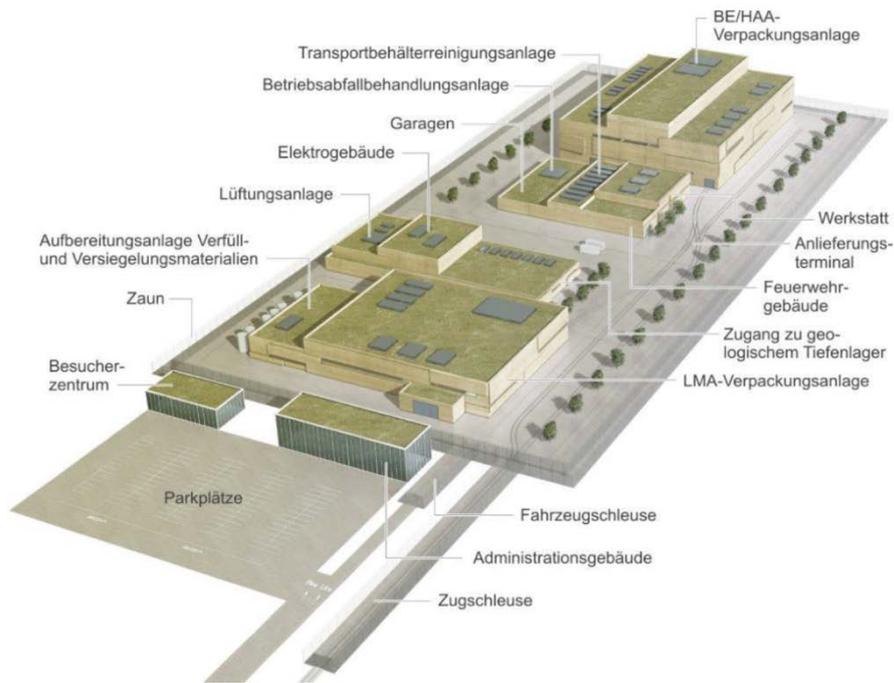
Die obertägige Anlage, auch Oberflächenanlage (OFA) genannt, umfasst die notwendigen Einrichtungen an der Erdoberfläche zur Realisierung des untertägigen Endlagers /BFE 13/ und ist so ausgelegt, dass innerhalb einer Betriebsdauer von 15 bis 20 Jahren sämtliche anfallenden radioaktiven Abfälle umverpackt und eingelagert werden

können. Insgesamt sind für die OFA acht Hektar als Flächenbedarf vorgesehen. Die OFA umfasst Funktionsbereiche (Abb. 2.27, Abb. 2.28, Abb. 2.29) zur

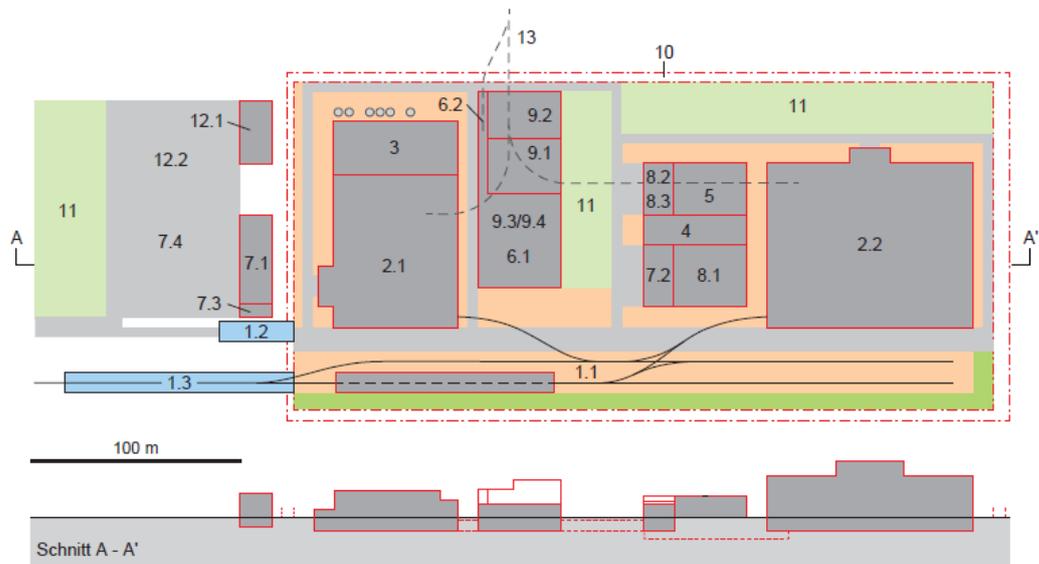
- Annahme der radioaktiven Abfälle (Zugangskontrolle, Anlieferungsterminal),
- Produktion d. h. Umverpackung der radioaktiven Abfälle (Verpackungsanlagen, Aufbereitungsanlage für Verfüll- und Versiegelungsmaterialien für LMA/SMA, Betriebsabfallbehandlungsanlage, Transportbehälter-Innenreinigungsanlage, Werkstattbereich, Labor),
- Auslieferung mit Übergang zur untertägigen Anlage,
- und den Servicebereiche bestehend aus Anlagen für die Sicherung, Administration, Werkfeuerwehr, Behandlung von konventionellen Abwässern, Elektronik und Belüftung.



**Abb. 2.27** Funktionsbereiche und Materialflüsse in der OFA /NAG 13/



**Abb. 2.28** Modellhafte Darstellung der OFA für ein Endlager für HAA /BFE 13/



- |   |  |
|---|--|
| 1. Anlieferungsterminal   | 9. Ver- und Entsorgungsinfrastruktur<br>(für Anlagen Untertag / Übertag) |
| 1.1 Anlieferungsterminal Bahn<br>mit Abstellhalle               | 9.1 Elektrogebäude   |
| 1.2 Anlieferungsterminal LKW<br>(Eingangsschleuse)              | 9.2 Lüftungsgebäude  |
| 1.3 Eingangsschleuse Bahn                                       | 9.3 Behandlungsanlage für<br>konventionelles Abwasser                    |
| 2. Verpackungsanlagen   | 9.4 Bergwasserbehandlungsanlage  |
| 2.1 SMA/LMA-Verpackungsanlage                                   | 10. Sicherheitsareal / überwachter Bereich                               |
| 2.2 BE/HAA-Verpackungsanlage                                    | 11. Fläche für temporäre Anlagen   |
| 3. Aufbereitungsanlage Verfüll- und<br>Versiegelungsmaterialien | 12. Anlagenbesichtigung  |
| 4. BE-TB-Innenreinigung (optional)                              | 12.1 Besucherzentrum   |
| 5. Betriebsabfallbehandlungsanlage                              | 12.2 Parkplätze Besucher   |
| 6. Zugang nach Untertag   | 13. Zugangstunnel  |
| 6.1 Zugang internes Transportsystem                             |  |
| 6.2 Zugang externes Fahrzeug                                    |  |
| 7. Administration   |  |
| 7.1 Administrationsgebäude                                      | --- Sicherungsareal mit Zaun   |
| 7.2 Feuerwehrgebäude  | ■ Versiegelte Fläche   |
| 7.3 Pforte  | ■ Temporäre Freifläche   |
| 7.4 Parkplätze Personal   | ■ Grünfläche   |
| 8. Zentrale Werkstätten   | ■ Schleuse   |
| 8.1 Werkstatt   | ■ Gebäude  |
| 8.2 Lager für Betriebsmittel                                    | ■ Interne Transportwege  |
| 8.3 Garagen   |  |

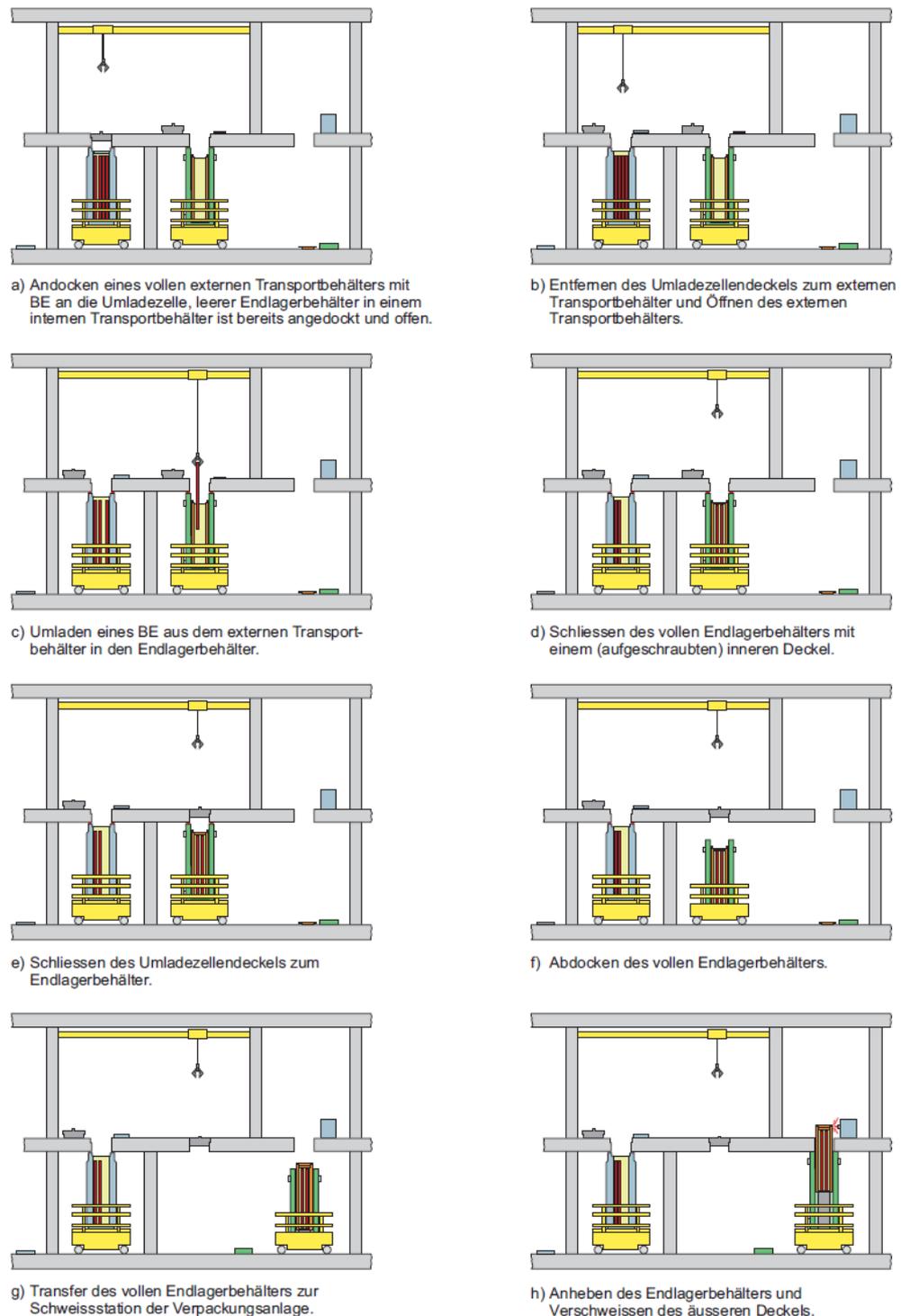
**Abb. 2.29** Schematische Darstellung der Funktionsbereiche der OFA /NAG 13/

### 2.4.1 Verpackungsanlagen

Im Funktionsbereich „Produktion“ der OFA sind zwei Verpackungsanlagen je für HAA und LMA vorgesehen, in denen die angelieferten radioaktiven Abfälle in Endlagerbehälter verpackt und für die Einlagerung vorbereitet werden. Im Falle eines Kombilagers

nimmt LMA-Verpackungsanlage ebenfalls die Aufgaben zur Verpackung der SMA-Abfallgebinde wahr, da die Gebindetypen von LMA und SMA vergleichbar sind und die gleichen Handhabungsschritte erforderlich sind /NAG 13/.

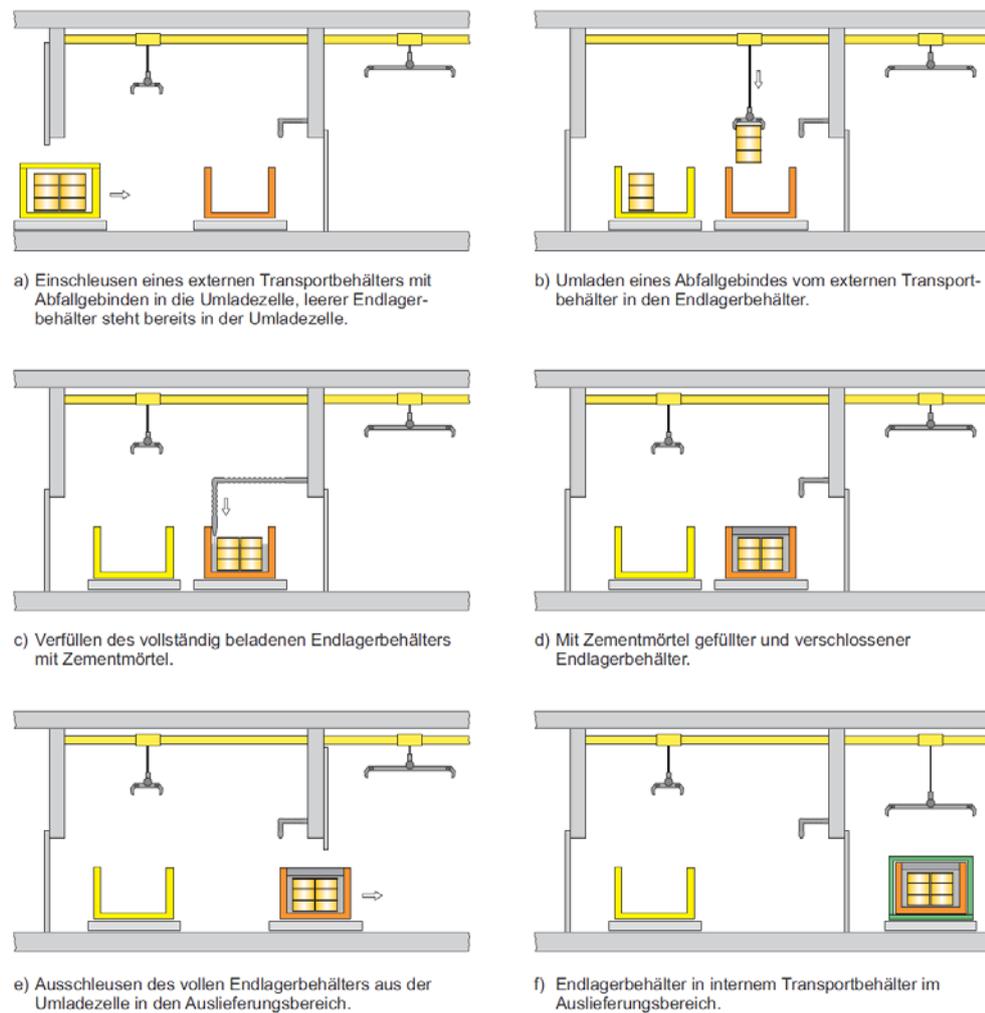
In der HAA-Verpackungsanlage (s. Abb. 2.29 Nr. 2.2) werden die HAA-Abfallgebinde (Bestrahlte Brennelemente und Kokillen mit verglasten Abfällen) in einer sogenannten Umladezelle (heiße Zelle) aus den externen Transportbehältern entnommen und in Endlagerbehälter umgeladen, die wiederum in einem abschirmenden internen Transportbehälter verpackt sind (Abb. 2.30). Anschließend werden die Endlagerbehälter kontrolliert und verschlossen. Die Umladezelle hat nach aktueller Planung /NAG 13/ vier der jeweils in Abb. 2.30 dargestellten Andockstationen, die parallel betrieben werden können. Dies gewährleistet einen angemessenen Durchsatz zur planmäßigen Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle. Ferner wird eine Redundanz geschaffen, die erlaubt eine Andockstation für den Unterhalt (z. B. Dekontamination), Intervention (z. B. Bergung eines beschädigten BE) oder Reparatur außer Betrieb zu nehmen und dennoch den planmäßigen Verpackungsbetrieb zu gewährleisten.



**Abb. 2.30** Prozess der Umladung der HAA aus den externen Transport- in die internen Transportbehälter in der Umladezelle /NAG 13/

In der LMA-Verpackungsanlage (s. Abb. 2.29 Nr. 2.1) werden die Abfallgebinde in der Umladezelle aus den externen Transportbehälter entnommen und in einen Endlagerbehälter aus Beton umgeladen (Abb. 2.31). Dieser wird anschließend mit Zementmör-

tel verfüllt und verschlossen. Anschließend wird der befüllte Endlagerbehälter in einen abschirmenden internen Transportbehälter umgeladen.



**Abb. 2.31** Prozess der Umladung der LMA aus den externen Transport- in die Endlagerbehälter in der Umladezelle /NAG 13/

## 2.4.2 Betriebsabfallbehandlungsanlage

Während des Betriebs des Endlagers fallen radioaktive Betriebsanfälle an. Hierzu gehören z. B. Abluftfilter der Umladezelle, Dekontaminationsmaterial, Verbrauchsmaterial für den Strahlenschutz und Rückstände aus der Behandlung von Abwässern aus der kontrollierten Zone. In der Betriebsabfallbehandlungsanlage (s. Abb. 2.29 Nr. 5) werden die radioaktiven Betriebsabfälle gesammelt und für den Transport zur Konditionierung vorbereitet. Aufgrund der geringen prognostizierten Menge an Abfällen sollen die radioaktiven Betriebsabfälle gemäß heutigem Planungsstand /NAG 13/ bei einer Dritt-firma konditioniert werden. Für den Betrieb des HAA-Endlagers werden 200 m<sup>3</sup> SMA-

Betriebsabfälle (konditioniert) prognostiziert. Falls die Dekontaminierung und Reinigung der externen HAA-Transportbehälter in der OFA erfolgt, erhöht sich das radioaktive Betriebsabfallvolumen auf ca. 350 m<sup>3</sup> /NAG 13/. Alternativ besteht als Option die Möglichkeit die radioaktiven Betriebsabfälle direkt in der Oberflächenanlage zu konditionieren und im Endlager einzulagern. In der Betriebsabfallbehandlungsanlage wird ferner ein Labor für Kontrollmessungen eingerichtet.

In der Betriebsabfallbehandlungsanlage werden ebenfalls konventionelle Betriebsabfälle gesammelt und zum Transport zu konventionellen Deponien vorbereitet. Die konventionellen Betriebsabfälle werden separat von den radioaktiven Betriebsabfällen gesammelt, gelagert und gehandhabt. Dies ermöglicht es auch die kontrollierte Zone nur für den Betriebsteil mit radioaktiven Betriebsabfällen auszuweisen.

#### **2.4.3      Aufbereitungsanlage für Verfüll- und Versiegelungsmaterialien**

In der Aufbereitungsanlage werden die Komponenten für die Verfüll- und Versiegelungsmaterialien gelagert und zur Nutzung vorbereitet (s. Abb. 2.29 Nr. 3). Hierzu gehören Bentonitgranulat, die Auflager aus kompaktiertem Bentonit für die HAA-Endlagerbehälter sowie die Materialien zur Herstellung des Zementmörtels (wie z. B. Sand, Zement und Betonzusatzmittel).

#### **2.4.4      BE-Transportbehälter-Innenreinigungsanlage**

In der BE-Transportbehälter-Innenreinigungsanlage (s. Abb. 2.29 Nr. 4) erfolgt ggfls. die Dekontamination der externen Transportbehälter. Dem heutigen Planungsstand nach /NAG 13/ soll die Dekontamination allerdings nicht in der OFA direkt erfolgen, sondern bei einer Drittfirma. Im Falle einer schwachen Aktivierung müssen die externen Transportbehälter zur Abklinglagerung temporär in der OFA zwischengelagert werden bevor sie freigemessen und konventionell entsorgt werden können.

#### **2.4.5      Service- und Administrationseinrichtungen**

Zu den Service-Einrichtungen der OFA gehören Sicherungsanlagen, Lüftungs- und Elektrogebäude, eine Behandlungsanlage für konventionelle Abwässer, Werkstätten, die Feuerwehr und temporäre Flächen /NAG 13/. Zur Administration gehören ferner Administrationsgebäude, das Besucherzentrum sowie Parkplätze.

Die Sicherungsanlagen dienen dem Objektschutz, an den noch im Rahmen des Bewilligungsverfahrens detaillierte Anforderungen gestellt werden. Grundsätzlich bestehen die Sicherungsanlagen aus einer Sicherungszentrale, Räume für das Wachpersonal, und Zaunanlagen mit Durchfahrtschutz sowie Perimeterschranke. Ferner sollen zur Verhinderung eines unbefugten gewaltsamen Zutritts weitere Sicherheitsvorkehrungen wie Personen- und Fahrzeugschleusen mit Überwachungssystemen errichtet werden.

Das Lüftungsgebäude dient der Belüftung der untertägigen Anlage und auch der OFA mit eigenständigen Lüftungsanlagen (Raumlüftung, Unterdruckstaffelung, Filter). Die Elektrogebäude stellen die Stromversorgung der unter- und obertägigen Anlage sicher und sind mit USV- und Ersatzstromeinrichtungen ausgestattet. Für Unterhalts- und Wartungsarbeiten sind Werkstätten, Magazine, Garagen und Lagerplätze für Betriebsmittel vorgesehen. Die Betriebsfeuerwehr besteht aus den Mitarbeitenden der Anlage, wodurch eine schnelle und ortskundige Intervention im Brandfall gewährleistet wird.

In der Behandlungsanlage für konventionelle Abwässer werden sämtliche Abwässer der unterschiedlichen Entsorgungspfade (s. Kap. 2.7) gesammelt und wenn notwendig behandelt. Falls das anfallende Bergwasser aufgrund seiner hydrochemischen Zusammensetzung und physikalisch-chemischen Eigenschaften nicht direkt in einen lokalen Vorfluter abgeleitet werden darf, wird das Bergwasser in der Behandlungsanlage entsprechend aufbereitet und anschließend in den lokalen Vorfluter abgeleitet.

## **2.5 Strahlenschutz zonen**

Durch die Festlegung von Strahlenschutz zonen wird eine sicherheitstechnische Maßnahme geschaffen, um eine unzulässige Strahlenexposition des Betriebspersonals, von Besuchern und der Bevölkerung in der Umgebung der kerntechnischen Anlage zu vermeiden. Nach /HSK 95/ gilt die untertägige Anlage und das gesamte eingezäunte Areal der obertägigen Anlage als überwachter Bereich, der sich in eine kontrolliert und unkontrollierte Zone aufteilt. Kontrollierte Zonen umfassen

- Arbeitsbereiche für den Umgang mit offenen radioaktiven Strahlenquellen,
- Bereiche mit der Überschreitung gewisser Konzentrationen in der Luft oder der Oberfläche nach /StSV 14/,
- Bereiche, in denen Personen durch externe Strahlenexposition eine effektive Dosis von mehr als 1 mSv pro Jahr akkumulieren können,

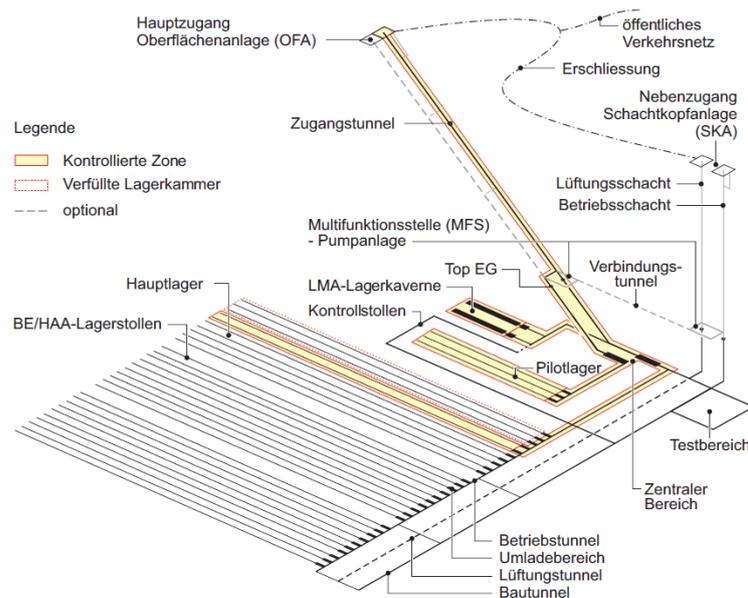
- Bereiche für den Betrieb von Anlagen ohne Vollschutzeinrichtung,
- und Bereiche, die von der Aufsichtsbehörde als solche bezeichnet werden.

Die kontrollierte Zone wiederum unterteilt sich in Zonen- und Gebietstypen /HSK 95/. Zonentypen unterteilen Bereiche anhand realistisch zu erwartender Oberflächen- und Luftkontamination mit dem Ziel Kontaminationsverschleppungen und Inkorporationen zu vermeiden. Innerhalb der Zonen werden Gebiete anhand der Ortsdosisleistung definiert mit dem Ziel die Personendosen aufgrund externer Bestrahlung möglichst niedrig zu halten.

Insgesamt sind vier unterschiedliche Zonentypen (I – IV) vorgesehen, für die unterschiedliche Luft- und Oberflächenkontaminationsgrade eingehalten werden müssen /HSK 95/. Die Zonen I und II werden als gelbe und die Zonen III und IV als rote Zonen bezeichnet. In den gelben Zonen sind die Kontaminationswahrscheinlichkeit und der vorhandene oder realistisch zu erwartende Kontaminationsgrad geringer als in den roten Zonen. Entsprechend sind die Tenuevorschriften in den roten Zonen mit höheren Auflagen verbunden als in den gelben Zonen. Ferner gelten strengere Zutrittsbedingungen und die Aufenthaltsdauer des Personals in roten Zonen ist geringer.

Im überwachten Bereich außerhalb der kontrollierten Zonen darf die Ortsdosisleistung für nichtberuflich strahlenexponierte Personen  $0,12 \mu\text{Sv/h}$  nicht überschreiten. An Orten ohne dauernden Aufenthalt liegt der Grenzwert bei  $0,6 \mu\text{Sv/h}$  /HSK 95/.

In der kontrollierten Zone werden in der untertägigen Anlage radioaktive Abfälle gehandhabt, wodurch sich bei der Einteilung der Strahlenschutz-zonen die in Abb. 2.32 dargestellte Aufteilung ergibt. Die kontrollierte Zone weist eine gerichtete Luftführung auf, die eine unkontrollierte Ausbreitung in den konventionellen Bereich hinein verhindern soll. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Abluft aus der kontrollierten Zone über das Hauptzugangsbauwerk und nicht über die Nebenzugangsbauwerke erfolgt. Am Übergang zwischen der kontrollierten Zone und dem konventionellen Bereich werden ggfls. Filteranlagen und Schleusen eingerichtet um eine Kontaminationsverschleppung zu vermeiden /NAG 16d/. Eine genaue Einteilung der kontrollierten Zone in der untertägigen Anlage in Zonen- und Gebietstypen ist zum derzeitigen Planungsstand noch nicht beschrieben und wird im zukünftigen Verfahren bei der Standortkonkretisierung in einem Konzept erarbeitet werden.



**Abb. 2.32** Strahlenschutzonen während des Einlagerungsbetriebs /NAG 14b/

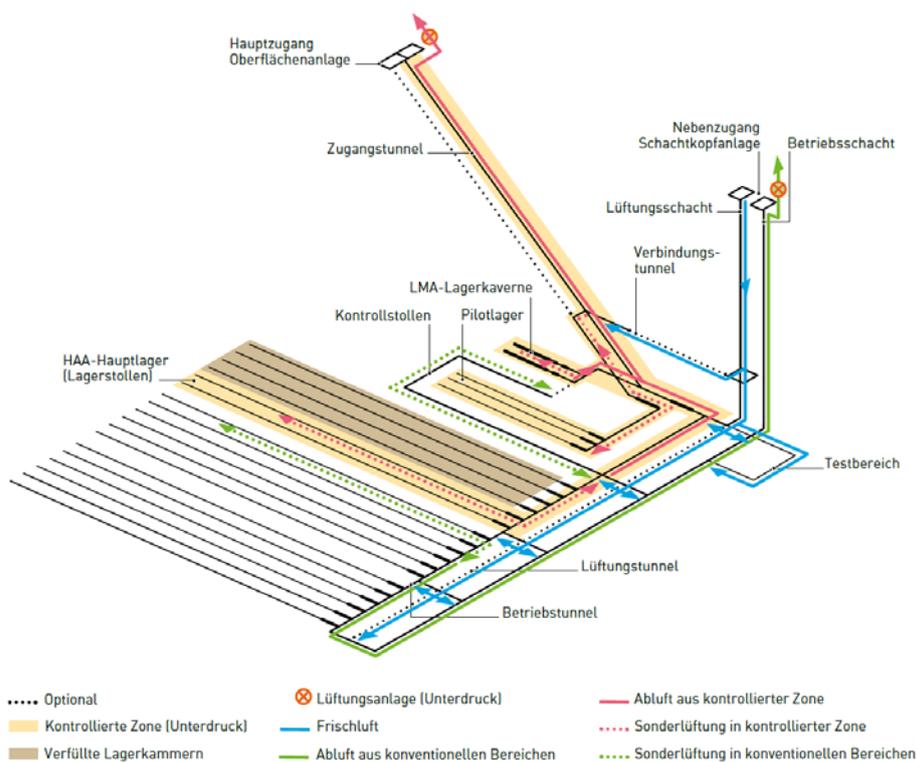
Die gesamte obertägige Anlage mit Ausnahme der temporären Flächen, der Pforte, den Eingangsschleusen für LKW und Bahn sowie des Besucherzentrums und der Parkplätze für Besucher und Personal ist umzäunt und liegt im überwachten Bereich. Innerhalb dieses überwachten Bereiches wird eine kontrollierte Zone eingerichtet. In der kontrollierten Zone liegen die Verpackungsanlagen, die optionale BE-Transportbehälter-Innenreinigungsanlage sowie Teile der Lüftungs- und Elektrogebäude und Werkstätten. Eine genaue Einteilung der kontrollierten Zone in der obertägigen Anlage in Zonen- und Gebietstypen ist zum derzeitigen Planungsstand noch nicht beschrieben und wird im zukünftigen Verfahren bei der Standortkonkretisierung in einem Konzept erarbeitet werden.

## 2.6 Bewetterungskonzept

Ein Bewetterungskonzept verfolgt das Ziel um eine ausreichende Frischluftzufuhr zu gewährleisten und die Abluft zur Geländeoberfläche abzuführen. Ferner dient die Frischluftzufuhr geeignete klimatische Bedingungen einzuhalten (z. B. Sauerstoffgehalt, Staubkonzentration, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, sowie Vermeidung unzulässig hoher Gaskonzentrationen /NAG 16d/). Weiterhin soll die Lüftung den Feuchtigkeitseintrag in das tonreiche Wirtsgestein gering halten /NAG 14b/. Bei der Auslegung des Bewetterungskonzeptes werden die Anforderungen nach /NAG 08b/ bezüglich:

- der klimatischen Verhältnisse (Gesundheitsschutz),
- des Strahlenschutzes,
- der Verhütung von Unfällen durch Erdgas /SUVA 02/,
- einer Ereignisbelüftung im Brandfall,
- und den Wärmelasten im Bergwerk (Gebirgstemperatur, Wärmeabgabe von Baugeräten, Endlagerbehälter) berücksichtigt.

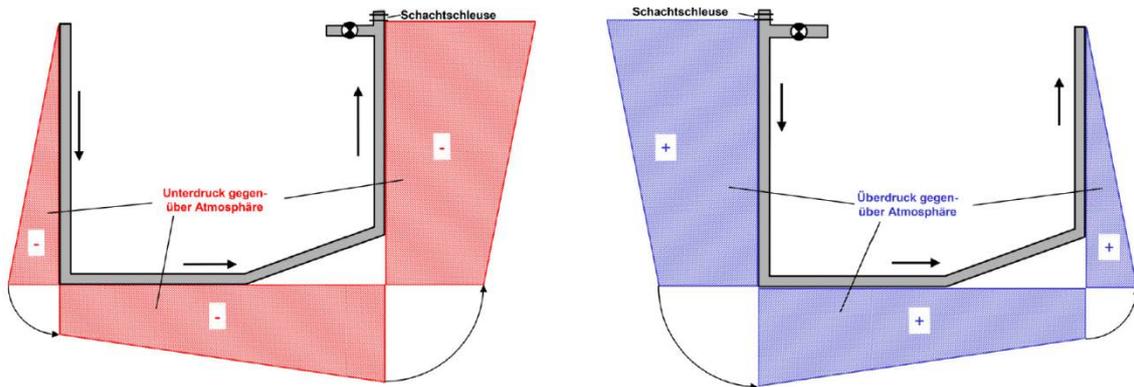
Das derzeitige Bewetterungskonzept (Abb. 2.33) sieht vor, dass die Frischluftzufuhr und die Abluftabfuhr über die Zugangsbauwerke erfolgt /NAG 16b/. Die Frischluft gelangt über den Lüftungsschacht zur Lagerebene und in den Zentralbereich. Die Abluft aus der kontrollierten Zone gelangt über das Hauptzugangsbauwerk zur Oberflächenanlage und die Abluft aus den konventionellen Bereichen über den Betriebsschacht.



**Abb. 2.33** Bewetterungskonzept mit Strahlenschutz zonen /NAG 16b/

Grundsätzlich ist für das Bewetterungskonzept eine saugende oder eine blasende durchschlägige Bewetterung möglich /NAG 16d/. Bei einer saugenden Bewetterung wird ein Unterdruck und bei einer blasenden Bewetterung ein Überdruck gegenüber der Atmosphäre erzeugt (Abb. 2.34). Die Lüftungsanlage befindet sich an der Schacht-

schleuse, durch die bei einer saugenden Bewetterung eine Abgabe des Wetters kontrolliert an die Umwelt abgegeben wird. Im derzeitigen Planungsstand ist im Einlagerungsbetrieb eine saugende Bewetterung über die freien Querschnitte vorgesehen /NAG 16d/. Hierfür werden Lüftungsventilatoren am oberen Ende der Ablauf-Bauwerke (Hauptzugang Oberflächenanlage bzw. Betriebsschacht) angebracht, die einen kontrollierten Unterdruck im Endlagerbergwerk erzeugen und dadurch Frischluft durch den Lüftungsschacht anziehen.



**Abb. 2.34** Saugendes (links) und blasendes Lüftungskonzept /FRI 16/

Für die Frischluftzufuhr ist während der Einlagerungsphase ein Lüftungsschacht vorgesehen, da dieser im Vergleich zu einem Tunnel eine kürzere Wegstrecke zwischen Geländeoberfläche (Frischluftquelle) und Lagerebene darstellt. Durch eine kürzere Wegstrecke erreicht die Frischluft die Lagerebene möglichst kühl, da die Luft durch den natürlichen geothermischen Gradienten untertäglich zunehmend erwärmt wird /NAG 16d/. Zur Unterstützung der Frischluftversorgung bei Störfällen (z. B. Brandfall) besitzt die Schachtkopfanlage weitere ober- und unterirdische Ventilatoren, die bei Bedarf zugeschaltet werden können.

Während des Parallelbetriebs zwischen Bau und Einlagerung (Bauetappe 3) ist für zusätzliche Vorkehrungen bzgl. der Dimensionierung der Lüftung und des Kühlungsbedarfes nach zu sorgen. Als zusätzliche Maßnahme wird der Einbau einer Druckluftversorgung (z. B. in einem in die Sohle einbetonierten Rohr) empfohlen /HUF 05/.

Zusammenfassend besteht die oberflächennahe Belüftungseinrichtung für den Lüftungsschacht aus /NAG 16d/

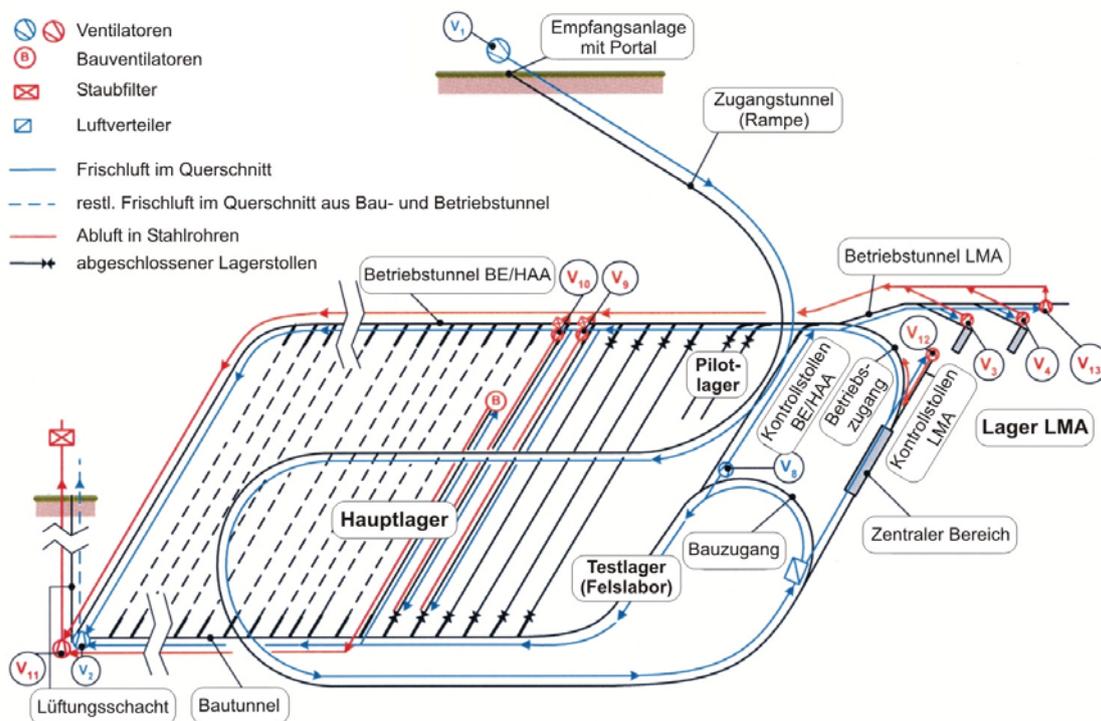
- Frischluft-Ansaugöffnung(en) und –bauwerk(en),
- bei Bedarf zuschaltbare Unterstützungs-Ventilatoren in einem Ventilatorenraum,

- einem Frischluftkanal zur Verbindung zwischen Frischluftansaugung, Ventilatorenraum und Lüftungsschacht,
- und Überwachungs- und Sicherheitssystemen.

Für den Betriebsschacht sind

- ein Lüftungsraum mit Abluftventilatoren (redundant, mit Ersatzstromanschluss),
- ein Abluftbauwerk und Abluftaustrittsöffnungen mit Überwachung (Messtation),
- ein Abluftkanal zur Verbindung zwischen Betriebsschacht, Ventilatorenraum und Abluftbauwerk,
- eine Schachtschleuse
- und Überwachungs- und Sicherungssysteme notwendig.

Ein älteres Bewetterungskonzept sah vor während des Einlagerungsbetriebs die den Zugangstunnel zur Frischluftzufuhr und die Schächte zur Abluftabfuhr zu nutzen (Abb. 2.35).



**Abb. 2.35** Bewetterungskonzept für die untertägige Anlage während der Einlagerung von BE/HAA /NOL 02/

Natürliche Erdgasvorkommen und die damit verbundene Explosionsgefahr stellen für den Bau, Betrieb und Verschluss eines Endlagers u. a. eine potentielle Gefährdung für das Betriebspersonal dar /SCH 08/. Die schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA) hat zur Verhütung von Unfällen durch Brände und Explosionen bei der Erstellung von untertägigen Anlagen ein technisches Merkblatt entwickelt, das auch Rahmen des schweizerischen Standortauswahlverfahrens angewendet wird /SUVA 02/. Das Vorkommen von natürlichen Gasvorkommen wird hiernach in fünf unterschiedliche Gefahrenstufen eingeordnet (Abb. 2.36). Im schweizerischen Standortauswahlverfahren ist festgelegt, dass keine natürlichen Gasvorkommen der Gefahrenstufe 4 in der Nähe des Endlagers existieren dürfen, um einen erhöhten Gaszutritt in das Endlager zu verhindern /ZUI 08/ und bei einem stark verzweigten Stollensystem den Bewetterungsaufwand zu reduzieren /EID 10/, /ENSI 10c/.

Gefahrenstufe	Möglichkeit eines Gasvorkommens	Möglichkeit einer Überflutungsgefahr	zu erwartendes Ausgasverhalten
0	nicht gegeben	–	–
1	Gasvorkommen möglich oder sicher	keine Überflutungsgefahr	Ausgasen während kurzer Zeit
2			Ausgasen während langer Zeit
3		mit Überflutungsgefahr	Ausgasen während kurzer Zeit
4			Ausgasen während langer Zeit

**Abb. 2.36** Gasgefahrenstufen bei der Erstellung einer untertägigen Anlage /SUVA 02/

In Gefahrenstufe 4 sind Gasvorkommen in der zu untersuchenden Gesteinsformation möglich oder sind bereits gesichert nachgewiesen („möglich oder sicher“) und besitzen eine Überflutungsgefahr mit Ausgasung aus der Gesteinsformation in die Grubenbaue über einen langen Zeitraum. Als Überflutungsgefahr wird das Austreten von Gas in großen Mengen pro Zeiteinheit aus dem Gestein, aus Klüften oder anderen Hohlräumen verstanden, das bei einer Bewetterung mit einer Lüftungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s dennoch zu einer Überschreitung des Grenzwertes von 1,5 Vol-% Methan führt /SUVA 02/. Als sehr günstige Eigenschaft wird die Gefahrenstufe 0 empfohlen /ZUI 08/, d. h. die Möglichkeit eines Gasvorkommens ist nicht gegeben /SUVA 02/. Falls Gasvorkommen im Wirtsgestein möglich sind, sollte eine Überflutungsgefahr ausgeschlossen

sen werden und ein Ausgasen nur während kurzer Zeit erfolgen /ZUI 08/. Diese Forderung entspricht den Gefahrenstufen 2 bzw. 3 (Abb. 2.36).

## 2.7 Ver- und Entsorgungskonzept (Wasser, Energie)

Durch ein Konzept zur Wasserhaltung wird die Abwasserentsorgung geregelt. Hierzu gehört das kontrollierte Sammeln, ggfls. Reinigen und Ableiten anfallender Wässer im Normalbetrieb und bei Störfällen. Hierdurch wird eine großflächige Ausbreitung in der untertägigen Anlage verhindert und im Störfall eine kontrollierte Flucht, Rettung und Evakuierung ermöglicht /NAG 14b/. Grundsätzlich wird nach /NAG 16d/ zwischen

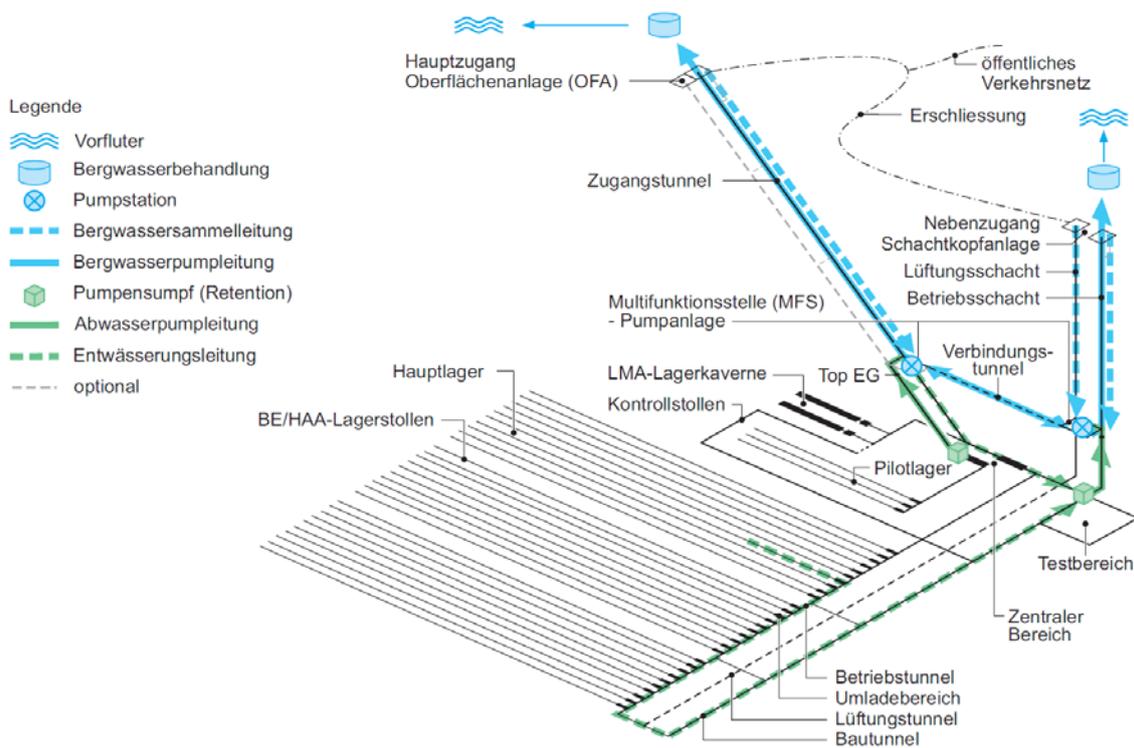
- konventionellem Abwasser (Brauch- und Trinkwasser),
- Abwasser aus untertägigen Baustellen,
- Bergwasser aus den geologischen Schichten,
- Oberflächenabwasser (z. B. Regenwasser, Hangsickerwasser)
- und Interventionswasser im Brandfall unterschieden.

Grundsätzlich soll die Abwasserableitung der unterschiedlichen Abwassersorten aufgrund unterschiedlicher Behandlungsnotwendigkeiten separat erfolgen. Im derzeitigen Konzept zur Abwasserführung (Abb. 2.37) wird ggfls. allerdings nicht zwischen konventionellen Abwässern und dem Bergwasser unterschieden. Dies wird standortspezifisch aufgrund der Bergwassermenge und dessen physikalisch-chemischer Eigenschaften festgelegt /NAG 16d/. Das Pumpsystem wird redundant ausgelegt, d. h. dass zwei Pumpenanlagen mit Förderpumpleitungen über zwei separate Zugangsbauwerke (z. B. Zugangstunnel und Betriebsschacht) bis an die Oberfläche geführt werden. Beide Pumpförderleitungen werden miteinander verbunden, allerdings sind diese so ausgelegt, dass jedes Pumpsystem in einem Störfall die gesamte anfallende Abwassermenge fördern könnte /NAG 14b/.

Auf der Lagerebene wird sehr wenig Sickerwasser erwartet, da im Wirtsgestein Opalinuston trockene Verhältnisse vorliegen /NAG 16d/. Das in den Zugangsbauwerken anfallende Abwasser (überwiegend Bergwasser) wird in Pumpensümpfen zwischengelagert und mit Sumpfpumpen in die Abwassersysteme gefördert oder bei einem geringen Abwasservolumen mittels mobiler Einrichtungen entsorgt (z. B. Tank- oder Saugwagen) /NAG 14b/. Die Bergwassermenge aus den Zugangsbauwerken wird dadurch re-

duziert, dass in den Bereichen wasserführender Schichten ein zweischaliger Ausbau mit Wasserisolation und Injektionen geplant ist /ZIE 08/.

Anspruchsvoll für das Abwassersystem sind insbesondere die Kalke des Oberen Malm, die durch lokale Karsterscheinungen wassererfüllte Hohlräume besitzen können. Zur Minimierung des Risikos von Wassereintrüben empfiehlt /HUF 05/ daher die Ausführung von Erkundungsbohrungen. Im gesamten oberen Malm ist mit verstärktem Einsatz von Gebirgsinjektionen sowohl zur Abdichtung wasserführender Zonen als auch zur Verfestigung im Bereich von Störungen zu rechnen.



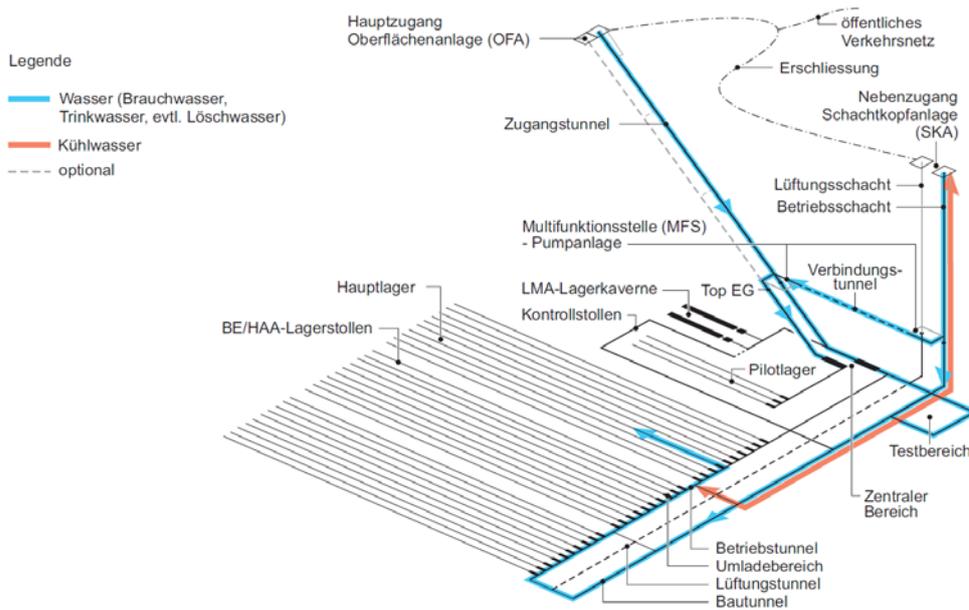
**Abb. 2.37** Abwasserentsorgung während des Einlagerungsbetriebs /NAG 16d/

Eine vollständige Abwasserentsorgungseinrichtung während der Betriebsphase sieht nach dem derzeitigen Konzept /NAG 16d/

- Abwassersammelanlagen grundsätzlich separiert nach Abwassertyp,
- ein Absatzbecken bzw. Neutralisierungsanlage für Abwässer aus kontrollierten Bereichen,
- ausreichende Rückhaltevolumen (z. B. für das Auffangen von Löschwasser),
- Überwachungs- und Sicherheitssysteme z. B. bei Einleitung konventioneller Abwässer in eine Kanalisation oder in einen Vorfluter,
- und eine Abwasserableitung inkl. Pumpenstation vor.

Entsprechend dem derzeitigen Konzept zur Wasserversorgung (Abb. 2.38) ist eine zweisträngige Versorgung über separate Zugangsbauwerke vorgesehen. Die Hauptversorgung erfolgt über die Oberflächenanlage über das Hauptzugangsbauwerk und ist so auszulegen, dass im Störfall ausreichend Löschwasser in die untertägige Anlage transportiert werden kann. Hierfür werden ggfls. spezifische Trockenwasserleitungen verlegt, deren Ausarbeitung im derzeitigen Endlagerkonzept noch nicht vorgesehen sind /NAG 16d/. Bei der Auslegung des Wasserversorgungskonzeptes sind standort-spezifisch

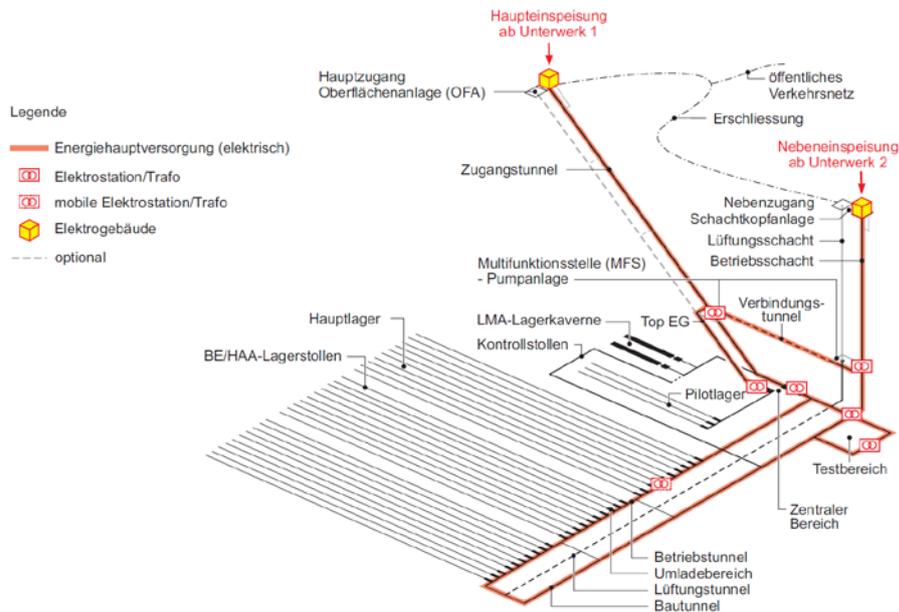
- die Einspeisung aus der lokalen Wasserversorgung unter Berücksichtigung der benötigten Wassermenge auf die lokalen Wasserversorgungseinrichtungen,
- die Anzahl, Dimensionierung und Platzierung von Wasserverteileranlagen,
- und die Wasserbevorratung bzw. das Löschwasserreservoir zu berücksichtigen.



**Abb. 2.38** Wasserversorgung während des Einlagerungsbetriebs /NAG 16d/

In Abb. 2.39 ist die wesentliche untertägige Energieversorgung während des Einlagerungsbetriebes dargestellt. Es ist eine redundante Stromversorgung über separate Zugangsbauwerke vorgesehen /NAG 16d/. Die Hauptversorgung soll hierbei über die Oberflächenanlage über das Hauptzugangsbauwerk erfolgen. Aus Gründen der Energieversorgung sind die Gründe für die Wahl der Zugangsbauwerke unwesentlich. Vorgesehen ist allerdings der Anschluss der Nebenzugangswerke an ein Ersatzstromnetz, um auch im Störfall z. B. die Pumpen betreiben zu können. Insgesamt besteht eine redundante Stromversorgung aus

- obertägigen Anlagengebäuden mit Transformatoren und Stromverteilanlagen mit Überwachungs-, Steuerungs- und Sicherheitssystemen,
- der Einspeisung aus der lokalen Energieversorgung,
- und einer Ersatzstromanlage mit Dieselgenerator.



**Abb. 2.39** Energieversorgung während des Einlagerungsbetriebs /NAG 16d/

## 2.8 Co-Disposal

Nach dem Sachplan geologische Tiefenlager ist anstatt der Errichtung von zwei Lagern (je eins für HAA und SMA) auch ein sogenanntes Kombilager (Co-Disposal) möglich, in dem alle Abfallkategorien am selben Standort eingelagert werden /BFE 08/.

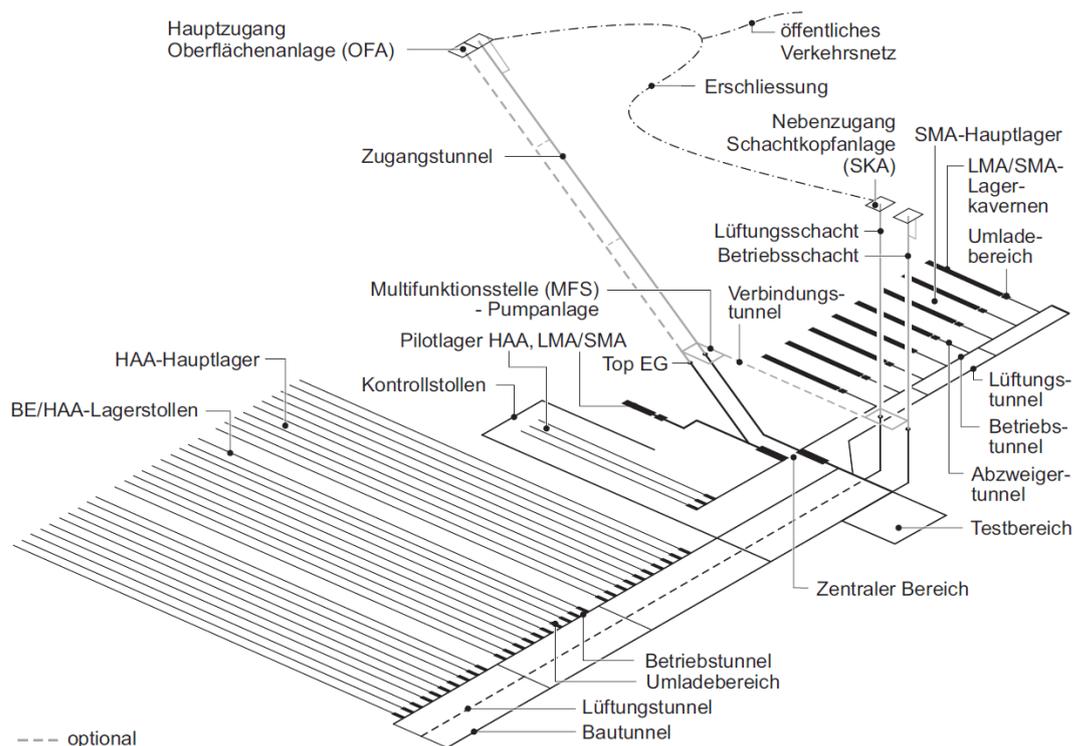
Bislang erfolgte im Rahmen des Sachplanverfahrens noch keine detaillierte Diskussion der Vor- und Nachteile eines Kombilagere /ENSI 14/. Problematisch könnten beispielsweise Wechselwirkungen sein, welche durch die Wärmeentwicklung der HAA oder der vielfältigen chemischen Zusammensetzung der SMA (Gasbildung) entstehen könnten.

Vorteile ergeben sich durch genutzte Synergieeffekte wie der gemeinsamen Nutzung der obertägigen Anlage /ZUI 08/. Ferner würden durch die Nutzung derselben Zugangsbauwerke die geologischen Schichten zwischen der untertägigen Anlage und der Biosphäre weniger oft durchbohrt werden und sicherheitstechnische Vorteile entstehen. Die Lagerkammern für HAA und SMA könnten entweder in der gleichen oder in unterschiedlichen Wirtsgesteinen erstellt werden /SCH 08/.

Falls ein Kombilager errichtet wird, sollen die Lagerfelder mit den Lagerkammern des HAA-Lagers und des SMA-Lagers räumlich getrennt sein. Es dürfen durch mögliche gegenseitige Wechselwirkungen keine signifikanten Auswirkungen auf die Langzeitsi-

cherheit bestehen, d. h. aus Sicht der Langzeitsicherheit stellen beide Lagerfelder zwei unabhängige Lager dar. Oberirdisch würde sich die Anzahl der Zugänge durch ein Kombilager reduzieren, denkbar ist ein doppelröhriger langgestreckter Tunnel als Zugangsbauwerk /NAG 16d/. Unterirdisch bliebe die Anzahl der Zugänge allerdings gleich, da pro Lagerteil separate Abzweiger errichtet würden (Abb. 2.40). Nach aktuellem Planungs- und Wissensstand ist die Bedeutung der zusätzlichen Zugangsstollen und ggfls. Schächte bei geeigneter Auslegung unbedeutend für die Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre /JOH 02/, /NAG 10/, /ZUI 94/.

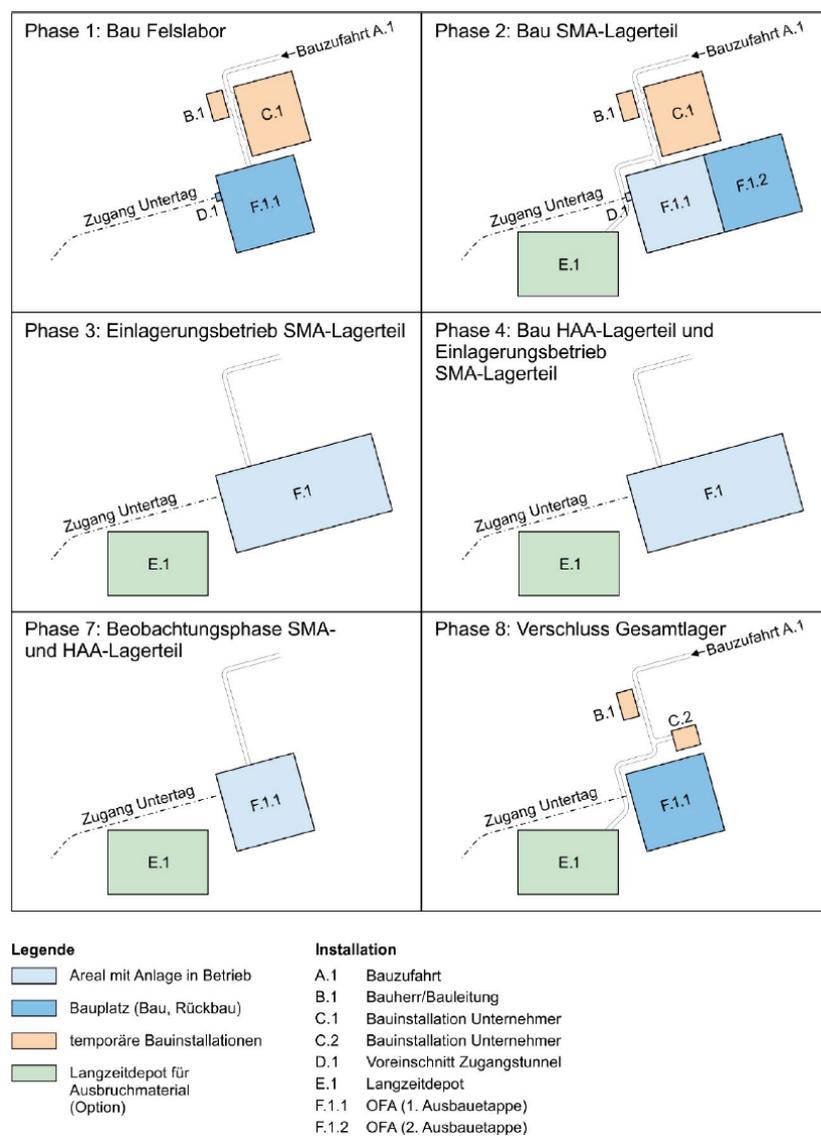
Da unzulässige gegenseitige Beeinflussungen der Abfalltypen ausgeschlossen werden müssen, ist die Sicherheit für ein Kombilager gleich zu beurteilen wie für zwei separate Endlager. Lediglich für die Nuklidfreisetzung und die resultierenden Dosen werden die beiden Teillager gesamtheitlich betrachtet /ENSI 14/. Aus technischer Sicht ist für ein Kombilager vor allem das untertägige Platzangebot von Bedeutung, das groß genug sein muss um unzulässige gegenseitige Beeinflussungen ausschließen zu können.



**Abb. 2.40** Beispielhafte Systemskizze für ein Kombilager /NAG 16d/

Der Bau und Betrieb eines Kombilagers soll in acht Phasen unterteilt werden (Abb. 2.41). In der ersten Phase werden neben Teile der Oberflächenanlage die Zugangsbauwerke und das Testlager (Felslabor) errichtet. Hierbei gibt es bis auf bauliche Aspekte keine wesentlichen Unterschiede zum Ablauf der Errichtung eines reinen

HAA-Endlagers. Anschließend erfolgen der vollständige Bau des SMA-Lagerteils und gleichzeitig untertägige Untersuchungen zur Vorbereitung des Baus des HAA-Lagerteils (Phase 2). Nach Bau des SMA-Lagerteils werden die SMA eingelagert und die Betriebsphase beginnt (Phase 3). Zeitlich parallel zur SMA-Einlagerung wird mit dem Bau des HAA-Lagerteils begonnen (Phase 4) und nach Abschluss der SMA-Einlagerung beginnt die Betriebsphase für die Einlagerung der HAA und gleichzeitig der Verschluss des SMA-Lagerteils (Phase 5). Abschließend erfolgt analog zur Vorgehensweise für ein reines HAA-Endlager der Verschluss des HAA-Hauptlagers (Phase 6) und die Beobachtungsphase beginnt (Phase 7) bis die gesamte untertägige Anlage verschlossen und die Oberflächenanlage zurückgebaut wird (Phase 8).



**Abb. 2.41** Realisierungsphasen für ein Kombilager (Phasen 5 & 6 fehlend) /NAG 14d/

## 2.9 Rückholbarkeit

Für das schweizerische Endlagerkonzept ist im Kernenergiegesetz /KEG 03/ seit 2003 eine Rückholungsoption für hoch radioaktive Abfallstoffe aus einem tiefengeologischen Endlager gesetzlich vorgeschrieben. Nach Art. 37 (1b) wird die Betriebsbewilligung erteilt, wenn die Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss ohne großen Aufwand möglich ist. Ferner gilt nach Art. 11 (2c), dass ein geologisches Tiefenlager so auszulegen ist, dass Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen des Lagers oder zur Rückholung der Abfälle die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss nicht beeinträchtigen. Vor Inbetriebnahme des geologischen Tiefenlagers sind im Testlager die sicherheitsrelevanten Techniken zu erproben und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen (Art. 65), insbesondere das Entfernen des Verfüllmaterials zwecks allfälliger Rückholung von Abfallgebinden (2b) und die Technik zur Rückholung von Abfallgebinden (2c). Die Verfüllung ist nach Art. 67 (2) so vorzunehmen, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet und eine Rückholung der Abfälle ohne großen Aufwand möglich ist.

Nach /EKRA 00/ sind fünf unterschiedliche Gründe denkbar, dass eine Rückholung veranlasst wird. Diese sollen in Hinblick auf die Rahmenbewilligung des Endlagers für unterschiedliche Szenarien näher untersucht werden /NAG 08b/:

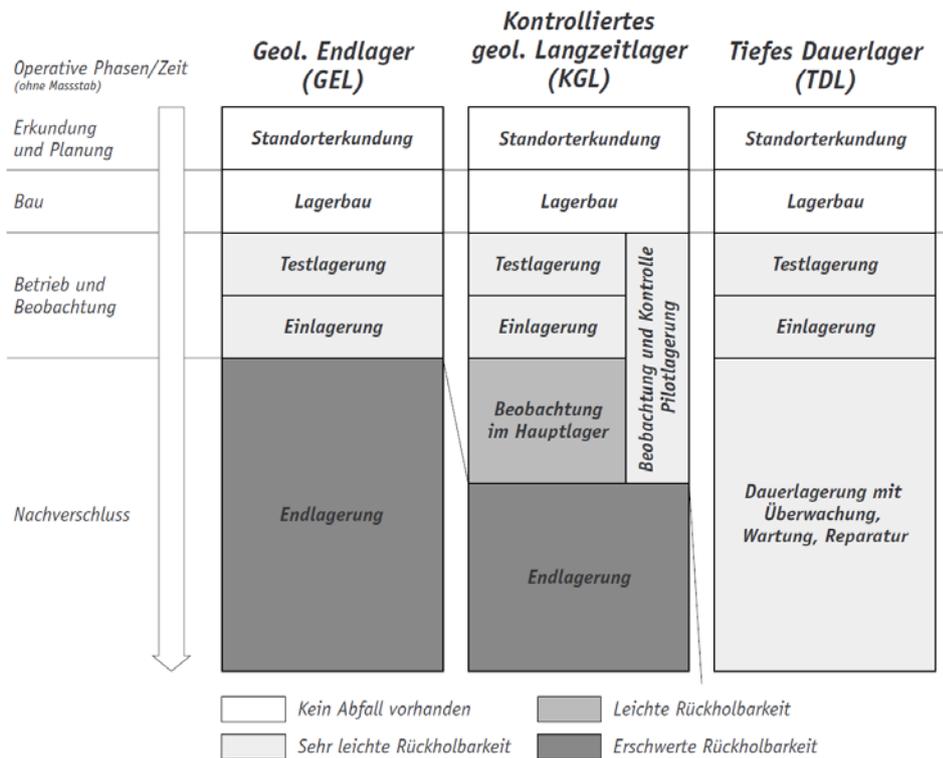
- Sicherheit: Im Fall eines Störfalls, sodass z. B. keine Genehmigung für einen vollständigen Verschluss erteilt wird.
- Testbetrieb: Die Rückholung erfolgt vor der eigentlichen Betriebsphase aus dem Testlager, da unzulässige Befunde festgestellt wurden.
- Abfallbehandlung: Wiederverwendung der radioaktiven Abfälle als Energieressource, z. B. durch Transmutation
- Neues Lagerkonzept: Es wird ein neues, verbessertes Lagerkonzept, z. B. im internationalen Rahmen entwickelt
- Untergrundnutzung: Im Untergrund sollen zukünftig Rohstoffe gewonnen werden oder es wird ein anderes Tiefbauprojekt angestrebt.

Eine erleichterte Rückholung wird durch die Einführung einer mehrjahrzehntigen Beobachtungsphase gewährleistet /HUF 05/. In dieser wird das Hauptlager verschlossen, aber sämtliche anderen Grubenteile offen gehalten (wie z. B. Zentralbereich und Zu-

gangsbauwerke). Hierdurch wird die Zugänglichkeit untertage gewährleistet und im Bedarfsfall müssen lediglich die Betriebs- und Einlagerungstrecken neu aufgefahren werden, um an die Endlagerbehälter zu gelangen. Ferner werden in den Einlagerungstrecken die Schienen nach der Einlagerung belassen, um eine mögliche Rückholung zu erleichtern /NOL 02/. Die Endlagerbehälter sind bezüglich ihrer mechanischen und chemischen Beständigkeit so auszulegen, dass eine Rückholung bis zum Ende der Beobachtungsphase ohne großen Aufwand möglich ist /ENSI 09b/.

Die Offenhaltung im Rahmen einer Beobachtungsphase birgt allerdings auch Risiken. Infolge einer gesellschaftlichen oder wirtschaftlichen Krise kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Überwachung, der Betrieb und der Unterhalt der untertägigen Anlagenteile gewährleistet ist /HUF 05/. Beispielsweise können nach dem Ausfall der Energieversorgung und somit der Pumpen unverschlossene Bereiche sukzessive überflutet werden und somit Schäden anrichten.

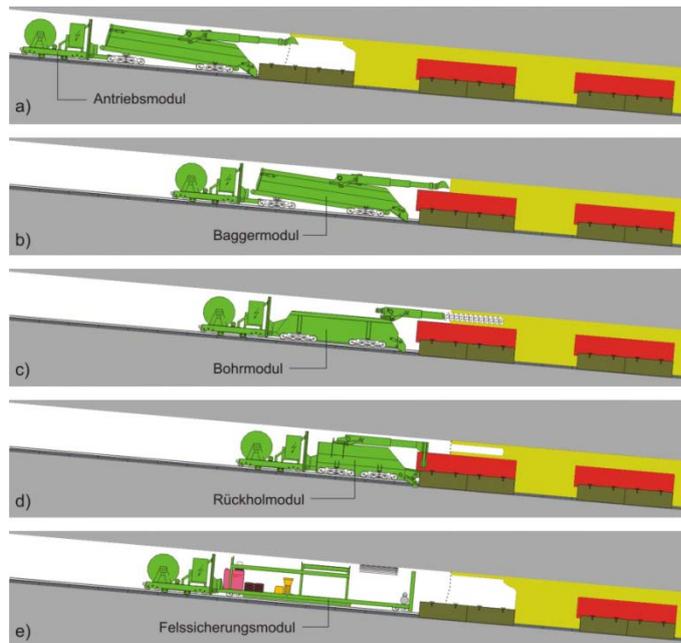
Eine Rückholung der Abfälle kann zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen. Entweder während des Einlagerungsbetriebs, in der Beobachtungsphase nach dem Verschluss des Hauptlagers und nach dem Verschluss der gesamten untertägigen Anlage. In Abhängigkeit des Zeitpunktes der Rückholung ist der technische Aufwand unterschiedlich, da sich die Zugänglichkeit zum HAA-Lagerbereich ändert. Für ein von der Schweiz in- zwischen geplantes kontrolliertes geologisches Langzeitlager (KGL) wurde seitens der /EKRA 00/ der phasenbezogene Aufwand beurteilt und kategorisiert (Abb. 2.42).



**Abb. 2.42** Phasenbezogener Aufwand für eine Rückholung /EKRA 00/

Für eine Rückholung in der Beobachtungsphase muss zunächst der Betriebstunnel wiederaufgefahren werden. Anschließend müssen die Zugänge zu den Einlagerungsstrecken freigelegt und die Streckenversiegelung entfernt werden. Die Temperaturen in den Einlagerungsstrecken können bis zu 100 °C betragen und die Bentonitverfüllung kann trocken oder gesättigt sein, was sich auf das Arbeitsklima im Bergwerk auswirken kann. Es ist für eine ausreichende Bewetterung zu sorgen, deren technischer Aufwand mit zunehmender Temperatur und erhöhter Luftfeuchtigkeit steigt. Es wird angenommen, dass die Schienen auch nach einer längeren Zeit noch brauchbar sind und für die Rückholung der Abfallgebinde genutzt werden können. Ggfls. können die Schienen infolge der Quellvorgänge des Bentonits beschädigt sein /NOL 02/.

Für die Rückholung wurde ein schienengebundenes Fahrzeug entwickelt, das mit unterschiedlichen Geräten (Modulen) besitzt eine Rückholung der Abfallgebinde aus den Einlagerungsstrecken zu jedem Zeitpunkt gewährleisten kann (Abb. 2.43). Das schienengebundene Fahrzeug ist hierbei elektrisch betrieben und ferngesteuert bedient. Das Fahrzeug ist so ausgelegt, dass es auch bei deformierten Schienen einsetzbar ist /NOL 02/. Ferner besitzt es Messinstrumente zur radiologischen Überwachung und die Module werden im Zentralbereich in einer Schleuse auf- und umgerüstet.



**Abb. 2.43** Geplante Arbeitsschritte zur Rückholung der Abfallgebinde /NOL 02/

Insgesamt sind fünf unterschiedliche Module für das Fahrzeug vorgesehen, die auch die unterschiedlichen Arbeitsschritte definieren /NOL 02/. Insgesamt wird für den im Folgenden beschriebenen Rückholprozess pro Endlagerbehälter ein Arbeitstag eingeplant:

- Mit dem Baggermodul wird die Bentonitverfüllung bis zum Endlagerbehälter auf dem Bentonitauflager entfernt. Das Baggermodul kann trockenen und feuchten Bentonit entfernen und auch bei hohen Temperaturen eingesetzt werden können /NOL 02/. Ist ein Baggermodul mit Bentonit gefüllt, wird dieses zurück zum Zentralbereich gebracht und gleichzeitig ein weiteres Baggermodul in die Einlagerungsstrecke gefahren. Nach derzeitigem Planungsstand ist ein dreimaliger Einsatz des Baggermoduls vorgesehen bis das Bohrmodul eingesetzt wird.
- Mit dem Bohrmodul wird der notwendige Freiraum am Streckenfirst hergestellt, sodass der Behälter anschließend weitestgehend von der Bentonitverfüllung gelöst ist.
- Mit dem Rückholmodul wird ein Greifer über den Endlagerbehälter gefahren und über eine Hydraulikpresse das freigelegte Ende des Endlagerbehälters gegriffen und wenige Zentimeter angehoben. Das wird das Verfüllmaterial weiter gelöst und anschließend wird der Behälter mit einem Hydraulikgreifer in das Rückholmodul hineingezogen. Anschließend wird das befüllte Rückholmodul zurück in die Schleuse gezogen.

- Anschließend wird das Felssicherungsmodul verwendet, um die fehlende Stützwirkung des Verfüllmaterials zu kompensieren und die Einlagerungsstrecke mit Ankern und Netzen zu versehen. Über das Antriebsmodul wird der Bentonitauflager aus der Einlagerungsstrecke entfernt.

Dieses mehrschrittige Rückholbarkeitskonzept wurde für befüllte BE-Behälter entwickelt, die repräsentativ für die verwendeten HAA-Behälter sind /NOL 02/. Für die LMA-Abfälle wurde noch kein Rückholbarkeitskonzept entwickelt, jedoch soll dieses an das Rückholbarkeitskonzept für SMA angepasst werden /NOL 02/. Im Rückholungskonzept sind noch die zu erwartenden Strahlenexpositionen für das Personal und die Bevölkerung abzuschätzen /ENSI 09b/. Weiterhin soll das Rückholkonzept bzgl. seiner Verlässlichkeit und Reparierbarkeit der automatisierten Module bei den vorherrschenden Einsatzbedingungen vertieft /NAG 08b/, /KSA 05/ und für eine Bandbreite an denkbaren in-situ Parametern an den spezifischen Standorten zu verschiedenen Zeitpunkten weiterentwickelt werden /NAG 16g/.

### **3 Anforderungen an ein Endlagerkonzept**

Im Folgenden werden die Anforderungen an ein Endlagerkonzept dargestellt, die sich aus der Beschreibung des Endlagerkonzeptes im Opalinuston der Schweiz (s. Kap. 2) ergeben.

Das Barrierenkonzept sieht als Anforderung vor, dass die Behälter die Einschlusswirksamkeit der radioaktiven Abfälle für mindestens 1.000 Jahre gewährleisten müssen. Hierzu müssen die Behälter so ausgelegt werden, dass diese gegenüber der zu erwartenden isostatischen Belastung und Scherbewegungen beständig sind. Diese mechanischen Beanspruchungen resultieren u. a. aus der Auflast des Gebirges und dem bei der Aufsättigung des Bentonits entstehenden Quelldruck. Ferner darf es bei dem zu erwartenden geochemischen Milieu keine flächenhafte Korrosion oder Lochfraß geben sowie unzulässige thermische Beanspruchungen durch die eingelagerten wärmeentwickelnden Abfälle entstehen, welche die Einschlusswirksamkeit gefährden. Die thermische Beständigkeit muss nach dem aktuellen Endlagerkonzept für bis zu 140 °C gegeben sein. Wegen der Forderung nach einer Rückholbarkeit ohne großen Aufwand wird als Anforderung an die Behälter definiert, dass Anschlagsvorrichtungen (wie z. B. Tragzapfen) angebracht werden müssen.

Es ist vorgesehen in der untertägigen Anlage zeitlich parallel radioaktive Abfälle einzulagern und gleichzeitig weitere Einlagerungsstrecken zur Lagererweiterung aufzufahren, um die Bau- und Betriebszeit des Endlagers zu reduzieren. Zur Gewährleistung der Trennung zwischen der strahlenschutztechnisch überwachten und konventionellen Zone sind zwei unterschiedliche Zugangsbauwerke notwendig. Hierdurch wird der untertägige Transport der radioaktiven Abfälle von dem Baumaterial inkl. des notwendigen Personals räumlich getrennt. Als Zugangsbauwerke sind eine Rampe und ein Schacht vorgesehen. Grundsätzlich ist auch eine andere Kombination von Zugangsbauwerken möglich. Die Art und Auslegung der Zugangsbauwerke resultiert aus der Optimierung von betrieblichen, baulichen und sicherheitstechnischen Aspekten. Der Ausbau der Zugangsbauwerke ist nicht nur vom Wirtsgestein abhängig, sondern auch von den zu durchstoßenden überliegenden geologischen Schichten. Insbesondere die Auslegung der Drainage ist abhängig von den geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften zur Wasserführung im Gestein. Im Wirtsgestein Tonstein stellen sich besondere Anforderungen an den Ausbau der Strecken aus bau- und geotechnischen Stabilitätsgründen. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Wirtsgesteinen geringen Standfestigkeit müssen verstärkte Maßnahmen für den Ausbau getroffen werden. Zum

Beispiel werden die Einlagerungsstrecken anhand des geomechanischen Spannungsfeldes orientiert, d. h. entlang der maximalen horizontalen Hauptspannung ausgerichtet. Hierdurch wird der Querschnitt der Einlagerungsstrecken am geringsten beansprucht und geringere Felssicherungsmaßnahmen sind ausreichend (z. B. Verankerung mit Draht- und Armierungsnetzen). Weiterhin muss das Bewetterungskonzept den Feuchtigkeitsgehalt in der Luft in der untertägigen Anlage regulieren. Der zusätzliche Feuchtigkeitseintrag durch einziehendes Wetter darf nicht unzulässig hoch sein.

Die Überwachung der radioaktiven Abfälle, das sogenannte Monitoring, findet ausschließlich in einem Pilotlager und nicht direkt an den radioaktiven Abfällen in den Einlagerungsstrecken im Hauptfeld statt. Hierfür gelten einige Anforderungen, damit die Ergebnisse aus der Überwachung im Pilotlager auf das Hauptlager übertragbar sind. Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse des Wirtsgesteins müssen vergleichbar sein und die Bauweise, die Art der Einlagerung und die Verfüllung müssen mit denen im Hauptlager übereinstimmen. Weiterhin muss das Pilotlager eine kleine, aber für das Hauptlager repräsentative Abfallmenge enthalten. Um eine unzulässige Beeinflussung des Pilotlagers auf das Hauptlager auszuschließen muss eine räumliche und hydraulische Trennung des Pilotlagers erfolgen.

Im Standortauswahlverfahren der Schweiz ist zum aktuellen Planungsstand ein sogenanntes Kombilager (Co-Disposal) möglich, indem die Abfallkategorien HAA und SMA gemeinsam endgelagert werden. Eine detaillierte Diskussion der resultierenden Vor- und Nachteile eines Kombilagers im Vergleich zu zwei getrennten Endlagern erfolgte bislang nicht, allerdings wurden erste Ansätze und Anforderungen an ein Kombilager diskutiert. Es gilt der Grundsatz, dass eine unzulässige gegenseitige Beeinflussung durch die gemeinsame Nutzung der untertägigen Anlage ausgeschlossen werden muss. Hierzu gehört vor allem der mögliche Wärmeeintrag durch die Einlagerung der HAA auf die SMA, da durch deren vielfältige chemische Zusammensetzung unzulässige Wechselwirkungen wie z. B. eine erhöhte Gasbildung entstehen könnten. Hierfür ist eine unterirdische räumliche und hydraulische Trennung der beiden Lagerzeile zwingend notwendig. Ein Kombilager ermöglicht Synergieeffekte zu nutzen wie beispielsweise die gemeinsame Nutzung der obertägigen Anlage und der Zugangsbauwerke für die Bau- und Betriebsphase. Durch die (zeitlich getrennte) gemeinsame Nutzung der Zugangsbauwerke würden die über dem Wirtsgestein liegenden geologischen Schichten weniger oft durchbohrt, d. h. gestört werden und somit sicherheitstechnische Vor-

teile erbringen. Die Erhöhung der unterirdischen Einlagerungsstrecken und Abzweiger bieten nach aktuellem Planungsstand keine erhöhten Bedenken bzgl. der Langzeitsicherheit. Im Falle eines Kombilagers würde für jeden Lagerteil ein eigener Langzeitsicherheitsnachweis geführt werden, allerdings sind bei einem Kombilager der gesamtweitliche Einfluss der Radionuklidfreisetzung und die resultierende Dosis in die Biosphäre zu betrachten. Durch ein Kombilager könnte sich grundsätzlich der Bau- und Offenhaltungsbetrieb des Endlagers erhöhen, da die Anzahl an Zugangsbauwerken geringer ist als bei der Errichtung von zwei getrennten Lagern und der Bau- und Betrieb der beiden Lagerteile teilweise zeitlich getrennt erfolgen würden.

## Literaturverzeichnis

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Abschlussbericht. 260 S.: Köln, Dezember 2002.
- /ALD 94a/ Alder, J. C., McGinnes, D. F.: Model Radioactive Waste Inventory for Swiss Waste Disposal Projects, Volume 1, Main report. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 93-21, 78 S.: Wetztingen, Juni 1994.
- /ALD 94b/ Alder, J. C., McGinnes, D. F.: Model Radioactive Waste Inventory for Swiss Waste Disposal Projects, Volume 2, Database. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 93-21, 908 S.: Wetztingen, Juni 1994.
- /BFE 08/ Bundesamt für Energie (BFE): Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil, Revision vom 30. November 2011. 92 S.: Bern, Schweiz, 2. April 2008.
- /BFE 13/ Bundesamt für Energie (BFE): Standortauswahl und -prüfung in Etappe 2, Häufige Fragen und Antworten, Sachplan geologische Tiefenlager. COO.2207.110.4.502555, 19 S.: Bern, Schweiz, September 2013.
- /BVOS 03/ Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS) in der Fassung vom 4. Dezember 2003.
- /EGT 16/ Expertengruppe geologische Tiefenlager (EGT): Stellungnahme der EGT zum Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2, Expertenbericht. Brugg, 2016.
- /EID 10/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) (Hrsg.): Beurteilung der Anforderungen an die bautechnische Machbarkeit und deren Umsetzung im Standortauswahlverfahren SGT Etappe 1. Emch+Berger AG Bern Ingenieure und Planer, Expertenbericht ENSI, 33/68, 32 S.: Brugg, 24. Februar 2010.

- /EKRA 00/ Wildi, W., Appel, D., Buser, M., Dermange, F., Eckhardt, A., Hufschmied, P., Keusen, H.-R., Aebersold, M.: Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle, Schlussbericht. Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA), 91 S.: Bern, 31. Januar 2000.
- /ENSI 09a/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis., Erläuterungsbericht zur Richtlinie. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, G03/d, 26 S., April 2009.
- /ENSI 09b/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis., Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, G03/d, 21 S., April 2009.
- /ENSI 10a/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Strahlenschutzziele für Kernanlagen. Erläuterungsbericht, ENSI-G15/d, 5 S., November 2010.
- /ENSI 10b/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Auslegung und Betrieb von Lagern für radioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, ENSI-G04/d, 1. Aufl., 15 S.: Brugg, September 2010.
- /ENSI 10c/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. ENSI, 33/070, 196 S.: Brugg, Januar 2010.
- /ENSI 14/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Möglichkeit der Errichtung eines Kombilagers für HAA und SMA. erreichbar unter <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/moeglichkeit-der-errichtung-eines-kombilagers-fuer-haa-und-sma/>, abgerufen am 22. Dezember 2016.
- /ENSI 17/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2. ENSI 33/540, 286 S.: Brugg, April 2017.

- /FRI 16/ Fries, T.: Bericht Schachtkopfanlagen, NTB 16-08. Präsentation, Regional-konferenz ZNO, 26. November 2016.
- /GRI 02/ Gribi, P., Klos, R., Kosakowski, G., Mayer, G., Robinson, P., Smith, P.: Models, Codes and Data for Safety Assessment, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Project Opalinus Clay. Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Technical Report, NTB 02-06, 231 S.: Wetingen, Dezember 2002.
- /HSK 93/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Richtlinie für schweizerische Kernanlagen, HSK-R-21/d, 9 S.: Villigen, November 1993.
- /HSK 95/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA): Richtlinie für den überwachten Bereich der Kernanlagen und des Paul Scherrer Institutes. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, HSK-R-07/d, 16 S.: Villigen, Juni 1995.
- /HSK 03/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK): Sicherheitstechnische Anforderungen an den Brandschutz in Kernanlagen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, HSK-R-50/d, 13 S.: Villigen, März 2003.
- /HUF 05/ Hufschmied, P., Stech, H. J., Pöhler, W., Folly, M., Knobel, S.: Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA und LMA und der durch das Lager induzierte Prozesse, Projekt Opalinuston Zürcher Weinland der Nagra, Expertenbericht zuhanden der HSK. Emch+Berger AG Bern Ingenieure und Planer, 82 S.: Bern, Schweiz, März 2005.
- /JOH 02/ Johnson, L., Schneider, J., Zuidema, P., Gribi, P., Mayer, G., Smith, P.: Project Opalinus Clay - Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and longlived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nationale Genossenschaft für die Lagerung

radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 02-05, 360 S.: Wettingen, 1. Dezember 2002.

- /JOH 03/ Johnson, L. H., King, F.: Canister Options for the Disposal of Spent Fuel. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 02-11, 47 S.: Wettingen, April 2003.
- /KEG 03/ Kernenergiegesetz (KEG) in der Fassung von 21.03.2003 (SR 732.1), zuletzt geändert am 1. Juli 2016.
- /KEV 04/ Kernenergieverordnung (KEV) in der Fassung vom 10. Dezember 2004.
- /KIN 08/ King, F.: Corrosion of carbon steel under anaerobic conditions in a repository for SF and HLW in Opalinus Clay. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 08-12, 44 S.: Wettingen, Oktober 2008.
- /KSA 05/ Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA): Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). KSA 23/170, 108 S.: Villigen, August 2005.
- /LAN 09/ Landolt, D., Davenport, A., Payer, J., Shoesmith, D. W.: A Review of Materials and Corrosion Issues Regarding Canisters for Disposal of Spent Fuel and High-level Waste in Opalinus Clay. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 09-02, 57 S.: Wettingen, Januar 2009.
- /MCG 02/ McGinnes, D. F.: Model Radioactive Waste Inventory for Reprocessing Waste and Spent Fuel. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 01-01, 42 S.: Wettingen, Dezember 2002.
- /MES 14/ Messmer, S., Berger, P.: Sicherheitstechnische Betrachtungen zu Standseilbahnen für den Zugang zu einem zukünftigen geologischen Tiefenlager. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Arbeitsbericht, NAB 14-77, 59 S.: Wettingen, Dezember 2014.

- /NAG 84/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Inventar und Charakterisierung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz.  
Nagra Technischer Bericht, NTB 84-47, 29 S.: Baden, Dezember 1984.
- /NAG 03/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Projekt Opalinuston, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Zusammenfassender Überblick. 2. Aufl., 21 S.: Wettingen, Januar 2003.
- /NAG 08a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien, MIRAM 08. Nagra Technischer Bericht, NTB 08-06, 33 S.: Wettingen, Juli 2008.
- /NAG 08b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Bericht zum Umgang mit den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis. Nagra Technischer Bericht, NTB 08-02, 62 S.: Wettingen, Oktober 2008.
- /NAG 09/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Alternatives Ausbaukonzept ("Liner concept") für BE/HAA-Lagerstollen, Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb SGT-ZE / SUG 2.3. Nagra Arbeitsbericht, NAB 09-07, 37 S.: Wettingen, November 2009.
- /NAG 10/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. Nagra Arbeitsbericht, NAB 09-29: Wettingen, Schweiz, 2010.
- /NAG 13/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Standortunabhängige Betrachtungen zur Sicherheit und zum Schutz des Grundwassers, Grundlagen zur Beurteilung der grundsätzlichen Bewilligungsfähigkeit einer Oberflächenanlage für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht, NTB 13-01, 82 S.: Wettingen, August 2013.
- /NAG 14a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3. Nagra Arbeitsbericht, NAB 14-83, 89 S.: Wettingen, Dezember 2014.

- /NAG 14b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Untertageanlagen der geologischen Tiefenlager in der Betriebsphase, Vorgaben, Vorgehen und Dokumentation der Ergebnisse. Nagra Arbeitsbericht, NAB 14-51, 133 S.: Wettingen, Dezember 2014.
- /NAG 14c/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Bautechnische Risikoanalyse zur Realisierung der Zugangsbauwerke.  
Nagra Arbeitsbericht, NAB 14-50, 136 S.: Wettingen, Dezember 2014.
- /NAG 14d/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Standortareal ZNO-6b-Kombi im Planungssperimeter Zürich Nordost für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers Kombi, Planungsstudie, Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. Nagra Arbeitsbericht, NAB 14-29, 97 S.: Wettingen, Schweiz, Mai 2014.
- /NAG 15/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Abfallinventare und Mengen. 2 S., Stand vom 31. Dezember 2015, erreichbar unter [http://www.nagra.ch/display.cfm/id/102037/disp\\_type/display/filename/Abfallzahlen2011.pdf](http://www.nagra.ch/display.cfm/id/102037/disp_type/display/filename/Abfallzahlen2011.pdf), 2015.
- /NAG 16a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3, Nördlich Lägern.  
Nagra Arbeitsbericht, NAB 16-28, 42 S.: Wettingen, April 2016.
- /NAG 16b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Schachtkopfanlagen geologischer Tiefenlager, Beschreibung und Funktion.  
Nagra Broschüre, 26 S.: Wettingen, Oktober 2016.
- /NAG 16c/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Projektkonzepte für die Lagerkammern und Versiegelungsstrecken und deren Bewertung, ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2. 197 S.: Wettingen, Juli 2016.
- /NAG 16d/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Generische Beschreibung von Schachtkopfanlagen (Nebenzugangsanlagen)

gen) geologischer Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht, NTB 16-08, 120 S.: Wettingen, Oktober 2016.

/NAG 16e/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht, NTB 16-01, 132 S.: Wettingen, Dezember 2016.

/NAG 16f/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Prüfung der Lager- und Barrierenkonzepte, ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2. Nagra Arbeitsbericht, NAB 16-42, 65 S.: Wettingen, Juli 2016.

/NAG 16g/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland. Nagra Technischer Bericht, NTB 16-02, 277 S.: Wettingen, Dezember 2016.

/NAG 17a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Vorschläge Standortgebiete HAA, Bildzitat. Stand vom Januar 2017, erreichbar unter [http://www.nagra.ch/data/images/database/\\$default/grafiken\\_normal/normal/vorschlaege-staogebiete\\_hell\\_haa.png](http://www.nagra.ch/data/images/database/$default/grafiken_normal/normal/vorschlaege-staogebiete_hell_haa.png), abgerufen am 12. Mai 2017.

/NAG 17b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Vorschläge Standortgebiete SMA, Bildzitat. Stand vom Januar 2017, erreichbar unter [http://www.nagra.ch/data/images/database/\\$default/grafiken\\_normal/normal/Vorschlaege-Staogebiete-hell-sma-Jan2017.png](http://www.nagra.ch/data/images/database/$default/grafiken_normal/normal/Vorschlaege-Staogebiete-hell-sma-Jan2017.png), abgerufen am 12. Mai 2017.

/NAG 17c/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Mengen und Herkunft radioaktiver Abfälle für die geologische Tiefenlagerung. Nagra Broschüre, 6 S.: Wettingen, März 2017.

/NAG 17d/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Gas, Bildung, Abbau und Transport in geologischen Tiefenlagern. Nagra Broschüre, 7 S.: Wettingen, Februar 2017.

- /NOL 02/ Nold, A. L., Zuidema, P., Blümling, P., Maurer, P. E., Sitz, P.: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Projekt Opalinuston. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 02-02, 150 S.: Wettingen, 1. Dezember 2002.
- /PAT 12/ Patel, R., Punshon, C., Nicholas, J., Bastid, P., Zhou, R., Schneider, C., Bagshaw, N., Howse, D., Hutchinson, E., Asano, R., King, F.: Canister Design Concepts for Disposal of Spent Fuel and High Level Waste. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 12-06, 157 S.: Wettingen, 1. Januar 2012.
- /PIK 10/ Pike, S., Allen, C., Punshon, C. S., Threadgill, P. L., Gallegillo, M., Holmes, B. K., Nicholas, J. M.: Critical review of welding technology for canisters for disposal of spent fuel and high level waste. Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 09-05, 123 S.: Wettingen, 2010.
- /POL 16/ Poller, A., Mayer, G., Darcis, M., Smith, P.: Modelling of Gas Generation in Deep Geological Repositories after Closure. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 16-04, 128 S.: Wettingen, Dezember 2016.
- /RIC 14/ Ricca, S., Monti, G.: Safety Considerations for a Trackless Transport System (Heavy Load Vehicle) for a Future Geological Repository. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Arbeitsbericht, NAB 14-78, 47 S.: Wettingen, Dezember 2014.
- /SCH 08/ Schneider, J., Gribi, P., Zuidema, P.: Begründung der Abfallzuteilung, der Barriersysteme und der Anforderungen an die Geologie, Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit, Vorschlag geologischer Standorte für das SMA- und das HAA-Lager. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 08-05, 555 S.: Wettingen, Oktober 2008.

- /SIN 14/ Sindern, W., St. Borowski: Sicherheitstechnische Betrachtungen zu Schachtförderanlagen für den Zugang zu einem zukünftigen geologischen Tiefenlager. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Arbeitsbericht, NAB 14-75, 113 S.: Wettingen, Dezember 2014.
- /StSG 17/ Strahlenschutzgesetz (StSG) in der Fassung vom 22. März 1991, zuletzt geändert 1. Mai 2017.
- /StSV 14/ Strahlenschutzverordnung (StSV) in der Fassung vom 22. Juni 1994, zuletzt geändert 1. Januar 2014.
- /SUVA 02/ Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA): Verhütung von Unfällen durch Brände und Explosionen bei der Erstellung von Untertagbauten in Erdgas führenden Gesteinsschichten, Technisches Merkblatt. 1. Aufl., 16 S.: Luzern, Schweiz, März 2002.
- /SUVA 16/ Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA): Schachttransportanlagen (Schachtförderanlagen). 10 S., 15. Dezember 2016.
- /TAS 05/ Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS) in der Fassung vom 15. Dezember 1977, zuletzt geändert Dezember 2005.
- /TUR 09/ Turnbull, A.: A Review of the Possible Effects of Hydrogen on Lifetime of Carbon Steel Nuclear Waste Canisters. Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 09-04, 51 S.: Wettingen, Juli 2009.
- /UVEK 09/ Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen in der Fassung vom 17. Juni 2009, zuletzt geändert 1. August 2009.
- /WIE 14/ Wieser, U., Burger, M., Beyerle, P.: Sicherheitstechnische Betrachtungen zu Zahnradbahnen für den Zugang zu einem zukünftigen geologischen Tiefenlager. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Arbeitsbericht, NAB 14-76, 55 S.: Wettingen, Dezember 2014.

- /ZIE 08/ Ziegenhagen, J.: Technische Endlagerkonzepte, Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA), Bericht zum AP 5. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-10-2008-AP, 146 S.: Peine, September 2008.
- /ZUI 94/ Zuidema, P., Hugli, M., Gribi, P., Niemeyer, M., Resele, G., Schröder, U., Suter, D., Pöttinger, J., van Dorp, F.: Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg, Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 94-06, 267 S.: Wettingen, Juni 1994.
- /ZUI 08/ Zuidema, P., Albert, W., Gautschi, A., Gribi, P., Lambert, A., Müller, H., Schnellmann, M.: Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 08-03, 428 S.: Wettingen, Oktober 2008.
- /ZUI 14/ Zuidema, P., Albert, W., Deplazes, G., Gautschi, A., Gribi, P., Hertrich, M., Madritsch, H., Ruff, M., Schneider, J., Schnellmann, M.: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2, Textband. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 14-01, 390 S.: Wettingen, Dezember 2014.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Zeitliche Entwicklung zur Realisierung eines Endlagers in der Schweiz /NAG 03/.....	2
Abb. 1.2	Verlauf der Untersuchungen zur Auswahl des Wirtsgesteins Opalinuston /NAG 03/.....	3
Abb. 1.3	Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und bautechnischer Machbarkeit /BFE 08/ .....	4
Abb. 1.4	Geologische Standortgebiete für ein Endlager mit HAA /NAG 17b/ .....	5
Abb. 1.5	Geologische Standortgebiete für ein Endlager mit SMA /NAG 17c/ .....	5
Abb. 1.6	Realisierungsplan des SMA- und HAA-Lagers /NAG 16f/ .....	6
Abb. 2.1	Schematisches Lagerkonzept mit Haupt-, Test- und Pilotlager /EKRA 00/.....	9
Abb. 2.2	Barrierenkonzept (Behälter, Verfüllmaterial, Wirtsgestein) /PAT 12/ .....	11
Abb. 2.3	HAA-Lagerkonzept /NAG 16d/.....	12
Abb. 2.4	Aufsicht einer oberirdischen- und unterirdischen Anlage /NAG 16g/.....	12
Abb. 2.5	Schema zur Handhabung der HAA-Behälter bis zur Einlagerung /PAT 12/ .....	13
Abb. 2.6	Nach dem Entsorgungsprogramm zu behandelnden Elemente /NAG 16b/.....	14
Abb. 2.7	Anforderungen einen Behälter für HAA/BE /PAT 12/ .....	16
Abb. 2.8	Zeitliche Entwicklung der Parameter zur Gewährleistung der Einschlusswirksamkeit des Behälters /PAT 12/.....	17
Abb. 2.9	Stahlbehälter für abgebrannte Brennelemente /NAG 17d/, /PAT 12/ .....	18
Abb. 2.10	Behälter aus Stahl mit drei Kokillen /NAG 17d/ .....	19
Abb. 2.11	Untertägige Anlage mit Systemkomponenten. Abmessungen in m /NOL 02/ .....	20
Abb. 2.12	Systemskizze mit einer gewundenen Rampe als Zugangstunnel /NAG 16g/.....	21
Abb. 2.13	Ein- (links) und zweischaliger Ausbau (rechts) der Rampe /NOL 02/ .....	21

Abb. 2.14	Zugkomposition (Zahnradbetrieb) für den Einlagerungsbetrieb /WIE 14/.....	23
Abb. 2.15	Systemskizzen für unterschiedliche Zugangsbauwerke /NAG 14c/.....	23
Abb. 2.16	Systemskizze mit Personen- und Materialströmen /NAG 14b/ .....	24
Abb. 2.17	Konzeptvorschlag für die Schachtversiegelung /NOL 02/.....	25
Abb. 2.18	Schleuse mit Umladevorgang /NOL 02/ .....	26
Abb. 2.19	Technische Zeichnung des Zentralbereiches (Aufsicht) /NOL 02/.....	26
Abb. 2.20	Längsschnitt einer Einlagerungsstrecke für BE (oben) und HAA (unten) sowie der Querschnitt einer Einlagerungsstrecke /NOL 02/ .....	28
Abb. 2.21	Endlagerbehälter mit Bentonitauflager /NOL 02/.....	29
Abb. 2.22	Exemplarische Einlagerungsstrecke für Behälter mit verglasten Abfällen (oben) und bestrahlten Brennelementen (unten) /GRI 02/.....	29
Abb. 2.23	Einlagerungsbetrieb /PAT 12/ .....	30
Abb. 2.24	Verfüllen der Einlagerungsstrecken mit Bentonitgranulat /NOL 02/.....	30
Abb. 2.25	Schematische Versiegelung der Einlagerungsstrecken /NOL 02/ .....	31
Abb. 2.26	Zwei LMA-1-Lagertunnel mit Umladestation (links) und der LMA-2-Lagertunnel (rechts) /NOL 02/.....	34
Abb. 2.27	Funktionsbereiche und Materialflüsse in der OFA /NAG 13/ .....	36
Abb. 2.28	Modellhafte Darstellung der OFA für ein Endlager für HAA /BFE 13/.....	37
Abb. 2.29	Schematische Darstellung der Funktionsbereiche der OFA /NAG 13/.....	38
Abb. 2.30	Prozess der Umladung der HAA aus den externen Transport- in die internen Transportbehälter in der Umladezelle /NAG 13/.....	40
Abb. 2.31	Prozess der Umladung der LMA aus den externen Transport- in die Endlagerbehälter in der Umladezelle /NAG 13/.....	41
Abb. 2.32	Strahlenschutz zonen während des Einlagerungsbetriebs /NAG 14b/.....	45
Abb. 2.33	Bewetterungskonzept mit Strahlenschutz zonen /NAG 16f/ .....	46
Abb. 2.34	Saugendes (links) und blasendes Lüftungskonzept /FRI 16/.....	47
Abb. 2.35	Bewetterungskonzept für die untertägige Anlage während der Einlagerung von BE/HAA /NOL 02/.....	48

Abb. 2.36	Gasgefahrenstufen bei der Erstellung einer untertägigen Anlage /SUVA 02/.....	49
Abb. 2.37	Abwasserentsorgung während des Einlagerungsbetriebs /NAG 16g/ .....	51
Abb. 2.38	Wasserversorgung während des Einlagerungsbetriebs /NAG 16g/.....	53
Abb. 2.39	Energieversorgung während des Einlagerungsbetriebs /NAG 16g/.....	54
Abb. 2.40	Beispielhafte Systemskizze für ein Kombilager /NAG 16g/ .....	55
Abb. 2.41	Realisierungsphasen für ein Kombilager (Phasen 5 & 6 fehlend) /NAG 14d/.....	56
Abb. 2.42	Phasenbezogener Aufwand für eine Rückholung /EKRA 00/ .....	59
Abb. 2.43	Geplante Arbeitsschritte zur Rückholung der Abfallgebinde /NOL 02/.....	60



## Abkürzungsverzeichnis

AG	Kanton Aargau
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
BE	Angebrannte Brennelemente
BFE	Bundesamt für Energie
BVOS	Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen
DWR	Druckwasserreaktor
EKRA	Kommission Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
HAA	Hochaktiver Abfall
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernenergieverordnung
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle
MIF	Medizin, Industrie und Forschung
MIRA	Modellhaftes Inventar radioaktiver Abfälle
MIRAM	Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien
MOX	Mischoxid
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NW	Kanton Nidwalden
NZA-B	Nebenzugangsanlage Betriebsschacht
NZA-L	Nebenzugangsanlage Lüftungsschacht
OFA	Oberflächenanlage
OW	Kanton Obwalden
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
SO	Kanton Solothurn
StSG	Strahlenschutzgesetz
StSV	Strahlenschutzverordnung
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
SWR	Siedewasserreaktor
TAS	Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen
TG	Kanton Thurgau
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
ZH	Kanton Zürich

**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**