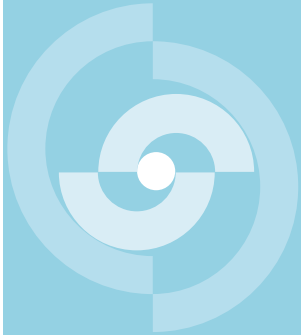




TECHNISCHER BERICHT 02-02

Projekt Opalinuston

Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers

Entsorgungsnachweis für abgebrannte
Brennelemente, verglaste hochaktive
sowie langlebige mittelaktive Abfälle

Dezember 2002

TECHNISCHER BERICHT 02-02

Projekt Opalinuston

Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers

Entsorgungsnachweis für abgebrannte
Brennelemente, verglaste hochaktive
sowie langlebige mittelaktive Abfälle

Dezember 2002

Das vorliegende Anlagen- und Betriebskonzept ist durch Andreas L. Nold, dem Autor dieses Berichtes, entworfen worden. Dr. Piet Zuidema hat den Beitrag zur Betriebssicherheit verfasst, und die Durchsicht der felsmechanischen Berechnungen ist durch Dr. Peter Blümling erfolgt. Beiden herzlichen Dank. Technische Unterlagen haben

DELU GmbH, Deutsche Luftgleitkissensysteme, D-90411 Nürnberg
Electrowatt Infra AG, CH-8037 Zürich
Rowa Tunnelling Logistics AG, CH-8855 Wangen SZ

ausgearbeitet, wofür an dieser Stelle ebenfalls bestens gedankt wird. Dank geht auch an P. E. Maurer (Furka-Oberalp-Bahn) für die Bearbeitung der schienengebundenen Transportmittel sowie an Prof. P. Sitz (Uni Freiberg) für den Entwurf des Versiegelungskonzepts.

ISSN 1015-2636

"Copyright © 2003 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

Zusammenfassung

Die Entsorgung von abgebrannten Brennelementen (BE), verglasten hochaktiven Abfällen (HAA) und langlebigen mittelaktiven Abfällen (LMA) vor allem aus der Wiederaufarbeitung beruht auf dem Konzept der geologischen Tiefenlagerung, d.h. ihrem dauerhaft wirksamen Einschluss in geeigneten, tiefliegenden Gesteinsformationen. Die ersten diesbezüglich durch die Nagra durchgeführten Projektstudien liegen über 20 Jahre zurück (Nagra 1980) und untersuchten die Entsorgung im kristallinen Untergrund und im Tongestein. Die über Jahre entwickelte Lagerstrategie der Nagra ist in guter Übereinstimmung mit dem Konzept der "Kontrollierten Geologischen Langzeitlagerung – KGL", wie es in den neuesten Vorgaben der Behörden formuliert ist (EKRA 2000, KEG 2001).

Der vorliegende Bericht ist als Projektbericht zum *Entsorgungsnachweis* erstellt worden, welcher im weiteren einen geologischen Synthesebericht zum Zürcher Weinland (Nagra 2002a) und einen Bericht zur Langzeitsicherheit (Nagra 2002b) umfasst. Das Projekt zeigt die Machbarkeit der Entsorgung der BE/HAA/LMA in der Nordschweiz auf.

Gegenstand dieses Berichtes ist die Abklärung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA im Opalinuston des Zürcher Weinlandes und die Bereitstellung projektspezifischer Unterlagen zur Führung des Langzeitsicherheitsnachweises. Dazu ist ein Anlagen- und Betriebskonzept erstellt worden. Die einzelnen Bauelemente bzw. Anlagenteile, für welche der Machbarkeitsnachweis geführt wird, sind modellhaft als Baukastensystem zu einem in sich geschlossenen Gesamtprojekt zusammengefügt und werden in diesem Bericht als *Referenzprojekt* präsentiert.

Dieses Referenzprojekt ist das Resultat des nachstehend zusammengefassten Vorgehens, welches die folgenden grundsätzlichen Schritte umfasste:

- Entwurf eines generellen Ablaufschemas zur Handhabung und Einlagerung von radioaktiven Abfällen inkl. deren technische Barrieren sowie Auslegung der Anlage, basierend auf spezifischen Vorgaben bzw. Anforderungen,
- Überschlägige Auslegung der Transport- und Handhabungsgeräte sowie Festlegung von Lichtraumabmessungen für die verschiedenen Anlagenteile unter Tag,
- Ermittlung der Beanspruchung massgebender Stollen- und Tunnelquerschnitte und Vor-dimensionierung der Einbauten; Überlegungen zur Bauausführung,
- Überprüfung der Betriebssicherheit, der Betriebslüftung und Überlegungen zur Rückholbarkeit, Definition bzw. Festlegung des Referenzprojektes unter Einbezug der Bauerfahrung aus anderen Bauwerken; Abklärungen zum Verschluss der Anlage.

Um die Flexibilität des Systems zu prüfen, ist jeweils fallspezifisch, im Sinne sog. "was, wenn"-Szenarien, auf mögliche andere Lösungen bzw. alternativ zu treffende Massnahmen eingegangen worden. Als Resultat der durchgeführten Arbeiten kann folgende *Schlussfolgerung* gezogen werden:

Ein geologisches Tiefenlager BE/HAA/LMA für abgebrannte Brennelemente aus dem Betrieb schweizerischer Nuklearanlagen sowie für verglaste hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle vor allem aus der Wiederaufarbeitung kann im Opalinuston des Zürcher Weinlands mit heutiger Technologie im Rahmen der gesetzlich vorgegebenen Sicherheitsanforderungen gebaut, betrieben, überwacht und innert einiger Jahre verschlossen werden. Die gesellschaftlichen Anforderungen nach Überwachung und Kontrolle, wie sie im Entwurf zum Kernenergiegesetz 2001 formuliert wurden, werden erfüllt. Die Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle ist ebenfalls gegeben. Raumreserven sind vorhanden und das Anlagen- und Betriebskonzept bietet eine hohe Flexibilität bei der Fortführung des Projektes.

Abstract

The management of spent fuel (SF), vitrified high-level waste (HLW) and long-lived intermediate-level waste (TRU) principally from reprocessing is based on the concept of deep geological disposal, i.e. long-term isolation of the waste in suitable, deep-lying rock formations. The first project studies carried out by Nagra in this connection date back more than 20 years (Nagra 1980) and looked at the option of disposal in crystalline basement rock and clay. The disposal strategy developed by Nagra over the years ties in closely with the concept of "monitored, long-term geological disposal" as formulated in the most recent requirements of the authorities (EKRA 2000, KEG 2001).

This report forms part of the series produced for the *Entsorgungsnachweis Project*, which also includes a geological synthesis report on the region of the Zürcher Weinland (Nagra 2002a) and a safety assessment report (Nagra 2002b). The purpose of the Project is to demonstrate the feasibility of disposing of SF/HLW/TRU in Northern Switzerland.

The aim of this report is to investigate the engineering feasibility of constructing a repository for SF/HLW/TRU in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland and to provide project-specific input for the long-term safety assessment. Therefore, a concept for the facilities and operation of the repository was elaborated. The individual structural elements and components for which the feasibility demonstration was performed are part of a modular system, which is brought together to form a stand-alone project, presented in this report as the *Reference Project*.

This Reference Project is the end-result of the procedure summarised below, which consists of the following steps:

- Outlining a general procedure for handling and emplacing radioactive waste, including engineered barriers and facility design based on specific boundary conditions and requirements.
- Approximate design of transport and handling equipment and specification of the clearance profiles for the different underground structures.
- Determining the stress on key drift and tunnel cross-sections and preliminary design of rock support measures; consideration of construction procedures.
- Reviewing operational safety, ventilation and consideration of retrievability; definition of the Reference Project drawing on experience from other construction projects; investigation of closure of the facility.

In order to test the flexibility of the system, "what-if" scenarios in the form of possible alternative solutions or alternative measures have been discussed on a case-specific basis. As a result of the work that has been performed, the following conclusion can be drawn:

A deep geological repository in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland for spent fuel from the operation of the Swiss nuclear power plants and for vitrified high-level and long-lived intermediate-level waste mainly from reprocessing can be constructed and operated and can be closed within a few years using currently available technology and in accordance with legally prescribed safety standards. Societal requirements relating to monitoring and control, as formulated in the draft of the new Nuclear Energy Law of 2001, are fulfilled. The retrievability of emplaced waste is also assured. Spatial reserves exist and the concept for facilities and operation offers a high degree of flexibility for the continuation of the project.

Résumé

Pour les assemblages de combustibles usés (AC), les déchets de haute activité vitrifiés (DHA) et les déchets de moyenne activité à vie longue (DMAL), provenant principalement du retraitement des combustibles usés, le concept d'évacuation prévoit le stockage géologique profond, c'est-à-dire le confinement à long terme des colis dans des formations géologiques appropriées, situées à plusieurs centaines de mètres sous la surface du sol. Les premières études dans ce sens réalisées par la Nagra remontent à plus de 20 ans (Nagra 1980) et concernent à la fois le socle cristallin et les roches argileuses. La stratégie de stockage élaborée par la Nagra est en accord avec le concept de "stockage géologique durable contrôlé (KGL)", formulé dans les documents des autorités compétentes les plus récents (EKRA 2000, KEG 2001).

La présente étude fait partie de la série de rapports intitulée "Démonstration de la faisabilité du stockage géologique" (*Entsorgungsnachweis*), qui comprend en outre un rapport de synthèse sur la géologie du Weinland zurichois dans le nord de la Suisse (Nagra 2002a) et un rapport sur la sûreté radiologique à long terme du dépôt envisagé (Nagra 2002b). Le projet *Entsorgungsnachweis* démontre la faisabilité du stockage des AC/DHA/DMAL en couches géologiques profondes dans le nord de la Suisse.

Ce rapport concerne les modalités de la construction d'un dépôt géologique pour AC/DHA/DMAL dans les argiles à Opalinus du Weinland zurichois et présente, dans cette perspective, les documents de base nécessaires pour démontrer la sûreté à long terme de ce dépôt. Un concept de construction et d'exploitation a par conséquent été élaboré. Les différents éléments de la construction et de l'infrastructure sur lesquels est basée la démonstration de faisabilité sont assemblés de façon modulaire pour former un projet complet, présenté dans ce rapport sous le nom de *projet de référence*.

Ce projet de référence a été obtenu à l'issue de la procédure par étapes résumée ci-dessous:

- Proposition d'un schéma général d'exploitation pour la manutention et le stockage des déchets radioactifs (comprenant les barrières ouvragées) et disposition générale des ouvrages, en tenant compte des données et contraintes spécifiques
- Conception des outils de transport et de manutention, et définition des dimensions des différents secteurs de l'infrastructure souterraine
- Prise en compte des contraintes relatives au diamètre des galeries et des tunnels, et dimensionnement prévisionnel des revêtements; réflexions sur la construction proprement dite du dépôt
- Vérification de la sécurité des opérations, de l'aération pendant la phase d'exploitation et réflexions sur la possibilité de récupérer les colis, élaboration et définition du projet de référence en tenant compte des expériences effectuées par d'autres projets de construction; études sur la fermeture du dépôt.

Pour tester la flexibilité du système, d'autres solutions ou mesures alternatives ont été envisagées sur la base de questions du type "qu'arriverait-il si...". A l'issue des études effectuées, il est possible de tirer les *conclusions* suivantes:

Un dépôt géologique en profondeur AC/DHA/DMAL, destiné aux éléments combustibles usés issus de l'exploitation des centrales nucléaires suisses, aux déchets de haute activité vitrifiés et aux déchets de moyenne activité à vie longue provenant des opérations de retraitement du combustible, peut, dans les argiles à Opalinus du Weinland zurichois, avec la technologie actuelle et en respectant les dispositions légales en matière de sûreté, être construit, exploité, surveillé et fermé quelques années plus tard. Les exigences de surveillance et de contrôle posées par la société, telles qu'elles sont formulées dans le projet de Loi sur l'énergie nucléaire, sont remplies. La réversibilité du stockage des déchets est également assurée. Il existe une marge de manœuvre suffisante au niveau de l'espace disponible et le concept de construction et d'exploitation présente une grande flexibilité pour la poursuite du projet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Abstract	II
Résumé	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Figurenverzeichnis	XIV
Beilagenverzeichnis	XVII
Abkürzungen	XVIII
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines und Gegenstand dieses Berichtes	1
1.2 Die Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz	1
1.2.1 Überblick	1
1.2.2 Rechtliches Umfeld der Entsorgung radioaktiver Abfälle.....	3
1.2.3 Lagertypen	4
1.2.4 BE/HAA/LMA-Programm	4
1.2.5 Die wichtigsten Elemente der schrittweisen Lagerrealisierung.....	7
1.3 Ziele des Entsorgungsnachweises und des Konzepts für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers	8
1.3.1 Ziel des Entsorgungsnachweises	8
1.3.2 Ziel des Anlagen- und Betriebskonzepts	9
1.4 Berichte zum Entsorgungsnachweis	10
1.5 Methodik und Vorgehen zum bautechnischen Machbarkeitsnachweis, Gliederung des vorliegenden Berichtes	11
1.5.1 Methodik und Vorgehen	11
1.5.2 Gliederung des Berichtes.....	12
2 Grundlagen der Planung.....	14
2.1 Rechtsgrundlagen	14
2.2 Auslegungsgrundlagen	14
2.2.1 Komponenten des Sicherheitskonzepts eines geologischen Tiefenlagers	14
2.2.1.1 Sicherheitskonzept.....	14
2.2.1.2 Technische Barrieren	14
2.2.1.3 Natürliche Barrieren	15
2.2.2 Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung – KGL.....	15

2.2.2.1	Konzept.....	15
2.2.2.2	Testlager	16
2.2.2.3	Pilotlager.....	16
2.2.2.4	Hauptlager	17
2.2.3	Allgemeine Grundsätze und Vorgaben für die Auslegung eines Tiefenlagers.....	17
2.2.4	Spezifische Vorgaben der Anlagenauslegung für die Betriebsphase	18
2.2.4.1	Schutz gegen Einwirkungen	18
2.2.4.2	Strahlenschutz.....	19
2.2.5	Anforderungen zur Sicherstellung der radiologischen Sicherheit in der Nachbetriebsphase	19
2.3	Projektgrundlagen bezüglich Standort und geologische Verhältnisse.....	21
2.3.1	Standort.....	21
2.3.2	Geologische Verhältnisse	22
2.3.2.1	Wirtgestein.....	22
2.3.2.2	Überliegende Schichten.....	23
2.4	Einzulagernde Abfälle	27
2.4.1	Abfalltypen und Gebindeabmessungen	27
2.4.2	Abfallmengen und Gewichte	28
2.4.3	Zeitliche Verfügbarkeit der Abfälle.....	29
2.4.4	Optionen – Abfallmengen.....	29
3	Beschreibung der Anlage	31
3.1	Überblick über die Gesamtanlage.....	31
3.2	Oberirdische Anlagen	32
3.2.1	Verkehrstechnische Erschliessung.....	32
3.2.2	Aussenanlagen der Portalzone	33
3.2.2.1	Explorationsphase.....	33
3.2.2.2	Lagerbau	34
3.2.2.3	Betrieb des Tiefenlagers	34
3.2.3	Anlagen im Schachtkopfbereich.....	36
3.3	Unterirdische Anlagen	37
3.3.1	Zugangstunnel und Testlager (Felslabor)	37
3.3.1.1	Zugangstunnel	37
3.3.1.2	Testlager (Felslabor).....	37
3.3.2	Zentraler Bereich	38
3.3.3	Haupttunnel	38

3.3.4	Lagerzone BE/HAA.....	39
3.3.5	Lagerbereich LMA	40
3.3.6	Schacht und Schachtfuss.....	41
3.4	Technische Ausrüstung.....	41
3.4.1	Lüftungskonzept	41
3.4.1.1	Grundprinzip des Lüftungskonzepts.....	41
3.4.1.2	Luftmenge, Kondensation, Temperatureinfluss.....	42
3.4.1.3	Führung des Luftstroms im Überblick.....	42
3.4.2	Elektrotechnische Einrichtungen	43
3.4.3	Wasserhaltung	44
3.4.4	Wasserversorgung und -entsorgung.....	45
3.4.5	Heizung und Warmwasser.....	46
3.4.6	Dekontamination von Transportcontainern	46
3.4.7	Leit- und Kommunikationstechnische Anlagen	46
3.4.8	Brandschutz	46
3.5	Handhabungseinrichtungen und Transportmittel.....	47
3.5.1	Anlagen zur Lagerung, Handhabung und Einbringung von Verfüllmaterialien.....	47
3.5.1.1	Verfüllmaterialien.....	47
3.5.1.2	Auflager aus kompaktierten Bentonitblöcken	47
3.5.1.3	Bentonitgranulat	47
3.5.1.4	Mörtel	48
3.5.1.5	Beton und Schotterkies, Bentonit/Quarzsand-Gemisch.....	48
3.5.2	Anlagen zur Handhabung und Einlagerung von Abfällen.....	49
3.5.2.1	Betriebsgebäude der Empfangsanlage.....	49
3.5.2.2	Einlagerung BE/HAA.....	49
3.5.2.3	Einlagerung LMA.....	52
3.6	Strahlenschutzzone	54
3.6.1	Zielsetzung und Grundlagen.....	54
3.6.2	Kontrollierte Zone	54
3.6.3	Zonentypen	54
3.6.4	Gebiete.....	55
3.6.5	Betriebliche Massnahmen.....	55
3.7	Optionen – Auslegung Anlagen unter Tag	56
3.7.1	Erschliessung der Lagerzone	56
3.7.2	Unterteilung des Einlagerungsbereichs BE/HAA.....	56

3.7.3	Grössere Abfallmengen	57
3.7.3.1	Variante 1	57
3.7.3.2	Variante 2	57
3.7.4	Platzverhältnisse im Opalinuston des Zürcher Weinlandes.....	58
3.7.5	Normalprofil der Haupttunnel	58
3.7.6	Frischluf़tversorgung des Baubereiches	58
3.7.7	Zusätzliche Massnahme zur Wasserhaltung	59
4	Bautechnische Machbarkeit des Tiefenlagers	61
4.1	Einleitung.....	61
4.2	Stollen und Tunnel im Opalinuston	62
4.2.1	Felsmechanische Berechnungen.....	62
4.2.1.1	Vorgaben und Annahmen	62
4.2.1.2	Numerische Modellierung und Berechnung	63
4.2.1.3	Ergebnisse.....	64
4.2.1.4	Vergleichsberechnung mit dem Kennlinienverfahren	65
4.2.2	Ausführungstechnische Besonderheiten	66
4.2.2.1	Schichtparalleler Ausbruch.....	66
4.2.2.2	Plazierung der baulichen Anlagen der Lagerzone	66
4.2.2.3	Baumassnahmen im quellfähigen Opalinuston.....	66
4.2.2.4	Ausbruch und Felssicherung.....	68
4.3	Überliegende Schichten	70
4.3.1	Allgemeines	70
4.3.2	Zugangstunnel	70
4.3.3	Schacht.....	71
4.4	Realisierung des geologischen Tiefenlagers.....	72
4.4.1	Bauetappen und Generelles Bauprogramm	72
4.4.1.1	Realisierungsphasen	72
4.4.1.2	Exploration unter Tag – Bauetappe 1	72
4.4.1.3	Bau der Lageranlage – Bauetappe 2	73
4.4.1.4	Einlagerungsbetrieb und Lagererweiterung – Lagerbetrieb und Bauetappe 3.....	74
4.4.1.5	Überwachung und Verschluss des Hauptlagers.....	75
4.4.1.6	Überwachung des Pilotlagers	75
4.4.1.7	Verschluss der Gesamtanlage	75
4.4.2	Bauinstallationen	75
4.4.3	Transporte und Deponien	76

4.5	Bautechnische Sicherheitsaspekte	77
4.5.1	Arbeitssicherheit	77
4.5.2	Wassereinbruch	77
4.5.3	Gasvorkommen	78
4.5.4	Niederbrüche	78
4.5.5	Querschnittsdeformationen	78
4.6	Optionen – Bautechnische Machbarkeit	79
4.6.1	Parameterstudien Lagerstollen BE/HAA	79
4.6.2	Geologische Störungen in der Lagerzone	81
5	Betrieb des geologischen Tiefenlagers	82
5.1	Betriebliche Auslegung	82
5.1.1	Betriebs- und Einlagerungskonzept	82
5.1.2	Einzulagernde Abfallmengen, Betriebsdauer	83
5.2	Betriebsablauf	85
5.2.1	Anlieferung einlagerungsfähiger Abfälle und Materiallieferungen	85
5.2.2	Kontrolle und Bereitstellungsarbeiten zur Einlagerung	85
5.2.2.1	Bereitstellung von Abfällen	85
5.2.2.2	Andere Vorbereitungen	87
5.2.2.3	Zusammenstellen der Züge	88
5.2.3	Interner Weitertransport	88
5.2.3.1	Transportkonzept für betriebsinterne Transporte	88
5.2.3.2	Einsatzbereich der Lokomotiven und Bentonitgranulatwagen	90
5.2.3.3	Transportwagen	91
5.2.3.4	Transporttechnische Auslegung der Zufahrtsrampe	91
5.2.4	Einlagerung der Abfälle	93
5.2.4.1	Einlagerung von BE- und HAA-Behältern	93
5.2.4.2	Einlagerung von LMA-1 und LMA-2	97
5.3	Verkehrskonzept	100
5.3.1	Verkehrsaufkommen	100
5.3.1.1	An- und Abtransporte über Tag	100
5.3.1.2	Transporte im Zugangstunnel	101
5.3.2	Verkehrsabwicklung	101
5.4	Dokumentation der Abfälle und Qualitätssicherung	102
5.4.1	Dokumentation der Abfälle	102
5.4.2	Qualitätssicherung im Betrieb	103

5.5	Betriebspersonal und Besucherkonzept	103
5.5.1	Betriebspersonal	103
5.5.2	Besucherkonzept.....	105
5.6	Unterhalts- und Wartungskonzept	105
5.6.1	Bauliche Anlagen	105
5.6.2	Maschinentechnische Einrichtungen	106
5.7	Optionen – Betrieb des geologischen Tiefenlagers	106
5.7.1	Änderungen am Abfallmengengerüst	106
5.7.2	Betriebs- und Einlagerungskonzept LMA	106
5.7.3	Abfalltransporte im Zugangstunnel (Rampe)	107
5.7.4	Einlagerung BE/HAA	107
5.7.5	Einlagerung LMA	109
5.7.5.1	LMA-1	109
5.7.5.2	LMA-2	109
5.7.6	Einsatzbereich der Lokomotiven im Betriebstunnel.....	109
6	Betriebssicherheit und Strahlenschutz	110
6.1	Einleitung.....	110
6.2	Zielsetzung und grundsätzliches Vorgehen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit	110
6.2.1	Zielsetzung.....	110
6.2.2	Grundsätzliches Vorgehen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit.....	111
6.3	Radiologische Sicherheit in der Betriebsphase.....	111
6.3.1	Einleitung.....	111
6.3.2	Normalbetrieb.....	112
6.3.2.1	Empfang und Umschlag	112
6.3.2.2	Interne Transporte und Anlagen unter Tag.....	112
6.3.2.3	Gesamtanlage.....	113
6.3.3	Sicherheit bei Störfällen	113
6.3.3.1	Allgemeines	113
6.3.3.2	Störfallkatalog	113
6.3.3.3	Massnahmen zur Vermeidung von Störfällen	116
6.3.3.4	Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen	118
6.4	Sicherheitsmassnahmen in der Betriebsphase	119
6.4.1	Schulung des Betriebspersonals	119
6.4.2	Lagerbetrieb: Steuerung und Überwachung	119

6.4.3	Abfälle	119
6.4.4	Umschlag und Verpackung.....	120
6.4.5	Transportmittel	120
6.4.6	Einlagerung BE/HAA-Behälter	120
6.4.7	Einlagerung LMA	120
6.4.8	Lüftungsanlage	121
6.4.9	Elektroversorgung.....	121
6.4.10	Brandschutz	121
6.4.11	Überflutung der unterirdischen Anlagen	121
6.4.12	Strahlenschutzzone	122
6.4.13	Strahlenschutzüberwachung	122
6.4.14	Sicherung gegen Einwirkungen Dritter	122
6.5	Bewertung der Betriebssicherheit.....	122
6.5.1	Auslegung der Anlage und Betriebsabläufe	122
6.5.2	Bewertung des Normalbetriebs.....	122
6.5.3	Bewertung bezüglich Störfällen	123
7	Kontrolle und Überwachung, Physischer Schutz von Kernmaterialien (Safeguards)	124
7.1	Kontrolle und Überwachung.....	124
7.1.1	Einleitung.....	124
7.1.2	Phasen der Lagerrealisierung und zu erhebende Basisdaten	124
7.1.3	Kontrolle und Überwachung in der Bau-, Betriebs- und Überwachungsphase eines BE/HAA/LMA Lagers	125
7.1.4	Kontrolle und Überwachung in der Nachverschluss Phase	126
7.1.5	Einschränkungen der Kontroll- und Überwachungsmassnahmen	126
7.1.6	Korrekturmassnahmen	127
7.2	Physischer Schutz von Kernmaterialien (Safeguards).....	128
7.2.1	Einleitung.....	128
7.2.2	Massnahmen im Lagerbetrieb.....	128
7.2.3	Massnahmen nach Lagerverschluss.....	128
7.2.4	Folgerung für das geologische Tiefenlager im Zürcher Weinland	129
8	Lagerverschluss	130
8.1	Einleitung.....	130
8.2	Verschlusskonzept.....	130
8.2.1	Verschlussmassnahmen im Einlagerungsbetrieb.....	130

8.2.2	Überwachung und Verschluss des Hauptlagers	131
8.2.3	Überwachung des Pilotlagers	132
8.2.4	Verschluss der Gesamtanlage	132
8.3	Versiegelungskonzept	133
8.3.1	Versiegelungen in Schlüsselzonen	133
8.3.1.1	Versiegelungen V1	135
8.3.1.2	Versiegelung V2	135
8.3.1.3	Versiegelung V3 und V3'	136
8.3.1.4	Versiegelung V4 und V4'	137
8.3.2	Streckenverfüllungen	137
8.4	Zeitliche Aspekte	137
8.4.1	Zeitpunkt des Lagerverschlusses	137
8.4.2	Zeitlicher Aufwand zum Lagerverschluss	137
8.5	Rekultivierung der Aussenanlagen	138
8.6	Fazit zum Lagerverschluss	139
8.7	Optionen – Lagerverschluss	139
9	Rückholbarkeit der Abfälle	140
9.1	Grundsätzliches	140
9.2	Zeitpunkt der Rückholung und Ausgangslage	140
9.3	Rückholung von BE-Behältern	141
10	Schlussfolgerung und zusammenfassende Argumente	143
10.1	Bautechnische Machbarkeit	144
10.2	Betriebssicherheit	145
10.3	Kontrolle und Überwachung	146
10.4	Lagerverschluss	146
10.5	Rückholung	147
Referenzen		148

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	In Betrieb stehende Kernkraftwerke (KKW).....	2
Tab. 2.1	Felsmechanische Kennziffern des Opalinustons (Nagra 2002a)	23
Tab. 2.2	In das Tiefenlager BE/HAA/LMA einzulagernde Abfälle für 192 GW _e a (Mengenangaben gerundet)	29
Tab. 4.1	Resultate der numerischen Berechnungen, maximale Schnittkräfte und Verschiebungen (Nagra 2000)	64
Tab. 4.2	Am 1.1.2001 in der Schweiz in Betrieb stehende Tunnel und Stollen (Egger 2001)	67
Tab. 4.3	Transporte von Ausbruchmaterial und Beton für Untertageanlagen in den Bauetappen 1, 2 und 3 (Mittelwerte)	76
Tab. 4.4	Relevanz und Aussagesicherheit felsmechanischer Parameter zur Ermittlung der zu variierenden Eingabegrößen	79
Tab. 4.5	Beschreibung der Rechenfälle	80
Tab. 4.6	Berechnungsergebnisse zur Auflockerungszone im Vergleich zum Basisfall	80
Tab. 5.1	Im Pilotlager und LMA-Lager einzulagernde Abfälle ("Cemented waste option")	84
Tab. 5.2	Einsatzbereich der Lokomotiven und Bentonitgranulatwagen	90
Tab. 5.3	Anhängelasten und Auslegungsgrößen für den Zahnradbetrieb auf der Zufahrtsrampe zwischen Empfangsanlage und Zentralem Bereich.....	92
Tab. 5.4	In ein Lager BE/HAA/LMA während des Einlagerungsbetriebs insgesamt anzutransportierende Güter (gerundet)	100
Tab. 5.5	Betriebsmannschaft eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA.....	104
Tab. 6.1	Auslegungsstörfälle, welche durch Auslegung der Anlage bzw. Abfallgebinde <i>vermieden</i> werden	115
Tab. 6.2	Auslegungsstörfälle, die in ihren radiologischen Auswirkungen auf die Umgebung durch die Auslegung der Anlage bzw. der Abfallgebinde <i>begrenzt</i> werden.....	116

Figurenverzeichnis

Fig. 1.1	Quellen radioaktiver Abfälle und vorgesehenes Entsorgungskonzept	2
Fig. 1.2	Das schweizerische BE/HAA/LMA-Programm im Überblick.....	5
Fig. 1.3	Ablaufschema zum Nachweis der bautechnischen Machbarkeit.....	11
Fig. 2.1	Schematische Darstellung der Schlüsselemente des Konzepts zur kontrollierten geologischen Langzeitlagerung gemäss EKRA (EKRA 2000)	16
Fig. 2.2	Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland mit Sondierbohrung Benken	21
Fig. 2.3	Geologisches Profil durch das Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland mit Sondierbohrung Benken (Nagra 2002a)	22
Fig. 2.4	Geologisches Profil der Sondierbohrung Benken (Nagra 2002a).....	24
Fig. 2.5	Behälter für abgebrannte Brennelemente (BE) und verglaste hochaktive Abfälle (HAA) (Nagra 2002b) – Abmessungen in mm.....	27
Fig. 2.6	Behälter für langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) (Nagra 2002b) Abmessungen in mm	28
Fig. 3.1	Übersicht über die untertägigen Anlagen eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA – Auslegungsbasis 192 GW _e a (Referenzfall) – Abmessungen in m	31
Fig. 3.2	Potenzielle Transportroute für die Eisenbahn vom Zwischenlager Würenlingen ins Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland.....	33
Fig. 3.3	Modellhafte Ansicht der Aussenanlagen des Portalbereichs im Einlagerungsbetrieb; inkl. Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA.....	35
Fig. 3.4	Modellhafte Ansicht der Anlagen im Schachtkopfbereich im Einlagerungsbetrieb	36
Fig. 3.5	Lüftungsschema für die Anlagen unter Tag während der Einlagerung von BE/HAA	43
Fig. 3.6	Stromversorgung der Anlagen unter Tag während des Einlagerungsbetriebs.....	44
Fig. 3.7	Verfüllwagen für Bentonitgranulat – Seitenansicht und Schnitte in einem Lagerstollen BE/HAA – Abmessungen in m.....	48
Fig. 3.8	Hydraulikwagen – Seitenansicht und Ansicht in der Schleuse BE/HAA Abmessungen in m	49
Fig. 3.9	Umsetzgerät für BE/HAA-Behälter – Seitenansicht und Ansicht in der Schleuse BE/HAA – Abmessungen in m	50
Fig. 3.10	Einlagerungstrolley – Seitenansicht und Schnitt durch einen Lagerstollen BE/HAA Abmessungen in m.....	51
Fig. 3.11	Windenlokomotive – Seitenansicht und Schnitt durch die Schleuse BE/HAA Abmessungen in m	51
Fig. 3.12	Umladestation LMA-1; Längsschnitt mit Einlagerungsgeräten - Abmessungen in m	52
Fig. 3.13	Luftkissenfahrzeug – Beispiele aus dem Zwischenlager Gorleben	52
Fig. 3.14	Einlagerungsgerät für LMA-2 – Seitenansicht und Schnitt durch den Lagertunnel LMA-2 – Abmessungen in m	53

Fig. 3.15	Übersicht über die untertägigen Anlagen eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA – Auslegungsbasis 192 GW _e a – Abmessungen in m	56
Fig. 3.16	Beispiel eines möglichen geologischen Tiefenlagers für ein Abfallinventar auf der Basis von 300 GW _e a – Abmessungen in m	57
Fig. 3.17	Potenzielles Lagergebiet im Zürcher Weinland mit geologischen Eingrenzungen	60
Fig. 4.1	Gesamtdeformationen im Lagerstollen BE/HAA	65
Fig. 4.2	Tunnelbohrmaschine wie sie z.B. zur Erstellung des FEBEX-Teststollens im Felslabor Grimsel eingesetzt wurde; Ausbruchdurchmesser 2.30 m	68
Fig. 4.3	Teilschnittmaschine mit Längs- und Querschneidkopf wie sie z.B. im Opalinuston des Felslabors Mont Terri eingesetzt wurde	69
Fig. 4.4	Bohrjumbo zum Bohren der Löcher im Sprengvortrieb	69
Fig. 4.5	Exploration unter Tage – Bauetappe 1	72
Fig. 4.6	Bau der Lageranlage – Situation am Schluss der Bauetappe 2	73
Fig. 4.7	Einlagerungsbetrieb und Lagererweiterung – Lagerbetrieb und Bauetappe 3	74
Fig. 5.1	LMA-Lagercontainer LC2-MA-20 und LC2-MA-25 mit Abfällen gemäss Tab. 2.2 Abmessungen in m	86
Fig. 5.2	Bentonitauflager mit Auflagerträger für einen BE-Behälter – Abmessungen in m	87
Fig. 5.3	Stapelemente zur Einlagerung von WA-COG-4 – Abmessungen in m	88
Fig. 5.4	Beispiel einer Zahnradlokomotive – Lokkonfiguration HGea 2/2 in Doppeltraktion	89
Fig. 5.5	Beispiel einer im Verbund arbeitenden Stollenlokomotive wie sie z.B. beim Bau des Eurotunnels (Ärmelkanal) im Einsatz war	89
Fig. 5.6	Beispiel einer Akku-Lokomotive wie sie sehr häufig im Untertag- und Bergbau anzutreffen sind	90
Fig. 5.7	Einlagerung von BE/HAA in Lagerstollen des Pilot- und Hauptlagers	93
Fig. 5.8	Einlagerung von BE-Behältern – Situation in der Schleuse BE/HAA (schematisch)	94
Fig. 5.9	Einfahren eines BE-Behälters mit Bentonitauflager	95
Fig. 5.10	Einbringen der Granulatverfüllung nach dem Positionieren des BE-Behälters (schematisch)	96
Fig. 5.11	Grossversuche im Massstab 1:1	97
Fig. 5.12	Umladestation LMA-1 – Längsschnitt; Querschnitt mit LC2-Stapeln	97
Fig. 5.13	Lagertunnel LMA-1 – Querschnitt mit verschiedenen Belegungsmöglichkeiten	98
Fig. 8.1	Situation nach Abschluss des Einlagerungsbetriebs	131
Fig. 8.2	Situation nach dem Verschluss des Hauptlagers	132
Fig. 8.3	Situation des geologischen Tiefenlagers nach dem Verschluss der Gesamtanlage	133
Fig. 8.4	Situation des geologischen Tiefenlagers nach dem vollständigen Verschluss	134

Fig. 8.5	Schematische Darstellung der Versiegelung V1 als Verschluss der Lagerstollen BE/HAA auf der Betriebstunnelseite; anderes Ende (Bauseite) prinzipiell gleich.....	135
Fig. 8.6	Konzeptvorschlag für die Schachtversiegelung V3.....	136
Fig. 9.1	Rückholung von BE-Behältern – Geräte und Arbeitsablauf (schematisch)	141
Fig. 10.1	Gesamtansicht des geologischen Tiefenlagers für BE/HAA/LMA	143

Beilagenverzeichnis

Beilage 2-1	Sondierbohrung Benken Gebirgsverhältnisse im geologischen Profil
Beilage 3-1	Gesamtübersicht Anlagen unter Tag Situation
Beilage 3-2	Zugangs-, Betriebs- und Bautunnel Längenprofil
Beilage 3-3	Zugangstunnel Querschnitte
Beilage 3-4	Zentraler Bereich Situation und Querschnitt
Beilage 3-5	Abzweiger und Schleuse BE/HAA Situation und Längsschnitt
Beilage 3-6	Betriebstunnel, Abzweiger und Schleuse, Lagerstollen BE/HAA – Querschnitte
Beilage 3-7	Abzweiger und Umladestation, Lagertunnel LMA-1 und LMA-2
Beilage 3-8	Umladestation und Lagertunnel LMA-1 Querschnitte
Beilage 3-9	Lüftungs- und Bauschacht Querschnitte
Beilage 4-1	Geologisches Tiefenlager Generelles Bauprogramm

Abkürzungen

AB	Anlagen und Betrieb
ALARA	as low as reasonably achievable
AT	Arbeitstag
AtG	Atomgesetz
BB	Bundesbeschluss
BE	Brennelemente
BNF	BNFL
BNFL	British Nuclear Fuel Ltd.
COG	Cogema
DWR	Druckwasserreaktor
DSK	Deutsch-Schweizerische Kommission für die Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen
EKRA	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
FMT	Felslabor Mont Terri
FLG	Felslabor Grimsel
GNW	Genossenschaft für nukleare Entsorgung Wellenberg
HAA	Hochaktive Abfälle
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen
IAEA	International Atomic Energy Agency
KEG	Kernenergiegesetz
KGL	Kontrolliertes geologisches Langzeitlager, Kontrollierte geologische Langzeitlagerung
KKB	Kernkraftwerk Beznau
KKG	Kernkraftwerk Gösgen
KKL	Kernkraftwerk Leibstadt
KKM	Kernkraftwerk Mühleberg
KKW	Kernkraftwerk
KSA	Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen
LC	Lagercontainer (Endlagercontainer)
Lkw	Lastwagen (Lastkraftwagen)
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle

MA	mittelaktiv
MAA	mittelaktive Abfälle
m ü M	Meter über Meer
m u T	Meter unter Terrain
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktive Abfälle
OPA	Opalinuston
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SMA	Schwach/mittelaktive Abfälle
StSG	Strahlenschutzgesetz
StSV	Strahlenschutzverordnung
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
SWR	Siedewasserreaktor
TBM	Tunnelbohrmaschine
TSM	Teilschnittmaschine
WA	Wiederaufarbeitung
WED	Wedelsandstein

1 Einleitung

1.1 Allgemeines und Gegenstand dieses Berichtes

Gegenstand dieses Berichtes ist die Abklärung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlandes (Nordschweiz), welches zur Entsorgung von abgebrannten Brennelementen (BE), verglasten hochaktiven Abfällen (HAA) und langlebigen mittelaktiven Abfällen (LMA) vor allem aus der Wiederaufarbeitung ausgelegt werden soll.

Die Entsorgung von BE/HAA/LMA beruht auf dem Konzept der geologischen Tiefenlagerung, d.h. ihrem dauerhaft wirksamen Einschluss in geeigneten, tiefliegenden Gesteinsformationen. Die ersten diesbezüglich durch die Nagra durchgeführten Projektstudien liegen über 20 Jahre zurück (Nagra 1980) und untersuchten die Entsorgung im kristallinen Untergrund und im Tongestein. Die über Jahre entwickelte Lagerstrategie der Nagra ist in guter Übereinstimmung mit dem Konzept der "Kontrollierten Geologischen Langzeitlagerung – KGL", wie es in den neuesten Vorgaben der Behörden vorgeschlagen bzw. verlangt wird (EKRA 2000, KEG 2001). Der vorliegende Bericht ist als Projektbericht zum Projekt *Entsorgungsnachweis* erstellt worden, welches im weiteren einen geologischen Synthesebericht zum Zürcher Weinland (Nagra 2002a) und einen Bericht zur Langzeitsicherheit (Nagra 2002b/c) umfasst. Das Projekt Entsorgungsnachweis ist ein Meilenstein auf dem Weg zur Realisierung eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA/LMA und zeigt die Machbarkeit der Entsorgung dieser Abfälle in der Schweiz auf.

Es ist international anerkannt, dass ein schrittweises Vorgehen der zweckmässigste Weg darstellt, die mit der Entsorgung verbundenen technischen und gesellschaftlichen Herausforderungen anzugehen (NEA 1999a, NRC 2001). Dabei sind die zu wählenden Schritte mit zugehörigem wissenschaftlichem Programm und Dokumentation ebenso wie die Beteiligung der Öffentlichkeit und das Zeitprogramm von Land zu Land verschieden. In den nachstehenden Kapiteln dieser Einleitung wird ein Überblick über die Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz gegeben und die Ziele des Entsorgungsnachweises und des Konzepts für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers umrissen. Im weiteren werden die Berichte zum Entsorgungsnachweis erwähnt. Angaben zur Methodik und zum Vorgehen zum bautechnischen Machbarkeitsnachweis sowie zu Gliederung und Inhalt dieses Berichtes schliessen diese Einleitung ab.

1.2 Die Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz

1.2.1 Überblick

Ein schematischer Überblick über die Quellen radioaktiver Abfälle in der Schweiz und das vorgesehene Entsorgungskonzept ist in Fig. 1.1 dargestellt¹⁾.

Radioaktive Abfälle entstehen beim Betrieb und beim Rückbau von Nuklearanlagen, bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente und bei der Verwendung radioaktiver Stoffe in Medizin, Industrie und Forschung. Zur Bestimmung der anfallenden Abfallmengen und des Nuklearinventars wurde in früheren Studien von einer 40-jährigen Betriebsdauer der zur Zeit in Betrieb stehenden Kernkraftwerken ausgegangen (Tab. 1.1). Im Projekt Entsorgungsnachweis

¹⁾ Stand: 31. August 2002. Die Folgen des Volksentscheides vom 22. September 2002 zur Ablehnung der Konzession für den Sondierstollen eines SMA-Lagers am Wellenberg werden in diesem Bericht nicht diskutiert.

wird für den Referenzfall das Abfallmengengerüst einer 60-jährigen Betriebsdauer, was einer totalen Energieproduktion von 192 GW_ea entspricht, zu Grunde gelegt. Damit soll der Forderung nach volumenmässiger Flexibilität wie sie im vorliegenden Entwurf zum Kernenergiegesetz (KEG 2001) gestellt wird, nachgekommen werden, sowie dem international feststellbaren Trend nach verlängerter Betriebsdauer bestehender Werke Rechnung getragen werden.

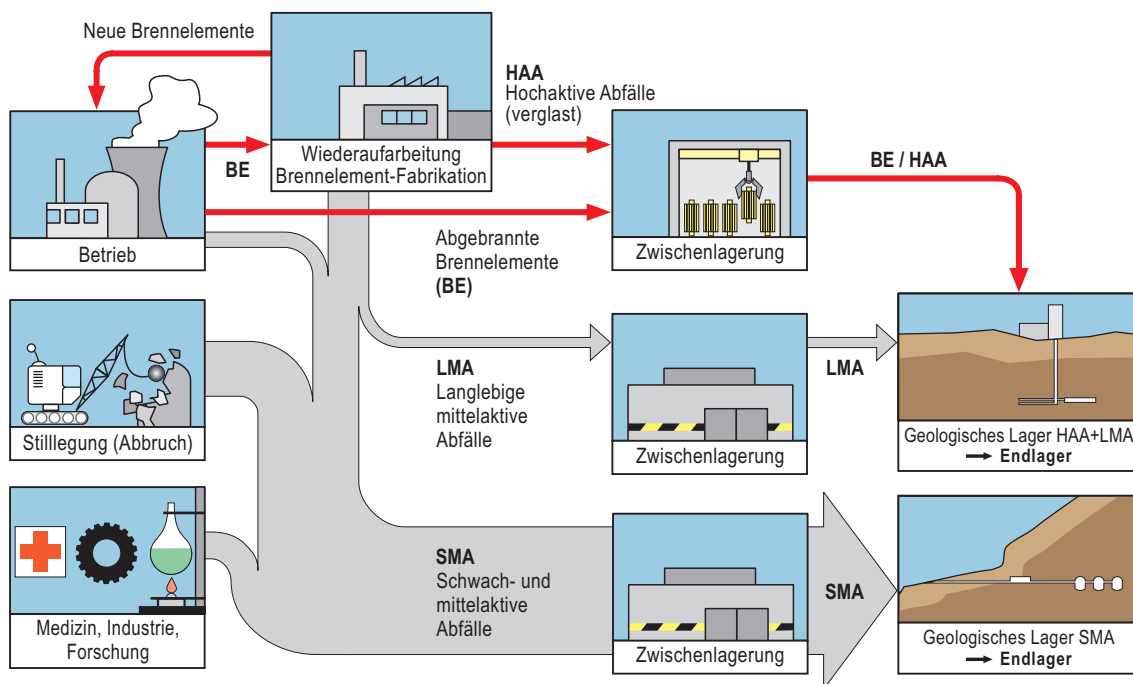


Fig. 1.1 Quellen radioaktiver Abfälle und vorgesehene Entsorgungskonzept

Ein Teil der abgebrannten Brennelemente wird der Wiederaufarbeitung zugeführt. Das dabei gewonnene spaltbare Material wird bei der Fabrikation neuer Brennelemente verwendet. Die anfallenden Abfälle werden in die Schweiz zurückgeführt. Die Schweizerischen Kernkraftwerkbetreiber haben mit BNFL (GB) und COGEMA (F) Wiederaufarbeitungsverträge für abgebrannte Brennelemente aus einer Stromproduktion von ca. 40 GW_ea abgeschlossen. Für die in diesen Verträgen nicht enthaltenen abgebrannten Brennelemente wird für den Entsorgungsnachweis davon ausgegangen, dass diese direkt der Tiefenlagerung zugeführt werden. Damit werden beide Wege zur Entsorgung abgebrannter Brennelemente dokumentiert.

KKW	Reaktortyp ¹⁾	In Betrieb seit	Leistung ²⁾ in MW _e
Beznau I	DWR	1969	365
Beznau II	DWR	1971	365
Mühleberg	SWR	1971	355
Gösgen	DWR	1979	970
Leibstadt	SWR	1984	1145

Tab. 1.1 In Betrieb stehende Kernkraftwerke (KKW)

¹⁾ SWR = Siedewasserreaktor, DWR = Druckwasserreaktor

²⁾ Stand Januar 2002

1.2.2 Rechtliches Umfeld der Entsorgung radioaktiver Abfälle

Die Handhabung und Verwendung radioaktiver Stoffe unterstehen einschlägigen Rechtsgrundlagen, welche auch den internationalen Anforderungen der IAEA (IAEA 1997) genügen. Auf oberster Stufe, d.h. in der Schweizerischen Bundesverfassung (Art. 90), ist festgehalten, dass die Kernenergiegesetzgebung in den Verantwortungsbereich des Bundes gehört.

Die Basis für die nukleartechnische Gesetzgebung bildet das Bundesgesetz von 1959 über die friedliche Verwendung der Atomenergie (AtG 1959). Demzufolge müssen Anlagen zur Lagerung radioaktiver Abfälle durch die Bundesbehörden bewilligt und überwacht werden. Das Bundesgesetz ist durch den Bundesbeschluss von 1978 zum Atomgesetz (BB/AtG 1978) ergänzt worden, in welchem festgehalten wurde, dass die Verursacher radioaktiver Abfälle für deren sichere Entsorgung verantwortlich sind und für alle diesbezüglich anfallenden Kosten aufzukommen haben. Im genannten Bundesgesetz und Bundesbeschluss sind ebenfalls die für eine schrittweise Realisierung eines geologischen Tiefenlagers notwendigen Bewilligungen aufgeführt. Das Atomgesetz wird z. Zt. als Kernenergiegesetz (KEG 2001) revidiert. Der dem Parlament unterbreitete Vorschlag des Bundesrates enthält neben den bereits oben erwähnten Punkten nachstehende Schlüsselemente:

- Die Option Kernenergie wird offen gehalten.
- Neue Kernkraftwerke unterstehen dem fakultativen Referendum.
- Die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente wird verboten. Bestehende Verträge sind davon nicht betroffen.
- Radioaktive Abfälle müssen in geologischen Tiefenlagern entsorgt werden.

Weitere wichtige Rechtsgrundlagen sind das Strahlenschutzgesetz von 1991 (StSG 1991) und die diesbezügliche Strahlenschutzverordnung von 1994 (StSV 1994).

Beide Gesetze besagen, dass in der Schweiz erzeugter radioaktiver Abfall grundsätzlich in der Schweiz entsorgt werden soll. Ein Export radioaktiver Materialien wird jedoch nicht ausgeschlossen und ist in Ausnahmefällen möglich. Die diesbezüglichen Bedingungen werden bzw. sind im Entwurf zum Kernenergiegesetz und im Strahlenschutzgesetz festgelegt.

In der Schweiz ist die Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK) Aufsichtsbehörde des Bundes für Nuklearanlagen inkl. geologische Tiefenlager für radioaktive Abfälle und die Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) beratendes Organ des Bundes. Die in einem geologischen Tiefenlager zu erreichenden Schutzziele sind in der HSK/KSA Richtlinie R-21 (HSK/KSA 1993) aufgeführt.

Wie oben erwähnt, sind in der Schweiz die Verursacher radioaktiver Abfälle gesetzlich für deren ordnungsgemässe Entsorgung verantwortlich. Um diese Verantwortung wahrzunehmen haben die Kernkraftwerkbetreiber und der Bund als Verantwortlicher für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung 1972 die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra gegründet. Die Nagra ist verantwortlich für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Zusammenhang mit der geologischen Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle. Andere Aufgaben der nuklearen Entsorgung wie z.B. Abfallkonditionierung, Zwischenlagerung, Bau und Betrieb von geologischen Tiefenlagern verbleiben im Verantwortungsbereich des einzelnen Abfallproduzenten oder bei Organisationen, welche spezifisch für solche Aufgaben eingesetzt werden.

1.2.3 Lagertypen

In der Schweiz sind zwei Lagertypen vorgesehen (Fig. 1.1):

- Ein geologisches Lager für schwach- und kurzlebige mittelaktive Abfälle (SMA). Die Abfälle stammen aus dem Betrieb und der Stilllegung schweizerischer Kernkraftwerke, der Medizin, Industrie und Forschung sowie aus der Wiederaufarbeitung, (schwachaktiver technologischer Abfall). Das Lager soll in einem Berg mit geeigneter Felsformation zu liegen kommen. Der Zugang ist horizontal vorgesehen und die Abfälle sollen in bergmännisch erstellten Lagerkavernen eingebracht werden. Als Standort für diesen Lagertyp war der Wellenberg im Kanton Nidwalden vorgeschlagen. Nach dem negativen Volksentscheid vom 22. September 2002 zur Konzession für den Sondierstollen wird für diese Abfälle eine neue Lösung zu suchen sein.
- Ein geologisches Lager für abgebrannte Brennelemente (BE), verglaste hochaktive Abfälle (HAA) und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA), wobei letztere primär aus der Wiederaufarbeitung stammen. Das Lager soll in einer tiefliegenden geologischen Formation zu liegen kommen und mit einer Rampe und/oder Vertikalschacht erschlossen werden, je nach Lage des Lagers und gewählter Wirtgesteinsformation. Die Lagerung der BE und HAA ist in Lagerstollen, jene der LMA in Lagertunneln vorgesehen.

Vor der Einlagerung werden die BE und HAA für rund 40 Jahre zwischengelagert, um die Nachzerfallswärme zu reduzieren. Die Zwischenlageranlagen

- ZWILAG, das kürzlich fertiggestellte zentrale Zwischenlager für alle Abfalltypen,
- ZWIBEZ, eine Anlage für BE und HAA, durch das Kernkraftwerk Beznau betrieben,
- BZL, das Bundeszwischenlager für Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung

und andere, bei den einzelnen Kernkraftwerken vorhandene Lager, verfügen über genügend Kapazität zur Aufnahme aller Abfälle schweizerischen Ursprungs.

1.2.4 BE/HAA/LMA-Programm

Die Entwicklung und Realisierung eines Tiefenlagers BE/HAA/LMA ist eine neue und komplexe Aufgabe, welche sich über viele Jahre hinzieht. Wie in anderen Ländern, wo die Lagerung hochaktiver Abfälle in tiefliegenden Gesteinsformationen verfolgt wird, geht auch die Schweiz schrittweise vor. Die wichtigsten Schritte auf dem Weg zur Realisierung eines Lagers BE/HAA/LMA sind in Fig. 1.2 dargestellt und werden nachstehend zusammenfassend beschrieben.

Bereits 1978 haben die Kernkraftwerkbetreiber und die Nagra die **Grundsätze der nuklearen Entsorgung in der Schweiz** in einem Konzeptbericht zusammengestellt (VSE 1978). Sowohl das Kristallin als auch Sedimentformationen wie Ton, Mergel, Salz und Anhydrit sind als potenzielle Wirtgesteine identifiziert worden.

Im Anschluss daran wurden **Projektstudien** für die Entsorgung von schwachaktiven, mittelaktiven und verglasten hochaktiven Abfällen durchgeführt, für welche damals noch je ein eigener Lagertyp vorgesehen war. In der Studie für die HAA wurde die geologische Lagerung im Kristallin und im Tongestein untersucht (Nagra 1980).

Anfangs der 80er Jahre wurde ein umfassendes **regionales Felduntersuchungsprogramm** in der Nordschweiz gestartet, dessen Hauptziel die Untersuchung des kristallinen Grundgebirges war. Dazu gehörte auch die Charakterisierung der überliegenden Sedimentschichten.

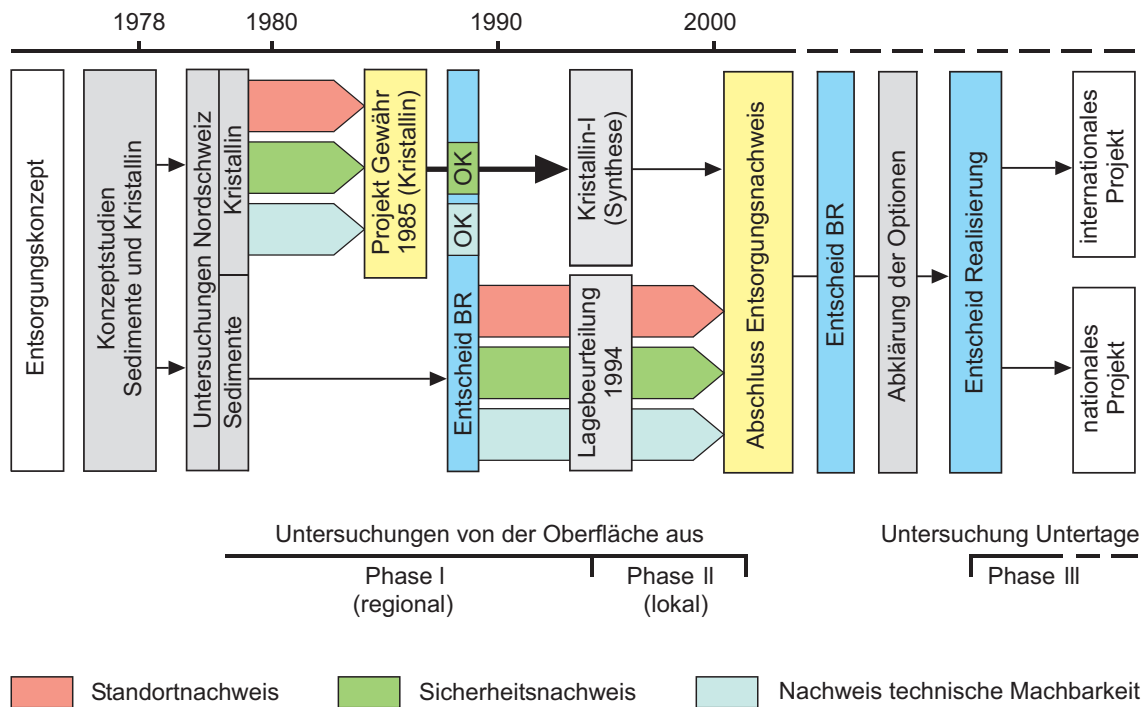


Fig. 1.2 Das schweizerische BE/HAA/LMA-Programm im Überblick

Neben dem Feldprogramm wurde ein umfangreiches **technisches Programm** in Angriff genommen. Dieses umfasste verschiedenste Arbeiten und Untersuchungen wie z.B. Entwicklung des modellhaften Inventars für die radioaktiven Abfälle, Untersuchungen zur Stabilität der Glasmatrix für HAA, Entwicklung des HAA-Lagerbehälters, Charakterisierung des Bentonits als Verfüllmaterial, Entwicklung der geochemischen Grundparameter, etc. Zudem wurden als Zentren zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten das Felslabor Grimsel (Kristallin, in Betrieb seit 1983) und das Felslabor Mont Terri (Opalinuston, als internationales Forschungsprogramm seit 1995 in Betrieb) realisiert und betrieben.

Einen zentralen Meilenstein in diesem Programm stellt das **Projekt Gewähr 1985** dar (Nagra 1985). Das Projekt Gewähr war das Resultat der gesetzlichen Forderung, die Machbarkeit der sicheren Entsorgung aller in der Schweiz anfallenden Abfälle, inkl. der schwach- und mittelaktiven Abfälle aufzuzeigen. Dieser Nachweis wurde als Auflage für den Weiterbetrieb der bestehenden Kernkraftwerke und den Bau neuer Anlagen formuliert (BB/AtG 1978). Von zentralem Interesse für die Behörden war die Frage der bautechnischen und betrieblichen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers und die Langzeitsicherheit einer solchen Anlage. Diese Nachweise mussten mit damals verfügbarer Technik und konkreten, realen geologischen Daten erbracht werden. Weil ein spezifischer Standort nicht gesucht war, standen als Datenbasis von der Oberfläche aus gewonnene Felddaten zur Verfügung. Für die HAA wurde im Projekt Gewähr das kristalline Grundgebirge gewählt. Der Abgabetermin für das Projekt Gewähr war auf das Jahr 1985 festgelegt worden. Aus verschiedenen Gründen – die Tiefbohrung Siblingen konnte wegen intensiver Opposition erst 1989 beendet werden – konnte nur ein Teil der letztlich verfügbaren Felddaten im Projekt Gewähr Eingang finden.

Mit dem Projekt **Synthese Kristallin I** ist die Analyse aller erhobenen Felddaten im regionalen Felduntersuchungsprogramm abgeschlossen und die Resultate in der Form einer geologischen Synthese dargestellt worden (Thury et al. 1994). Das Projekt enthält ebenfalls aktualisierte Arbeiten zur Langzeitsicherheit eines HAA-Tiefenlagers (Nagra 1994a). Daraus lässt sich die

Schlussfolgerung ziehen, dass ein HAA-Lager im Kristallin der Nordschweiz aus Sicht der Langzeitsicherheit machbar ist, obwohl zur Detailcharakterisierung eines potenziellen Standortes und der Optimierung der Lageranlage sowie der technischen Barrieren für einen gewählten Standort ein erheblicher Aufwand nötig wäre.

In der 1988 erfolgten **Stellungnahme zum Projekt Gewähr** sind die Behörden zum Schluss gelangt, dass für die hochaktiven Abfälle zwei der drei Grundsatzfragen in genügendem Umfang und Tiefgang beantwortet und somit erfüllt wurden, eine jedoch weiterer Abklärungen bedarf:

- Für hochaktive Abfälle und die aus der Wiederaufarbeitung stammenden langlebigen α -haltigen Abfälle ist der Sicherheitsnachweis erbracht.
- Noch nicht erbracht ist der Standortnachweis für diese Abfälle, d.h. der Nachweis von genügend ausgedehnten Gesteinskörpern mit den erforderlichen Eigenschaften.
- Aus baulicher Sicht bestehen keine Bedenken gegen die Erstellung des Endlagers.

Die Behörden verlangten, dass als nächster Schritt die Standorteignung überzeugender dargestellt werde und auch die Sedimente intensiver als alternatives potenzielles Wirtgestein für ein HAA-Lager untersucht werden. In der Folge hat die Nagra ihre geologischen Untersuchungen, Ingenieurstudien und Sicherheitsanalysen auf die Sedimentoption ausgedehnt und zeitgleich mit den Arbeiten zum Kristallin durchgeführt. Im nachstehenden Abschnitt werden die wichtigsten Punkte dieser Sedimentarbeiten erläutert.

Als erstes wurde das äusserst umfangreiche Datenmaterial bezüglich geeigneter geologischer Situationen und potenzieller Wirtgesteinsoptionen aufgearbeitet und als Resultat der **Opalinuston** und die **Untere Süsswassermolasse** als potenzielle Sedimentwirtgesteine vorgeschlagen. Die ausgeführten Arbeiten sind in zwei Zwischenberichten (Nagra 1988, Nagra 1991) und einem Statusbericht (Nagra 1994b) dokumentiert. Schlüsselfragen zur Langzeitsicherheit sind zu einem frühen Zeitpunkt identifiziert und sukzessive verfeinert worden. Als bevorzugte Option hat sich der Opalinuston erwiesen, sodass dafür ein Feldprogramm inkl. Seismik durchgeführt wurde (Seismikkampagne 1991/92). Die Untere Süsswassermolasse wurde auch unter Beizug von Felddaten Dritter ebenfalls untersucht. Anlässlich der Lagebeurteilung im Jahre 1994 (Nagra 1994b) wurde der Opalinuston als favorisierte Sedimentoption festgelegt und die Untere Süsswassermolasse als Reserveoption zurückgestellt. Ebenfalls festgelegt wurde, dass das Zürcher Weinland als Gebiet erster Priorität untersucht werden soll.

Der nächste Meilenstein im BE/HAA/LMA-Programm ist das **Projekt Entsorgungsnachweis**, in welchem das Schwergewicht der Arbeiten auf dem Nachweis der Standorteignung liegt, weil in der Stellungnahme der Behörden zum Projekt Gewähr der diesbezügliche Nachweis als nicht genügend beurteilt wurde. Da das Projekt Entsorgungsnachweis sich auf ein geologisches Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlandes als Wirtgestein abstützt, muss auch die Frage der bautechnischen Machbarkeit angegangen und, wegen der engen Beziehung zwischen Standorteignung und Langzeitsicherheit, auch der Nachweis der Langzeitsicherheit erneut erbracht werden. Das Projekt Entsorgungsnachweis beinhaltet somit auch den vorliegenden Bericht zur bautechnischen Machbarkeit und einen Bericht zur Langzeitsicherheit. Ein weiteres Ziel des Entsorgungsnachweises ist, Entscheidungsgrundlagen im Hinblick auf weitere Untersuchungen und eine spätere Realisierung zu liefern. Die Ziele des Entsorgungsnachweises werden in Kapitel 1.3 weiter umschrieben. Es sei an dieser Stelle vermerkt, dass die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers in der Schweiz noch einige Jahrzehnte in der Zukunft liegt. Das vorliegende Projekt muss deshalb nicht – und kann deshalb auch nicht – jenen

Umfang und Tiefgang haben, wie es zur Aufnahme von Bewilligungsverfahren zur Lagerrealisierung notwendig sein wird.

In der Zeit zwischen dem Entsorgungsnachweis und dem **Entscheid zur Lagerrealisierung** soll das Fachwissen weiter vertieft und dazu genutzt werden, die Option Opalinuston weiter zu entwickeln und die Vor- und Nachteile der Optionen "nationales Projekt" und "internationales Projekt" abzuklären. Weil ein geologisches Tiefenlager für BE/HAA/LMA erst in einigen zehn Jahren gebraucht wird, verbleibt genügend Zeit kritische Fragen, mit entsprechendem Tiefgang anzugehen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Nagra für das Projekt Entsorgungsnachweis auf eine ausgedehnte Erfahrung zurückgreifen kann, welche sowohl in der Bearbeitung des BE/HAA/LMA- wie auch des SMA-Programmes im Verlaufe der letzten mehr als 20 Jahre aufgebaut wurde. Massgebende Tätigkeitsgebiete sind:

- Durchführung regionaler Felduntersuchungen,
- Auswahl potenzieller Standortgebiete,
- Realisierung spezifischer Untersuchungen in potenziellen Standortgebieten, welche auch mehrere Tiefbohrungen und verschiedene Seismikkampagnen umfassten; wovon eine Kampagne mit neuester dreidimensionaler Aufnahme- und Auswertetechnik,
- Auswertung von Felduntersuchungsergebnissen und ihre Bewertung in Syntheseberichten,
- Entwicklung von Anlagen- und Betriebskonzepten, Anlagenauslegung für Kristallin und Sedimente inkl. umfangreicher Abklärungen zur Betriebssicherheit und zum Strahlenschutz,
- Bau und Betrieb untertägiger Felslabors, Entwurf und Realisierung wissenschaftlicher in situ Projekte,
- Abfallcharakterisierung; Entwicklung robuster technischer Barrierenkonzepte,
- Entwicklung und Anwendung von Werkzeugen für Sicherheitsanalysen und Erstellung verschiedener umfangreicher Sicherheitsberichte,
- Internationale Zusammenarbeit und Projektleitungen für Dritte.

1.2.5 Die wichtigsten Elemente der schrittweisen Lagerrealisierung

Die schrittweise Realisierung eines geologischen Tiefenlagers bedarf einer periodischen Standortbestimmung und Entscheidungsfindung. In diesem Prozess spielen der in Sicherheitsanalysen eines Lagersystems ermittelte Sicherheitsgrad und dessen Verlässlichkeit eine zentrale Rolle. Die Überprüfung der Langzeitsicherheit wird, entsprechend dem Projektfortschritt, periodisch, unter Einbezug der neuesten Daten, durchgeführt. Die Entscheidungsfindung wird sich aber auch auf andere Aspekte stützen, mit welchen auch die Sicherheitsberechnungen in engem Zusammenhang stehen. Es sind dies

- die Realisierungsstrategie,
- das Vertrauen der Gesellschaft in das gewählte Entsorgungs- bzw. Lagerkonzept und
- die Entwicklung eines Entscheidungsfindungsprozesses.

Die Realisierungsstrategie bestimmt das zu berücksichtigende Lagerkonzept und beinhaltet die Standortwahl und Standortcharakterisierung sowie die Anlagen- und Betriebsplanung. Die Realisierungsstrategie bestimmt ferner die auszuführenden Forschungs-, Entwicklungs- und

Demonstrationsprojekte inkl. deren zeitliche Abfolge. Zwischen diesen einzelnen Elementen besteht eine enge Wechselwirkung.

Das sozialpolitische Vertrauen in das gewählte Lagerkonzept mit den zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit vorgesehenen Massnahmen ist entscheidend für eine erfolgreiche Lagerrealisierung. Obwohl die Entsorgung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen seit Jahren die in der Schweiz verfolgte Lageroption ist und immer noch ist (AtG 1959, KEG 2001), ist aus einzelnen Kreisen die Forderung nach einer breiten Reevaluation aller Lagermöglichkeiten erhoben worden. Der Vorsteher des eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation hat deshalb die nachstehenden zwei Aktionen ausgelöst:

- Um die Mitwirkung der Öffentlichkeit in der Diskussion um Lagerkonzepte zu verbessern, wurde im Februar 1998 die Arbeitsgruppe "Energiedialog Entsorgung" gegründet. Mitglieder dieser Arbeitsgruppe waren Nicht-Regierungsorganisationen, Vertreter der betroffenen eidg. Departemente, der Nuklearindustrie, der Aufsichtsbehörde und der Nagra. Damit war eine Plattform für intensive Gespräche geschaffen, welche in der Folge auch genutzt wurde. Leider führten diese Gespräche nicht zu einem Konsens in Entsorgungsfragen. Die Diskussionen sind in einem Schlussbericht dokumentiert (EDE 1998).
- Im Juni 1999 wurde die Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) formiert, welche in ihrer Arbeit die sozialpolitischen Anforderungen bzw. Bedingungen für verschiedene Entsorgungsoptionen untersucht hat. Das durch die EKRA vorgeschlagene Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung, welches ebenfalls Eingang fand in den Entwurf des Kernenergiegesetzes (KEG 2001), ist so ausgelegt, dass es sowohl die Aspekte der Langzeitsicherheit wie die gesellschaftlichen Bedürfnisse berücksichtigt. In Kapitel 2 dieses Berichtes wird nochmals auf diesen Punkt eingegangen.

Im weiteren ist ein breit abgestützter Entscheidungsfindungsprozess von zentraler Wichtigkeit. Die bestehenden Gesetzesgrundlagen und der Entwurf zum Kernenergiegesetz (KEG 2001) sehen einen weitgehenden Einbezug der Öffentlichkeit vor und bilden den Rahmen für den Weg zur Realisierung eines geologischen Tiefenlagers.

1.3 Ziele des Entsorgungsnachweises und des Konzepts für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers

1.3.1 Ziel des Entsorgungsnachweises

Mit dem Projekt Entsorgungsnachweis werden zwei Hauptziele verfolgt:

1. Es ist die prinzipielle Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA/LMA in einem konkreten Standortgebiet aufzuzeigen, um damit die in der Stellungnahme der Behörden zum Projekt Gewähr formulierten Auflagen zu erfüllen. Dies umfasst den Nachweis, dass
 - geeignete geologische Bedingungen, insbesondere ein Wirtgestein genügender Ausdehnung für ein geologisches Tiefenlager existieren (Standortnachweis),
 - ein geologisches Tiefenlager im gewählten geologischen Umfeld gebaut werden kann (bautechnischer Machbarkeitsnachweis) und
 - die Langzeitsicherheit eines solchen geologischen Tiefenlagers gewährleistet werden kann (Langzeitsicherheitsnachweis).

2. Mit dem Entsorgungsnachweis werden den Bundesbehörden Grundlagen zur Festlegung des weiteren Vorgehens unterbreitet, über welches der Bundesrat voraussichtlich in einigen Jahren entscheiden wird.

Die Nagra schlägt den Behörden vor, künftige Untersuchungen im Hinblick auf eine geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle in der Schweiz auf den Opalinuston und das potenzielle Standortgebiet im Zürcher Weinland zu fokussieren. Sie stützt sich dabei einerseits auf das systematische, aufgrund von Sicherheitsabwägungen durchgeführte Auswahlverfahren (Nagra 1988, 1991, 1994b; HSK 2001; AkEnd 2002), welches zur Wahl des Opalinustons und des Untersuchungsgebiets Zürcher Weinland für den Entsorgungsnachweis führte und andererseits auf die Ergebnisse der Untersuchungen zum Entsorgungsnachweis (Nagra 2002a/b).

Zusätzliche Ziele des Projektes sind:

3. Bereitstellen von Unterlagen für die übergeordnete Entsorgungsplanung inkl. Kostenschätzungen, zur Beurteilung von möglichen alternativen Anlagenauslegungen und unterschiedlichen Abfallmengen, resp. Zusammensetzungen und für die Prioritätensetzung in Forschung und Entwicklung.
4. Das Projekt Entsorgungsnachweis soll auch einen Diskussionsbeitrag zur nuklearen Entsorgung mit verschiedenen Organisationen und Anspruchsgruppen sowie interessierten Kreisen der Bevölkerung liefern. Ein konstruktiver Dialog mit der Bevölkerung über die vorgeschlagenen Entsorgungslösungen (Entsorgungskonzepte, Sicherheitsaspekte und Umweltfragen) kann zu einem besseren Verständnis in der Öffentlichkeit führen und ist letztlich Voraussetzung für die erforderliche Akzeptanz.

1.3.2 Ziel des Anlagen- und Betriebskonzepts

Das Ziel des Anlagen- und Betriebskonzepts, also dieses Berichtes ist

1. der Nachweis der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA im Opalinuston des Zürcher Weinlandes und
2. die Bereitstellung projektspezifischer Unterlagen zur Führung des Langzeitsicherheitsnachweises.

Die besondere Herausforderung des bautechnischen Machbarkeitsnachweises liegt insbesondere darin, dass

- die Opalinustonschicht eine bescheidene Mächtigkeit hat, ausgedehnt ist, relativ tief liegt und um einige Grade geneigt ist,
- der Ton quellfähig ist und somit jeder Wasserzutritt möglichst vermieden werden muss,
- hohe tektonische Horizontalspannungen vorliegen,
- die BE/HAA-Behälter möglichst in der Mittelebene des Opalinustons eingebracht werden sollen,
- Fels Sicherungsmassnahmen auf Zementbasis in den Lagerstollen BE/HAA nicht erwünscht sind,
- die Lagerstollen BE/HAA möglichst gebirgsschonend aufgeföhren werden sollen,

- einerseits eine gute Verfüllung und Versiegelung gewährleistet, die möglichst früh eingebracht werden soll, andererseits mit zeitlich nicht definierbarer(n) Beobachtungsphase(n) mit evtl. sehr langen Offenhaltungszeiten für die Zugänge zu rechnen ist,
- eine Rückholung der Abfälle möglich sein soll,
- die Sicherheitsstandards sehr hoch sind, weil ein Tiefenlager eine Nuklearanlage ist und
- die Auflagen bezüglich physischem Schutz von Kernmaterialien (Safeguards) berücksichtigt werden müssen.

Der bautechnische Machbarkeitsnachweis bedingt den Entwurf eines Betriebskonzepts für die Einlagerung der BE/HAA/LMA inkl. Grobentwürfen der dazu benötigten Transport- und Handhabungsgeräte. Diese dienen einerseits dazu, zu zeigen wie die Abfälle und die technischen Barrieren eingebracht werden sollen, andererseits zur Festlegung der Grundabmessungen spezifischer Anlagenteile, die im Rahmen der bautechnischen Machbarkeit bearbeitet werden. Weil die Handhabung radioaktiver Abfälle in Kernanlagen zum Routinebetrieb gehört und bereits in der Beurteilung des Projektes Gewähr von den Behörden als machbar anerkannt wurde, werden Betriebsfragen nur soweit bearbeitet, wie dies zur Illustration und für das Verständnis des Gesamtprojektes und den Nachweis der bautechnischen Machbarkeit notwendig ist. Dies betrifft auch die Ausführungen zur Betriebssicherheit und zum Strahlenschutz.

Für die Entsorgung liegen die Abfälle in einlagerungsfähiger Form vor: Die BE und HAA in Stahlbehältern, die LMA in Stahlfässern bzw. Betongebinden. BE-Behälter werden in einer Konditionieranlage, HAA-Behälter in einer Verpackungsanlage hergestellt. LMA werden aus der Wiederaufarbeitung in einlagerungsfähiger Form angeliefert. Konditionier- und Verpackungsanlagen BE/HAA sind nicht an einen spezifischen Standort gebunden. Viele Gründe sprechen dafür, diese bei deren Realisierung in den Baukomplex der Aussenanlagen des BE/HAA/LMA-Lagers zu integrieren. Im Rahmen des hier zu führenden Nachweises der baulichen Machbarkeit einer Lageranlage im Opalinuston ist dies nicht relevant, und es müsste nicht weiter auf die Behandlung der Oberflächenanlagen eingegangen werden. Um sich aber ein Gesamtbild von den benötigten Anlagen eines geologischen Tiefenlager und dem ungefähren Platzbedarf machen zu können, sollen illustrativ und modellhaft die Aussenanlagen inkl. Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA dargestellt werden, ohne dass darauf im Berichtstext vertiefter eingegangen wird. Ebenso sollen als 3-D Modell die Anlagen des Schachtkopfes skizziert werden.

1.4 Berichte zum Entsorgungsnachweis

Der Entsorgungsnachweis wird in folgenden drei Projektberichten dokumentiert:

- Bericht zur Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse (Nagra 2002a),
- Bericht zum Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers; der vorliegende Bericht,
- Bericht zur Langzeitsicherheit, welcher in zwei Teile aufgeteilt ist,
 - den Sicherheitsbericht, "Safety report" (Nagra 2002b) und
 - den Bericht "Models, codes and data" (Nagra 2002c).

Die drei bzw. vier Projektberichte ihrerseits stützen sich auf eine unterschiedliche Anzahl weitere Referenzberichte und technische Grundlagen.

1.5 Methodik und Vorgehen zum bautechnischen Machbarkeitsnachweis, Gliederung des vorliegenden Berichtes

1.5.1 Methodik und Vorgehen

Um den bautechnischen Machbarkeitsnachweis führen zu können, ist ein Anlagen- und Betriebskonzept erstellt worden. Die einzelnen Bauelemente bzw. Anlagenteile, für welche der Machbarkeitsnachweis geführt wird, sind modellhaft als Baukastensystem zu einem in sich geschlossenen Gesamtprojekt zusammengefügt worden, welches in diesem Bericht als *Referenzprojekt* präsentiert wird. Um die Flexibilität des Systems zu prüfen, wird jeweils fall-spezifisch, im Sinne sog. "was, wenn"-Szenarien, auf mögliche andere Lösungen bzw. alternativ zu treffende Massnahmen eingegangen. Dies kann z.B. Abweichungen von den Projektvorgaben oder Erschwernisse in vorgesehenen Betriebsabläufen umfassen.

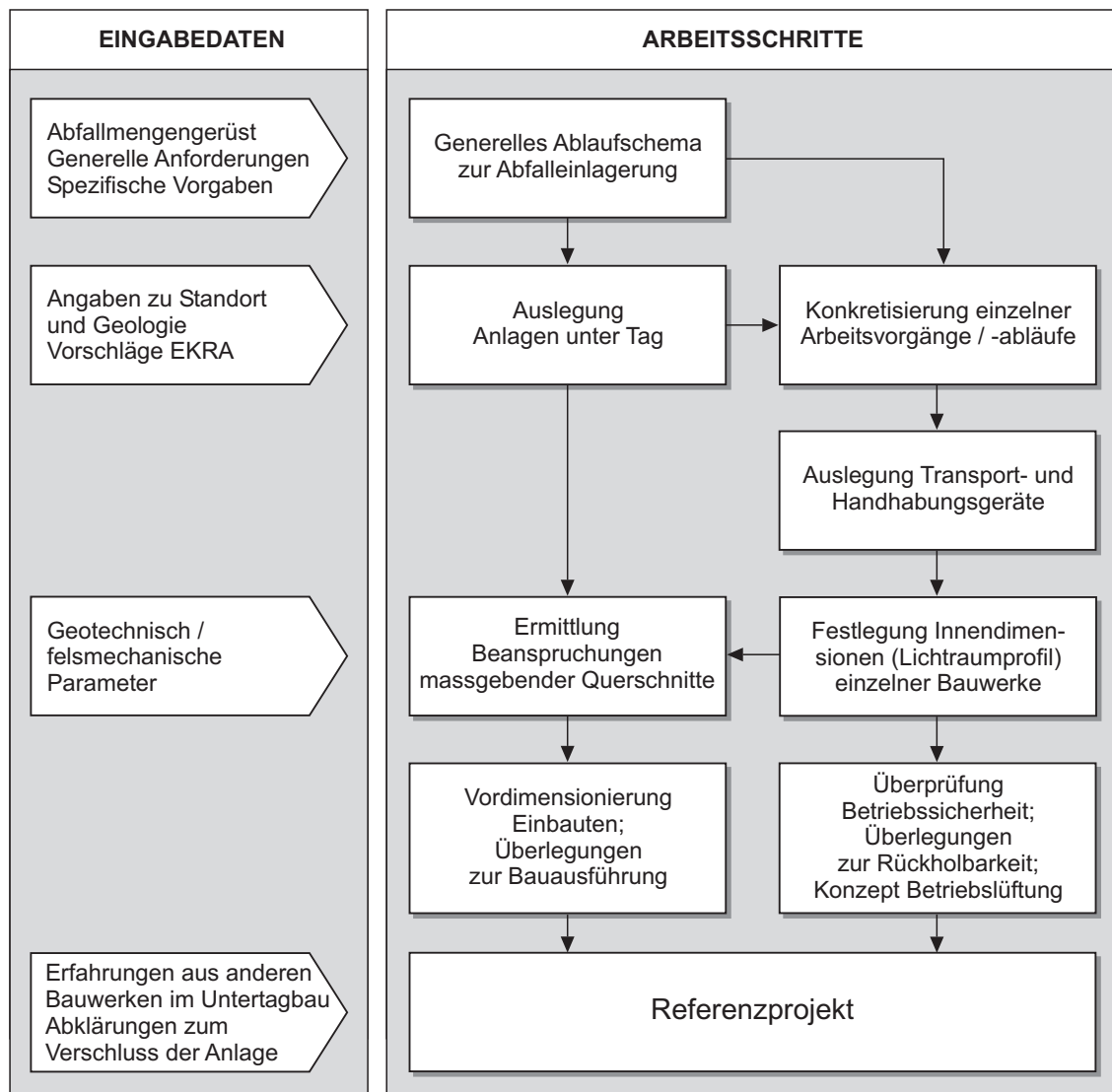


Fig. 1.3 Ablaufschema zum Nachweis der bautechnischen Machbarkeit
Zur einfacheren Lesbarkeit sind Rückkopplungen sowie Verbindungen bzw. Iterationen zur Geologie und Sicherheitstechnik nicht eingezeichnet

Das oben erwähnte Referenzprojekt ist das Resultat des in Fig. 1.3 dargestellten Vorgehens, welches die folgenden grundsätzlichen Schritte umfasst:

- Entwurf eines generellen Ablaufschemas zur Handhabung und Einlagerung von radioaktiven Abfällen inkl. deren technische Barrieren sowie Auslegung der Anlage, basierend auf spezifischen Vorgaben bzw. Anforderungen,
- Überschlägige Auslegung der Transport- und Handhabungsgeräte sowie Festlegung von Lichtraumabmessungen für die verschiedenen Anlagenteile unter Tag,
- Ermittlung der Beanspruchung massgebender Stollen- und Tunnelquerschnitte und Vordimensionierung der Einbauten; Überlegungen zur Bauausführung,
- Überprüfung der Betriebssicherheit, der Betriebslüftung und Überlegungen zur Rückholbarkeit, Definition bzw. Festlegung des Referenzprojektes unter Einbezug der Bau Erfahrung aus anderen Bauwerken; Abklärungen zum Verschluss der Anlage.

1.5.2 Gliederung des Berichtes

Der vorliegende Bericht zum Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, mit welchem die bautechnische Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA im Opalinuston des Zürcher Weinlandes abgeklärt wird, ist in 10 Kapitel gegliedert:

- Kapitel 1 enthält die Einleitung mit einem Überblick über das in der Schweiz verfolgte Entsorgungskonzept und die bisherigen dazu ausgeführten Arbeiten. Es umreist den Gesamtrahmen und die Zielvorgabe für den Entsorgungsnachweis und den vorliegenden Bericht sowie dessen strukturellen Aufbau.
- Kapitel 2 beschreibt die Grundlagen der Planung. Dies sind Rechtsgrundlagen, Auslegungsgrundlagen inkl. Grundsätze der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung (EKRA 2000, KEG 2001) und Unterlagen zum Standort und zur Geologie, sowie das Abfallmengengerüst.
- Kapitel 3 gibt einen Überblick über die Gesamtanlage und beschreibt im weiteren die verkehrstechnische Erschliessung, die ober- und unterirdischen Anlagen sowie die technische Ausrüstung, Handhabungseinrichtungen und die Strahlenschutzzone des Referenzprojektes. Das Vorhandensein genügender Raumreserven im Standortgebiet wird anhand eines willkürlich vergrösserten Abfallmengengerüsts überprüft.
- Kapitel 4 behandelt die bautechnische Machbarkeit der Anlage, wobei der Schwerpunkt auf den Anlagen im Opalinuston liegt. Für diesen werden für massgebende Stollen- und Tunnelquerschnitte die felsmechanischen Berechnungen und Ergebnisse inkl. Parametervariationen – im Sinne von "was, wenn" – beschrieben und auf ausführungstechnische Besonderheiten eingegangen. Die als unproblematisch einzustufenden überliegenden Schichten werden generell und summarisch behandelt. Ausführungen zum Bau der Gesamtanlage, welche Angaben zu den Realisierungsphasen inkl. generellem Bauprogramm, Bauvorgang und Bauinstallationen, Transporten und Deponien sowie zu bautechnischen Sicherheitsaspekten enthalten, sind im weiteren Gegenstand dieses Kapitels.
- Kapitel 5 beschreibt den Betrieb der Lageranlage. Dies umfasst Angaben zur betrieblichen Auslegung mit Abschätzung der Betriebsdauer, zum Betriebsablauf inkl. Transportgeräte, zum Verkehrskonzept, der Dokumentation der Abfälle und Qualitätssicherung sowie zum Betriebspersonal und Besucherkonzept inkl. Hinweisen zur Strahlenschutzüberwachung. Im weiteren wird das Unterhalts- und Wartungskonzept angesprochen und auf diverse "was, wenn"-Fragen eingegangen.

- Kapitel 6 befasst sich mit Betriebssicherheit und Strahlenschutz. Es wird die Zielsetzung und das grundsätzliche Vorgehen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit dargelegt, die radiologische Sicherheit in der Betriebsphase während Normalbetrieb und bei Betriebsstörungen, Zwischenfällen und Unfällen diskutiert. Die Anforderungen an die Anlage und die zu treffenden Massnahmen für die Sicherheit bei Normalbetrieb und zur Vermeidung bzw. Reduktion der radiologischen Auswirkungen spezifischer Störfälle werden aufgelistet und ergänzen die in Kapitel 2 gemachten Vorgaben. Als weiteres werden die für den Betrieb vorgesehenen Sicherheitsmassnahmen des Referenzprojekts dargestellt und eine Bewertung der Betriebssicherheit vorgenommen.
- Kapitel 7 umreist Massnahmen zur Kontrolle und Überwachung des geologischen Tiefenlagers in den verschiedenen Phasen der Lagerrealisierung und geht ferner kurz auf Fragen des physischen Schutzes von Kernmaterialien ein (Safeguards).
- Kapitel 8 beschreibt das Konzept für den Verschluss des geologischen Tiefenlagers und skizziert das Versiegelungskonzept der Anlage. Technische Lösungen für die Versiegelung der Lagerstollen und des Schachtes werden dargestellt und der nötige Zeitbedarf für den Verschluss des Lagers angegeben.
- Kapitel 9 skizziert am Beispiel für BE-Behälter eine mögliche technische Lösung zur Rückholung solcher Abfälle mit heutiger Technologie und verweist auf Rückholmöglichkeiten für HAA und LMA.
- Kapitel 10 enthält die aus den ausgeführten Arbeiten gezogene Schlussfolgerung und fasst die wichtigsten diesbezüglichen Argumente zusammen.

Am Schluss des Berichtes befindet sich das Referenzenverzeichnis.

2 Grundlagen der Planung

2.1 Rechtsgrundlagen

Ein geologisches Tiefenlager für radioaktive Abfälle ist im Sinne von Artikel 1, Absatz 2 des Bundesgesetzes vom 23. Dezember 1959 (AtG 1959) über die friedliche Verwendung der Atomenergie eine Atomanlage. Dementsprechend hat das Lager den einschlägigen Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien und Vorschriften über die nukleare Sicherheit zu genügen. Das rechtliche Umfeld der nuklearen Entsorgung mit den wichtigsten diesbezüglichen Grundlagen ist bereits in der Einleitung zu diesem Bericht in Kapitel 1.2.2 gegeben, weshalb an dieser Stelle darauf verwiesen wird.

Neben den nukleartechnischen Rechtsgrundlagen werden bei der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers auch die diesbezüglich relevanten Gesetze, Verordnungen, Richtlinien und Vorschriften sowie Regelwerke aus anderen Gebieten wie z.B. zu

- Transporten,
- Umweltschutz,
- Raumplanung,
- Gewässerschutz,
- Arbeitsschutz (Unfallverhütung, SUVA),
- Brandschutz/Brandverhütung,
- Fachspezifische Regeln und Normen etc.

zur Anwendung gelangen. Infolge des sehr langfristigen Charakters der Lagerrealisierung und zu erwartenden Änderungen in den oben aufgelisteten Gebieten werden spezifische diesbezügliche Rechtsgrundlagen hier nicht weiter aufgelistet. Fallweise wird in den nachstehenden Kapiteln auf entsprechende Unterlagen verwiesen.

2.2 Auslegungsgrundlagen

2.2.1 Komponenten des Sicherheitskonzepts eines geologischen Tiefenlagers

2.2.1.1 Sicherheitskonzept

Ziel der geologischen Tiefenlagerung ist der Einschluss der Abfälle in einem System von gestaffelten passiven Sicherheitsbarrieren (Mehrfachbarrieren), in welchem die meisten Radionuklide zerfallen, bevor sie die Biosphäre erreicht haben. Dabei müssen die Freisetzungsraten der nicht zerfallenen Radionuklide so gering sein, dass ihre Konzentration in der Biosphäre zu keiner Zeit zu einer Überschreitung der jährlichen Individualdosis von 0.1 Millisievert führt, HSK/KSA Richtlinie R-21 (HSK/KSA 1993). Dieses Mehrfachbarrierensystem wird aus technischen und natürlichen Barrieren aufgebaut.

2.2.1.2 Technische Barrieren

Das System der technischen Barrieren und sein Beitrag zur Langzeitsicherheit ist im Sicherheitsbericht (Nagra 2002b) im Detail beschrieben; es umfasst folgende Komponenten:

- Abfallmatrix: UO_2 /MOX-Pellets für BE, Glas für HAA, Zement oder Bitumen für LMA,

- Behälter: Stahl (Kupfer als Option) für BE/HAA; Stahl und Beton für LMA,
- Verfüllmaterial: Bentonit für BE/HAA, Mörtel für LMA.

Gemäss HSK/KSA Richtlinie R-21 (HSK/KSA 1993) soll mit den Behältern für BE/HAA ein vollständiger Einschluss über die ersten ca. 1000 Jahre angestrebt werden.

2.2.1.3 Natürliche Barrieren

Die natürlichen Barrieren werden durch das geologische Umfeld gebildet. Sie umschliessen die technischen Barrieren und müssen folgenden Beitrag zur Sicherheit des Tiefenlagers leisten:

- Schutz des technischen Barrierensystems vor äusseren Einwirkungen,
- Natürliche Transportbarriere für Radionuklide zwischen Tiefenlager und Biosphäre.

In der Sicherheitsanalyse stellt das Wirtgestein – in diesem Fall Opalinuston und Murchisonae-Schichten in Opalinuston-Fazies (Nagra 2002a) – aufgrund seiner geringen Durchlässigkeit und der für die Radionuklidrückhaltung günstigen geochemischen Eigenschaften die Haupttransportbarriere der Geosphäre dar.

Die Geosphäre in grösserer Entfernung vom Tiefenlager, d.h. die zwischen dem Wirtgestein und den regionalen Aquiferen liegenden überwiegend geringdurchlässigen Rahmengesteine bilden eine zusätzliche Barriere für die Ausbreitung von Radionukliden aus dem Wirtgestein. Sie bietet auch den unerlässlichen Langzeitschutz des Tiefenlagers vor Einflüssen von der Erdoberfläche aus.

2.2.2 Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung – KGL

2.2.2.1 Konzept

Wie bereits in der Einleitung kurz erwähnt, verlangt der Entwurf zum KEG (KEG 2001) die Entsorgung radioaktiver Abfälle in einem geologischen Tiefenlager, welches vor seinem Verschluss über einige Zeit überwacht wird. Diese Forderung entspricht dem Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung, wie es im Schlussbericht der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle EKRA (EKRA 2000) dargestellt ist. Dieses Konzept erfüllt die Forderung nach passiver Langzeitsicherheit, wie es durch die Endlagerung gegeben ist und wird gleichzeitig dem Bedürfnis nach Reversibilität gerecht

Der Vorschlag sieht nach Einlagerung der Abfälle eine ausgedehnte Überwachungsphase vor, während welcher die Abfälle relativ einfach rückgeholt werden können. Die Überwachung soll insbesondere auch mit dem sog. Pilotlager, einem separat angeordneten Lagerteil erfolgen. Mit den Resultaten der Überwachung und den Erkenntnissen aus dem Pilotlager soll die Möglichkeit geschaffen werden, entsprechende Entscheide zu gegebener Zeit treffen zu können. Dies kann sowohl der Entscheid zum Lagerverschluss sein aber auch Massnahmen umfassen, welche bis zu einer Rückholung bereits eingelagerter Abfälle gehen.

Das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung sieht folgende Systemelemente vor (Fig. 2.1):

- Hauptlager,
- Testlager,

- Pilotlager sowie
- Tunnelsystem, welches die Systemelemente mit einander verbindet sowie Tunnels, welche eine Nah- und Fernfeldüberwachung zulassen.

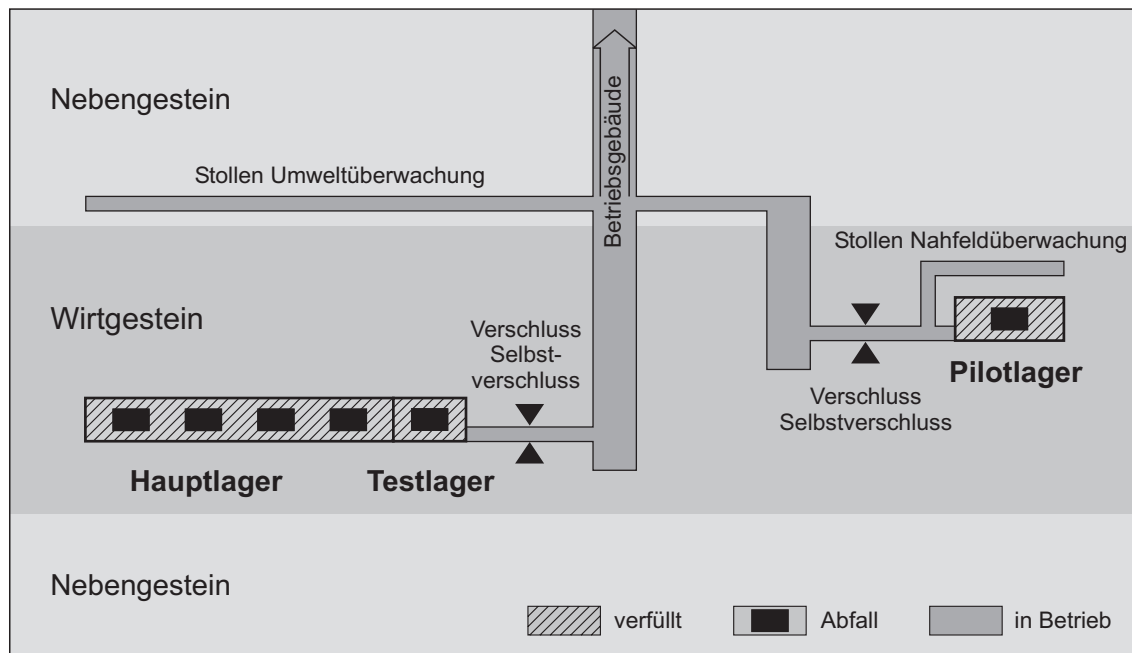


Fig. 2.1 Schematische Darstellung der Schlüsselemente des Konzepts zur kontrollierten geologischen Langzeitlagerung gemäss EKRA (EKRA 2000)

2.2.2.2 Testlager

Im Testlager sollen durch in situ Untersuchungen ergänzende Informationen zu den Oberflächenuntersuchungen gewonnen und für die Langzeitsicherheitsanalyse wichtige Parameter überprüft werden. Das Testlager, bei welchem es sich um ein Testlabor, bzw. Felslabor wie z. B. im Mont Terri oder auf der Grimsel handelt, soll Daten liefern, welche vor Aufnahme des Einlagerungsbetriebs im Hauptlager benötigt werden. Neben den Daten zur Langzeitsicherheit sollen auch weitere Unterlagen zum Lagerbau und zum Einlagerungsbetrieb erhoben werden. Das Testlager (Felslabor) wird aus verschiedenen Kammern, Nischen, Kurzstollen, Bohrungen etc. bestehen, welche entsprechend den in einer späteren Phase zu erstellenden Untersuchungsprogramme auszulegen sind.

2.2.2.3 Pilotlager

Das Pilotlager dient der Überwachung des Langzeitverhaltens der technischen Barrieren und des Nahfelds, der Bestätigung der Prognosemodelle, mit denen die Langzeitsicherheit nachgewiesen wurde und hat die Funktion eines Nachweislagers, welches über den Verschluss des Hauptlagers hinaus eine Langzeitkontrolle ermöglicht (EKRA 2000). Es soll auch Informationen zur Entscheidungsfindung zum Verschluss der Gesamtanlage liefern. Das Pilotlager soll somit möglichst früh erstellt, beschickt und verfüllt und in einen, dem Endzustand des Lagers möglichst entsprechende Situation gebracht werden. Es wird aus einer Serie von Bohrungen über-

wacht und soll auch die Möglichkeit zu einer evtl. destruktiven Probenahme bieten. Die Anlage soll so angeordnet werden, dass seine Überwachung auch über längere Zeiträume nach dem Verschluss des Hauptlagers hinaus weitergeführt werden kann. Wie das Hauptlager soll auch das Pilotlager kein signifikantes Risiko darstellen, falls es, wie dies evtl. in Krisenzeiten passieren könnte, aufgegeben würde, ohne dass die Zugänge der Gesamtanlage ordnungsgemäss verschlossen würden.

2.2.2.4 Hauptlager

Der grösste Teil der Abfälle wird im Hauptlager eingebracht. Alle Komponenten des Hauptlagers sind so auszulegen, dass sie, zusammen mit der natürlichen Barriere des Wirtgesteins, nach dem Lagerverschluss durch passive Sicherheit die verlangte Langzeitsicherheit erbringen. Die Auslegung des Hauptlagers hat so zu erfolgen, dass auch der Extremfall einer Lageraufgabe in der langen Überwachungsphase z.B. in Krisenzeiten, aufgefangen werden kann. Insbesondere sind unmittelbar nach Einbringung von BE/HAA-Behältern die verbleibenden Hohlräume zu verfüllen und das Hauptlager zu versiegeln, um sicher zu stellen, dass die gewünschte passive Langzeitsicherheit auch erreicht wird, wenn die Zugänge der Gesamtanlage nicht plangemäss verschlossen würden. Im weiteren sollten Vorkehrungen getroffen werden, welche einen einfachen und raschen Verschluss der Zugänge ermöglichen sollen.

2.2.3 Allgemeine Grundsätze und Vorgaben für die Auslegung eines Tiefenlagers

Bei der Realisierung eines Tiefenlagers für abgebrannte Brennelemente (BE), verglaste hochaktive Abfälle (HAA) und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) wird von den nachstehenden allgemeinen Grundsätzen ausgegangen, die in den verschiedenen Projektierungsphasen entsprechend zu berücksichtigen sind:

- Der Gesetzgeber fordert grundsätzlich die Entsorgung der Abfälle durch geologische Tiefenlagerung, wobei er verlangt, dass die unterirdische Anlage nach dem Verschluss auch ohne Überwachung sicher sein muss (KEG 2001).
- Die Rückholung der Abfälle soll bis zum Verschluss der Gesamtanlage soweit als technisch möglich und angemessen erleichtert werden und prinzipiell möglich bleiben (KEG 2001). Im Interesse der Langzeitsicherheit werden aber keine Vorkehrungen zu einer technisch einfachen und kostengünstigen Rückholung getroffen, welche die Langzeitsicherheit beeinträchtigen könnten (IAEA 1998).
- Das Lager wird für BE, HAA und LMA ausgelegt. Die BE und HAA werden wie im bisherigen Lagerkonzept der Nagra, siehe z.B. (Nagra 1985), zentrisch und horizontal in die Lagerstollen eingebracht, die LMA in separaten Lagertunneln gestapelt. Silos werden wegen der beschränkten Wirtgesteinsmächtigkeit nicht berücksichtigt.
- Das Lager wird für abgebrannte Brennelemente und das Abfallvolumen primär aus der Wiederaufarbeitung von Abfällen aus dem Betriebszyklus der bestehenden schweizerischen Kernkraftwerke ausgelegt. Die Anlage soll über genügende Kapazitätsreserven für künftige technische Entwicklungen verfügen (KEG 2001, McGinnes 2002).
- Mit einem Qualitätssicherungssystem wird sichergestellt und der Nachweis erbracht, dass nur solche Abfälle im Lager eingelagert werden, für welche die Sicherheit nachweislich gegeben ist und welche mit der Betriebsbewilligung behördlich genehmigt und freigegeben worden sind.
- Mit einem Datendokumentationssystem wird die zentrale Übersicht über alle zur Einlagerung übernommenen Abfallgebinde ermöglicht.

- Arbeitsabläufe im gesamten Tiefenlager werden möglichst einfach gestaltet; ebenso werden die dazu notwendigen Handhabungsgeräte konzipiert und robust ausgelegt.
- Die Langzeitsicherheit des Lagers wird durch ein System mehrfacher passiver Sicherheitsbarrieren gewährleistet. Dieses umfasst technisch erstellte Barrieren und das Wirtgestein mit den unmittelbar angrenzenden Schichten als hydraulische und Transportbarriere sowie die Geosphäre als mechanischen Schutz der technischen Einschlussmassnahmen (Nagra 2002b).
- Der Verschluss des Tiefenlagers wird, in Anlehnung an (KEG 2001, EKRA 2000), phasenweise vorgesehen. Ein jederzeitiger Verschluss der Anlage innerhalb weniger Jahre wird gemäss HSK/KSA Richtlinie R-21 ebenfalls sichergestellt (HSK/KSA 1993).
- Bei der Realisierung des geologischen Tiefenlagers, d.h. von der Projektierung bis zum Verschluss der Gesamtanlage werden, dem jeweiligen Projektstand angepasst, entsprechende Qualitätssicherungsmassnahmen getroffen.
- Bei der Ausarbeitung der bautechnischen und organisatorischen Aspekte der Lagerprojekte wird auch der konventionellen (nichtnuklearen) Sicherheit sowie der Umweltverträglichkeit und den Fragen der Raumplanung ein hoher Stellenwert beigemessen. Diese Aspekte werden insbesondere in den weiteren Planungsphasen zu berücksichtigen sein.

2.2.4 Spezifische Vorgaben der Anlagenauslegung für die Betriebsphase

In diesem Abschnitt werden die wesentlichsten Vorgaben aufgelistet, die für den sicheren und reibungslosen Betrieb wichtig sind und deren Nichtbeachtung für die Gesamtanlage oder Teilen davon und damit z.T. auch für die Umgebung negative Folgen haben können. Im einzelnen werden die spezifischen Anforderungen und dazu notwendigen Auslegungsgrössen in späteren Projektphasen im Detail, auch unter Einbezug von Ergebnissen aus Untersuchungen zur Betriebssicherheit, festzulegen und durch die Behörden zu genehmigen sein; siehe z.B. HSK Richtlinie R-30 (HSK 1992).

2.2.4.1 Schutz gegen Einwirkungen

Aussenanlagen

Die Bauwerke der Aussenanlagen sind so anzulegen, dass eine Überflutung, insbesondere der Zugänge zu den Anlagen unter Tag, ausgeschlossen werden kann.

Die Auslegung der Bauwerke hat so zu erfolgen, dass Erdbeben zu keinen unzulässigen Schäden führen.

Anlagen, in welchen Abfälle umgeladen und somit aus Transportbehältern entnommen werden, sind gegen Flugzeugabsturz zu sichern.

Massnahmen gegen Einwirkungen Dritter sind bei der weiteren Projektbearbeitung in Absprache mit den zuständigen Behörden festzulegen (BFE 2001).

Anlagen unter Tag

In den Anlagen unter Tag sind geeignete Massnahmen vorzusehen, welche eine Flutung derselben infolge Wassereintrich verhindern. Als Vorsichtsmassnahme sind die Lagerstollen und Lagertunnel zudem nach ihrer Beschickung zu verschliessen.

Weltweite Erfahrung zeigt, dass untertägige Anlagen ausserordentlich resistent sind gegen Erdbeben und dass geringe Schäden nur in Portalbereichen im Lockergestein zu erwarten sind (Müller et al. 2002). Die Anlagen sind entsprechend auszulegen.

Systeme und Komponenten

Obschon Auswirkungen eines Gebindeabsturzes während Handhabung und Transport im Lagerbetrieb nicht zu unzulässigen radiologischen Belastungen führen, sind die Hebezeuge so zu konzipieren, dass ein Absturz weitgehend vermieden wird.

In der Zugangsrampe verkehrende Transportfahrzeuge sind so auszulegen, dass ein Anhalten jederzeit sichergestellt ist. Ein unkontrolliertes in die Tiefe Fahren muss zwingend vermieden werden.

Der Einsatz von brennbarem Material oder brennbaren Komponenten (Brandlasten) ist zu minimieren. Die Entstehung eines Brandes, insbesondere in den Anlagen unter Tag, ist durch geeignete Massnahmen zu verhindern (Strassentunnel Montblanc, Gotthard!).

Zur Beurteilung der Robustheit der Anlage ist ein seltener, schwerer Störfall (Auslegungsstörfall) zu unterstellen, dessen Konsequenzen im Sinn einer "umhüllenden Abschätzung" analysiert werden müssen. Ein solcher Störfall wird in einer späteren Projektbearbeitungsstufe von der Nagra, basierend auf den anlagen- und betriebsspezifischen Gegebenheiten vorzuschlagen und durch die HSK zu genehmigen sein.

2.2.4.2 Strahlenschutz

Zum Schutz der in der Umgebung lebenden Bevölkerung und des Betriebspersonals sowie der Besucher vor ionisierender Strahlung, die von den radioaktiven Stoffen ausgehen, sind vorbeugende bauliche, technische, betriebliche und überwachende Massnahmen zu treffen. Dies ist heute Stand der Technik.

Mit diesen Schutzmassnahmen muss sichergestellt werden, dass die Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung (StSV 1994) und die Vorgaben der HSK/KSA Richtlinien eingehalten werden (HSK 1988, 1997; HSK/KSA 1993, 1995). Im weiteren sind die Anlage sowie die Betriebsabläufe nach den Grundsätzen des ALARA-Prinzips (**as low as reasonably achievable**) auszulegen (HSK/KSA/KUeR 1980).

2.2.5 Anforderungen zur Sicherstellung der radiologischen Sicherheit in der Nachbetriebsphase

Die Schutzziele für die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle sind in der HSK Richtlinie R-21 vom November 1993 (HSK/KSA 1993) definiert, und deren Einhaltung wird ausführlich im Sicherheitsbericht (Nagra 2002b) dargelegt. Um die für die Nachbetriebsphase vorgegebenen Schutzziele zu erreichen, muss ein geeignetes Standortgebiet mit einem entsprechenden Wirtsgestein gefunden und charakterisiert werden. Die dazu ausgeführten Arbeiten sind im geologischen Synthesebericht (Nagra 2002a) im Detail beschrieben.

Die wichtigsten seitens Anlagen und Betrieb einzuhaltenden Anforderungen bzw. zu treffenden Massnahmen zur Sicherstellung der radiologischen Sicherheit in der Nachbetriebsphase werden nachstehend aufgelistet. Sie entsprechen dem heutigen Kenntnisstand und sind aus den Untersuchungen zur Langzeitsicherheit, z.B. (Nagra 2002b), abgeleitet.

- Die Lagerzone ist mit mehr als 40 m Abstand zur Wirtgesteinsgrenze, vorzugsweise aber möglichst zentral, d.h. im Bereich der Mittelebene der Wirtgesteinsschicht anzuordnen. Dadurch werden möglichst lange Fliesswege vom Abfall zum Nebengestein erreicht.
- Gegen eventuelle auslegungsbestimmende Störzonen im Wirtgestein ist ein horizontaler Abstand von mindestens 100 m einzuhalten.
- Zur Vermeidung unzulässig hoher Temperaturen in der Lagerzone sind als Abstand für die Lagerstollen 40 m bei den BE- und bei den HAA-Behältern vorgegeben. Als lichter Abstand zwischen den Behältern sind in Stollenlängsachse 3 m einzuhalten.
- Zur Vermeidung ungünstiger chemischer Wechselwirkungen müssen Abfälle mit entsprechenden Eigenschaften separat eingelagert werden. BE/HAA und LMA sind so einzulagern, dass eine gegenseitige chemische Beeinflussung nicht zu erwarten ist. Aus denselben Gründen werden die LMA in zwei Gruppen aufgeteilt: LMA-1 und LMA-2 (Tab. 2.2).
- Die Auswirkung von Gasen, die durch anaerobe Korrosion/Degradation entstehen können, muss möglichst gering gehalten werden. Der Zugang zu den Lagertunneln LMA soll deshalb möglichst hoch über der Tunnelsohle erfolgen (Wannenkonzept). Im weiteren sind in den Paramenten (Wänden) und im Gewölbe eine mindestens 25 cm starke poröse Mörtelschicht einzubauen.
- Zur Langzeitstützung ausbruchnaher Gesteinsschichten sind in den Lagertunneln LMA die nach der Abfalleinlagerung verbleibenden Hohlräume mit Mörtel zu verfüllen.
- Die Einwirkung grösserer hydraulischer Gradienten über längere Zeiträume soll im unmittelbaren Bereich eingelagerter Abfälle vermieden werden, ebenso eine geochemische Verwitterung des Wirtgesteins infolge längerem Luftzutritt.
- Der Wasserfluss durch die mit Abfällen gefüllten Lagerstollen BE/HAA soll möglichst klein sein. Die verbleibenden Hohlräume sind deshalb mit Bentonitgranulat und/oder Bentonitblöcken zu verfüllen.
- Zur Vermeidung ungünstiger chemischer Einwirkungen auf die Bentonitverfüllung der zentrisch in Lagerstollen einzubringenden BE/HAA darf in diesen Stollen im Bereich eingelagerter Abfälle kein auf Zementbasis hergestelltes Material wie z.B. Spritzbeton, eingesetzt werden. Falls notwendig, sind zur Felssicherung Anker und Stahleinbauten zu verwenden. Das Belassen von Transportschienen in Lagerstollen und Lagertunneln, nicht aber in Versiegelungsstrecken, ist aus Gründen der Langzeitsicherheit zulässig und für die erleichterte Rückholbarkeit der Abfälle vorteilhaft.
- Zwischen Abfallbehältern BE/HAA und anstehendem Fels dürfen im Bereich der Bentonitverfüllung keine in *radialer* Richtung durchgehende Einbauten aus Fremdmaterialien vorhanden sein.
- Zur Gewährleistung der chemischen Barrierenwirkung muss in den Lagertunneln LMA, im Gegensatz zu den Lagerstollen BE/HAA, genügend zementhaltiges Material vorhanden sein und möglichst gleichmässig um die Abfallgebinde angeordnet werden.
- An Schlüsselstellen müssen die Zugänge beim Verschluss der Anlage versiegelt werden. Diese Schlüsselstellen werden in den Analysen zur Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers festgelegt.

- Das Lager muss so ausgelegt werden, dass das verschlossene Pilotlager so lange überwacht werden kann, bis der Entscheid zum Verschluss der Gesamtanlage getroffen wird.
- Zur Hohlraumsicherung sämtlicher Untertageanlagen ist, *mit Ausnahme der Lagerstollen BE/HAA*, der Einsatz konventioneller Felssicherungsmassnahmen wie Anker, Spritzbeton etc. zulässig.

2.3 Projektgrundlagen bezüglich Standort und geologische Verhältnisse

2.3.1 Standort

In einem systematischen Auswahlverfahren wurde als potenzielles Standortgebiet das Zürcher Weinland ausgewählt (Nagra 1988, 1991, 1994b, HSK 2001). Dieses ist Teil des Untersuchungsgebietes, welches von der Nagra durch 3D-Seismik (Birkhäuser et al. 2001) und durch die Bohrung Benken (Nagra 2001) charakterisiert worden ist (Fig. 2.2). Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass sich in diesem Gebiet verschiedene Möglichkeiten zur Plazierung eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA bieten. Unter Beachtung konservativ angesetzter Erosionsszenarien wurde für den vorliegenden bautechnischen Machbarkeitsnachweis eine modellhafte, nicht weiter konkretisierte Lokation mit einer Tiefe von rund 650 m im Zentrum des Lagerbereichs BE/HAA festgelegt.

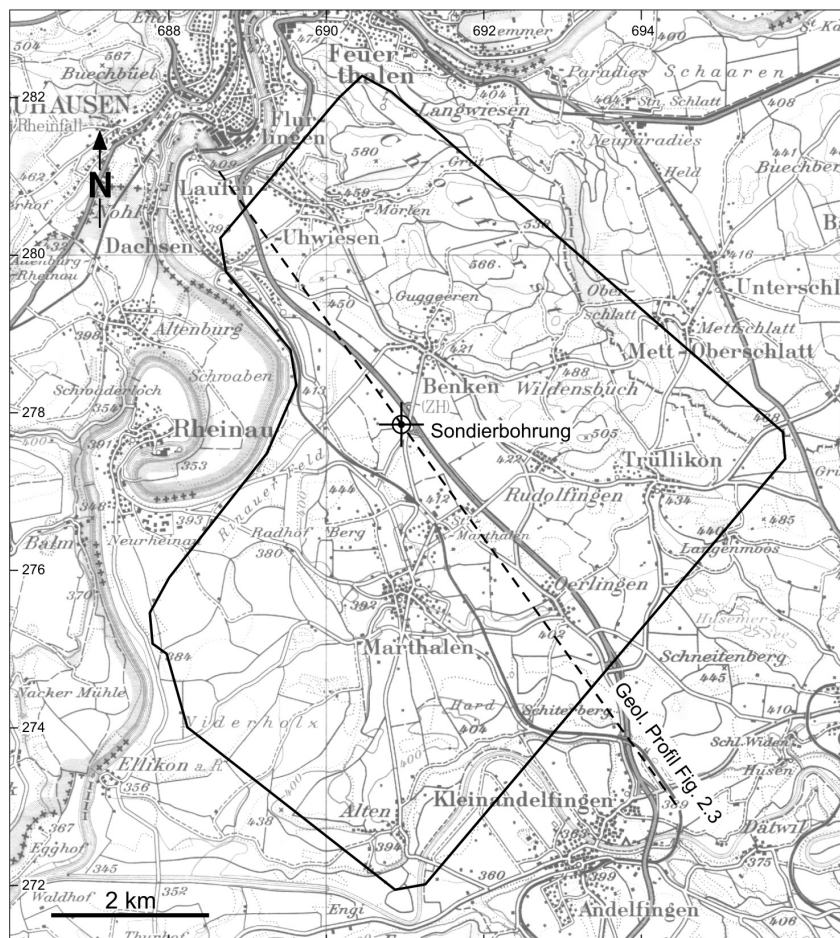


Fig. 2.2 Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland mit Sondierbohrung Benken

Für die Anlagen über Tag, also die Aussenanlagen im Portalbereich und die Anlagen im Schachtkopfbereich ist für den bautechnischen Machbarkeitsnachweis die Festlegung eines Standortes nicht notwendig, weil die Region im allgemeinen verkehrstechnisch gut erschlossen ist und es verschiedene Optionen gibt, diese Anlagen anzuordnen. Die Festlegung des Standortes für die Anlagen über Tag bleibt somit der weiteren Projektierung unter Einbezug insbesondere raumplanerischer Aspekte sowie lokaler Präferenzen vorbehalten. Es ist zudem zu beachten, dass eine detailliertere Betrachtung dieser Anlagen nicht erforderlich ist, da deren Machbarkeit als gegeben vorausgesetzt werden kann.

2.3.2 Geologische Verhältnisse

2.3.2.1 Wirtgestein

Als Basis für die *Erstellung des Lagerlayouts* dienen die folgenden Ergebnisse der geologischen Untersuchungen (Nagra 2001, Birkhäuser et al. 2001, Müller et al. 2002, Nagra 2002a):

- Die Mittelebene des Opalinuston variiert im Untersuchungsgebiet zwischen ca. 450 m und ca. 850 m unter Terrain (Fig. 2.3). Als Zentrum des Lagerbereiches BE/HAA wird für den bautechnischen Machbarkeitsnachweis eine Tiefenlage unter Terrain von ca. 650 m vorgegeben.

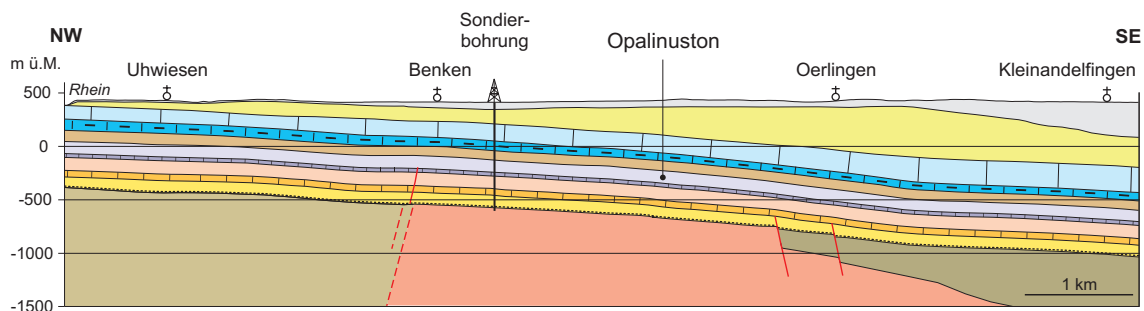


Fig. 2.3 Geologisches Profil durch das Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland mit Sondierbohrung Benken (Nagra 2002a)

- Die Schichtstärke beträgt zwischen ca. 100 m und ca. 120 m. Für das Projekt Opalinuston wird von 100 m ausgegangen.
- Die Schichtneigung bewegt sich zwischen ca. 3° und ca. 6°. Für die Planung wird von 4° ausgegangen.
- Der Opalinuston ist sehr ruhig und gleichmässig gelagert, sodass für Projektierungszwecke über einen Bereich im Streichen von ca. 2 km und im Fallen von ca. 1 km die obere und untere Begrenzung der Formation als zueinander parallele Ebenen angenommen werden dürfen.
- Im oben genannten Bereich von ca. 2 km auf 1 km kann davon ausgegangen werden, dass keine auslegungsbestimmenden Störzonen zu erwarten sind.

Die Parameter zur *Führung des felsmechanischen Nachweises* für Untertagbauten im Opalinuston stammen aus (Nagra 2002a) und sind nachstehend in Tabelle 2.1 zusammengestellt.

Die Spannungsverhältnisse in 650 m Tiefe sind wie folgt charakterisiert: Die maximale horizontale Spannung beträgt 22.6 MPa und ist ca. N–S ausgerichtet; die minimale horizontale Spannung beträgt 15.1 MPa und für den Überlagerungsdruck sind 15.9 MPa, für den max. Porenwasserdruck 8 MPa ermittelt worden (Nagra 2002a). Die Schichten fallen nach Südosten ein.

Eigenschaften	Parameter	Variationsbereich	Mittelwert	Einheit
Dichte und elastische Eigenschaften des Gebirges	Dichte	2'485–2'565	2'525	kg/m ³
	E-Modul parallel zur Schichtung	5.5–15.5	10.5	GPa
	E-Modul senkrecht zur Schichtung	2.5–7.5	5	GPa
	Poissonzahlen	–	je 0.27	–
Festigkeitseigenschaften der Schichtpakete	Spitzenreibungswinkel	21.0–24.6	22.8	°
	Restreibungswinkel	20.0–24.0	22.0	°
	Spitzenkohäsion	6.9–8.6	7.75	MPa
	Restkohäsion	3.5–4.3	3.9	MPa
	Dilatanzwinkel (Spitze und Rest)	–	0	°
	Zugfestigkeit	1.0–2.5	1.75	MPa
Festigkeitseigenschaften der Schichtung	Spitzenreibungswinkel	20.0–24.1	22.05	°
	Restreibungswinkel	20.0–22.0	21.0	°
	Spitzenkohäsion	1.7–1.9	1.8	MPa
	Restkohäsion	0.7–1.0	0.85	MPa
	Dilatanzwinkel (Spitze und Rest)	0–5.0	2.5	°
	Zugfestigkeit	0–1.2	0.6	MPa
Sonstige Eigenschaften des Gebirges	Porosität	9–13	11.0	%
	Temperatur	–	38	°C

Tab. 2.1 Felsmechanische Kennziffern des Opalinustons (Nagra 2002a)

2.3.2.2 Überliegende Schichten

Mit der Bohrung Benken (Nagra 2001) wurden die für das Zürcher Weinland charakteristischen Formationen erbohrt. Die Bohrung zeigt einen für die gesamte Region repräsentativen geologischen Querschnitt, mit welchem die im Untergrund liegenden Schichten bautechnisch genügend gut charakterisiert werden können. Einzig in der Lockergesteinsstrecke sind, je nach Standort in der Region, auch bautechnisch schwierigere aber auch vereinfachende Verhältnisse möglich.

Die folgenden Angaben beziehen sich auf die Bohrung Benken (Nagra 2002a, Fig. 2.4). Die Beschreibung der überliegenden Schichten wird auf die *Lockergesteins-* und *Festgesteinsstrecke* aufgeteilt, und am Schluss folgt ein Abschnitt über mögliche *Gefährdungen* während des Baus. Eine vereinfachte graphische Darstellung und Klassifizierung der Festgesteine gemäss (SIA 1998) ist in Beilage 2-1 gegeben und stammt aus (Nagra 2002a).

Lockergesteine (0–68.0 m)

Das Quartär besteht im Gebiet der Bohrung Benken aus Verlandungssedimenten, Deltaablagerungen, eiszeitlichen Seeablagerungen und Grundmoräne.

- Verlandungssedimente und Deltaablagerungen (0 – 8.0 m)

Bis in 1.2 m Tiefe wurde Torf angetroffen, welcher von tonig, sandiger Seekreide unterlagert wird (1.3 m mächtig). Ab 2.7 m folgen Mittel- bis Grobsande mit Feinkieslagen. Zwischen 3.0 und 3.9 m folgt eine Einschaltung von weichen siltigen Tonen. Danach folgt eine Wechsellagerung von tonigem Silt und sauberem Fein- bis Mittelsand (bis 7.5 m). Mittlere Durchlässigkeit: 3×10^{-5} m/s.

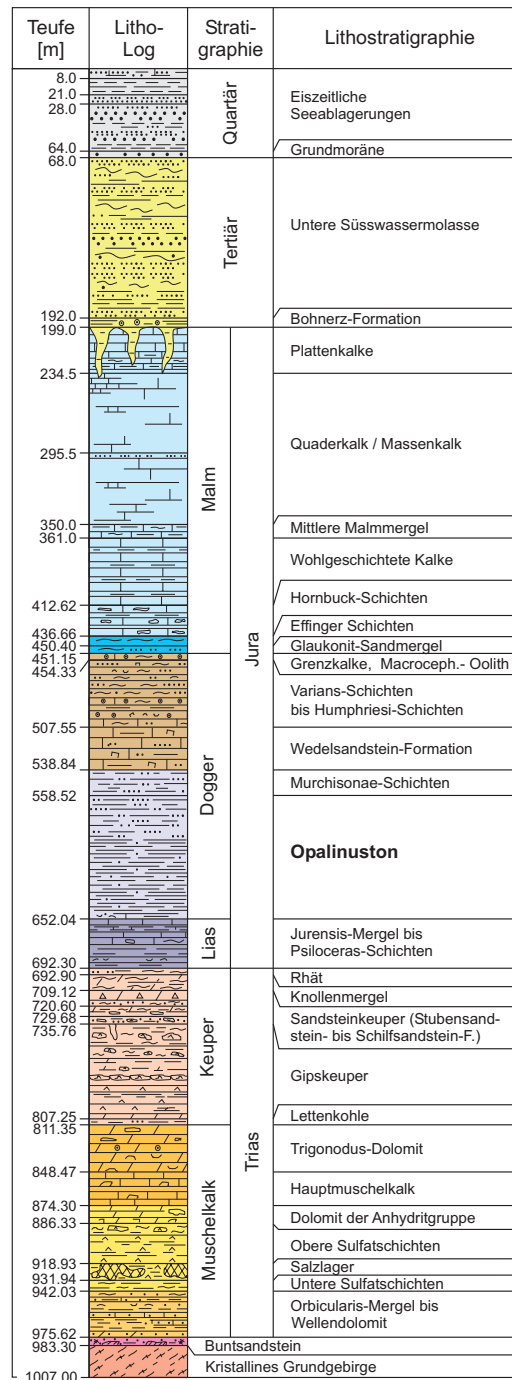


Fig. 2.4 Geologisches Profil der Sondierbohrung Benken (Nagra 2002a)
OK Terrain = 404.3 m ü.M.

- Eiszeitliche Seeablagerungen (8.0 m – 64.0 m)

Die von 8.0 m bis 20.1 m reichende Sedimentabfolge wird dominiert von siltigen bis fast reinen, plastischen Tonen (eiszeitlicher Seebodenlehm). Darauf folgt eine 7.3 m mächtige Sequenz von feinsandigen Silten, welche oft Kieslagen enthalten (eiszeitliche Seeablagerungen). Die nachfolgenden Ablagerungen, welche bis in eine Tiefe von 63.5 m reichen, bestehen aus einer ca. 36 m mächtigen Serie von sauberen Sanden mit Zwischenlagen aus tonigen Silten. Auffallend sind bis 2 m mächtige Einschaltungen von sandig-siltigen Kiesen. Diese Serie wird als gletschernaher Seeablagung gedeutet. Die gletschernahen Seeablagerungen bilden einen Aquifer mit einer durchschnittlichen Durchlässigkeit von 9×10^{-5} m/s.

- Grundmoräne (64.0 m – 68.0 m)

Bis zum Ende der Lockergesteinsstrecke wurden feinsandige Silte mit reichlich, sehr unterschiedlich gerundetem Kies angetroffen.

Festgesteine (68.0 m – 652.0 m)

Die Festgesteinsstrecke wurde aufgrund geologischer, hydrogeologischer und geotechnischer Daten in die fünf folgenden Homogenbereiche unterteilt:

- Tertiär; Untere Süsswassermolasse und Bohnerz-Formation:
Teufenabschnitt 68.0 m – 199.0 m
- Oberer Malm; Plattenkalke bis Mittlere Malmmergel (tonarm, verkarstungsfähig):
Teufenabschnitt 199.0 – 361.0 m
- Unterer Malm; Wohlgeschichtete Kalke bis Glaukonit-Sandmergel (tonreicher):
Teufenabschnitt 361.0 m – 451.2 m
- Oberer und Mittlerer Dogger; Grenzkalke bis Wedelsandstein:
Teufenabschnitt 451.2 m – 538.8 m
- Unterer Dogger; Opalinuston inkl. Murchisonaeschichten:
Teufenabschnitt 538.8 m – 652.0 m

Diese werden im folgenden kurz beschrieben:

- Tertiär; Untere Süsswassermolasse inkl. Bohnerz-Formation: Abschnitt 68.0 m – 199.0 m

Die terrestrischen Ablagerungen der Unteren Süsswassermolasse bestehen aus fluviatilen Ablagerungen, Überschwemmungssedimenten und Seeablagerungen. Die lithologische Ausbildung dieser Gesteinsserie besteht aus einer Wechsellagerung von bunten Mergeln, Tonsteinen, tonigen z.T. feinsandigen Siltsteinen und Sandsteinen. Die Sandsteine sind gut, z.T. aber auch mässig bis schlecht zementiert. Daher muss lokal mit höheren Durchlässigkeiten (10^{-6} m/s) gerechnet werden.

Die nur wenig mächtige Bohnerzformation besteht aus Auslaugungs- und Rückstandsedimenten, die durch die Verwitterung von Kreide- und Malmkalken bei tropisch-feuchtwarmem Klima während der kretazischen/tertiären Hebungsphase entstanden sind. Diese Erosionsprodukte bestehen weitgehend aus Tonen und Bohnerz und füllen oft die verkarstete Malmoberfläche.

- Oberer Malm (tonarm, Karst): Abschnitt 199.0 m – 361.0 m

Der Obere Malm umfasst die folgenden lithostratigraphischen Einheiten: Plattenkalke –Quaderkalk/Massenkalk – Mittlere Malmmergel.

Diese marinen Schelfsedimente bestehen aus mittel- bis grobgebankten, z.T. massigen, feinkörnigen Kalken und untergeordnet Kalkmergel. Besonders die Kalke der obersten litho-stratigraphischen Einheiten, Plattenkalk bis Massenkalk zeigen eine ausgeprägte Verkarstung, wodurch das Wassereinbruchrisiko als mittel bis hoch einzuschätzen ist.

- Unterer Malm (tonreicher): Abschnitt 361.0 m – 451.2 m

Der Untere Malm umfasst die folgenden lithostratigraphischen Einheiten: Wohlgeschichtete Kalke – Hornbuck-Schichten – Effinger Schichten – Glaukonit-Sandmergel. Die Gesteine des Unteren Malms bestehen aus mittelgebankten, feinkörnigen Kalken mit dünnen Tonmergelzwischenlagen, tonigen Kalkbänken und Mergel sowie Glaukonit führenden Tonmergel, eisenooide führenden Kalkknollen und Kalkmergel. Bedingt durch den erhöhten Tongehalt wird dieser Homogenbereich als trockener Abschnitt eingestuft. Dies zeigen auch die Resultate der hydraulischen Tests in der Bohrung Benken.

- Oberer und Mittlerer Dogger: Abschnitt 451.2 m – 538.8 m

Der Mittlere und Obere Dogger sind sehr heterogen aufgebaut und umfassen die folgenden lithostratigraphischen Einheiten: Grenzkalke/Macrocephalus-Oolith, Varians-Schichten, Württembergica-Schichten/Parkinsoni-Schichten, Subfurcata-/Blagdeni-/Humphriesi-Schichten, Wedelsandstein.

Die Gesteine des Mittleren und Oberen Doggers zeigen eine sehr variable, lithologische Abfolge. Von oben nach unten folgen eisenoolithische Kalke und eisenooide führende Mergel, feinsandige Kalk- und Tonmergel, siltige bis feinsandige Tonmergel mit einzelnen Tonmergelbänken sowie Eisenoolithe, fossilreiche Eisenoolithe sowie siltige Tonmergel und austernführende Eisenoolithe. Den Abschluss macht eine ca. 31.3 m mächtige Serie von kalkigen Sandsteinen und sandigen Kalkmergel sowie eine eisenoolithische Kalkbank.

- Opalinuston: Abschnitt 538.8 m – 652.0 m

Die Murchisonae-Schichten sind mit Ausnahme der obersten ca. 90 cm mächtigen, oolithischen Kalkbank in Opalinustonzonierung ausgebildet. Aus diesem Grunde werden die Murchisonae-Schichten dem Homogenbereich "Opalinuston" zugeteilt.

Die lithologische Abfolge des Opalinustons ist in der Bohrung Benken relativ monoton ausgebildet. Sie besteht aus siltigen bis feinsandigen z.T. kalkigen Tonsteinen sowie siltigen bis feinsandigen Tonmergeln.

Gefährdungen

- Niederbrüche

Mit Niederbrüchen muss aufgrund der Trennflächen-Verschneidungen in den oft gut gebankten und z.T. geklüfteten Sedimentgesteinen gerechnet werden, vor allem bei konventionellem Vortrieb.

- Verformung des Ausbruchsprofils

In den schlecht zementierten Sandsteinen der Unteren Süßwassermolasse und im Opalinuston können Verformungen des Ausbruchsprofils auftreten.

- Wassereinbruchrisiko inkl. Karstwasser

Obwohl mit den hydraulischen Tests in der Bohrung Benken im grundsätzlich verkarstungsfähigen Oberen Malm keine für den Stollenbau bedeutsame Durchlässigkeiten gemessen wurden, muss in diesem Bereich mit möglichen Karstwassereinbrüchen gerechnet werden.

- Gasvorkommen

Die Gasmessungen in der Bohrung Benken zeigten nur unbedeutende einzelne Gasaustritte. Auf eine Gasüberwachung beim Bau des Schachtes oder der Rampe kann aber, wegen den zahlreichen Gas-Muttergesteinen in der mesozoischen Abfolge und der Nähe des möglichen Permo-karbondrogens nicht verzichtet werden.

2.4 Einzulagernde Abfälle

2.4.1 Abfalltypen und Gebindeabmessungen

Für das BE/HAA/LMA-Tiefenlager sind abgebrannte Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung zur Entsorgung vorgesehen.

Die BE-Behälter bestehen aus Stahl und enthalten entweder 4 Druckwasserreaktor-Elemente oder 9 Siedewasserreaktor-Elemente, welche zum Betrieb von Kernkraftwerken eingesetzt waren. Sie haben eine zylindrische Form mit einem Aussendurchmesser von 1.05 m und eine maximale Länge von ca. 5 m (Fig. 2.5, bzgl. Längen siehe auch nächstes Kapitel). Die HAA-Behälter bestehen aus einer Kokille mit verglastem hochaktivem Abfall aus der Wiederaufarbeitung und einem massiven Stahlbehälter. Die Form ist ebenfalls zylindrisch; Aussendurchmesser 94 cm, Länge 2.0 m (Fig. 2.5). Bei den LMA gibt es verschiedene Abfallgebinde. Sie enthalten Metalle sowie organisches und anorganisches Material, welches bei der Wiederaufarbeitung anfällt und in Stahlfässer und Betonbehälter eingebracht wird (Fig. 2.6). Detaillierte Angaben zu den Abfällen sind in (McGinnes 2002, Nagra 2002b) zu finden.

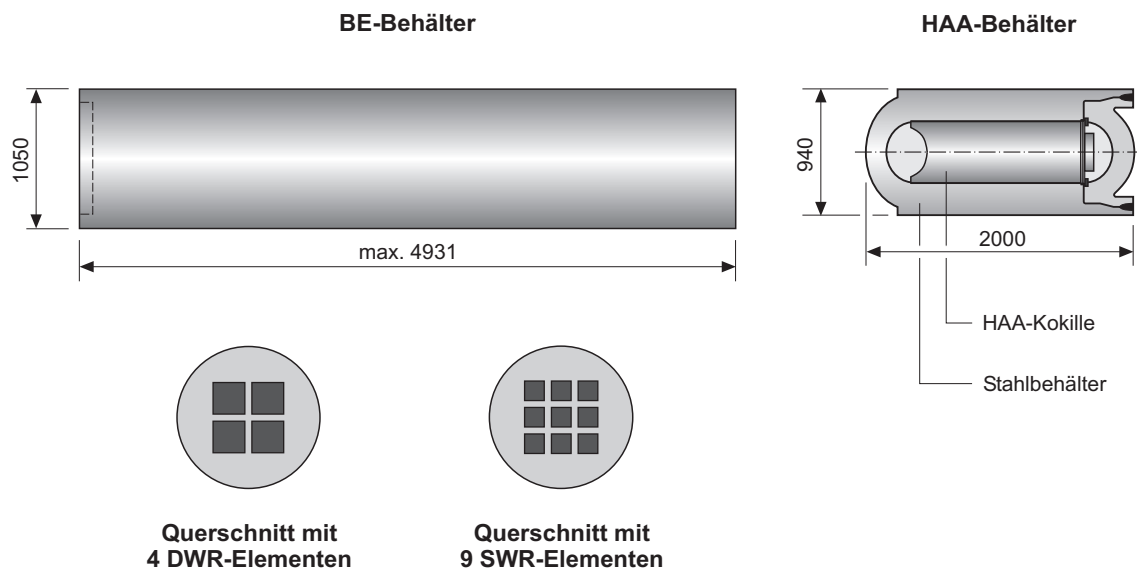


Fig. 2.5 Behälter für abgebrannte Brennelemente (BE) und verglaste hochaktive Abfälle (HAA) (Nagra 2002b) – Abmessungen in mm
DWR = Druckwasserreaktor, SWR = Siedewasserreaktor

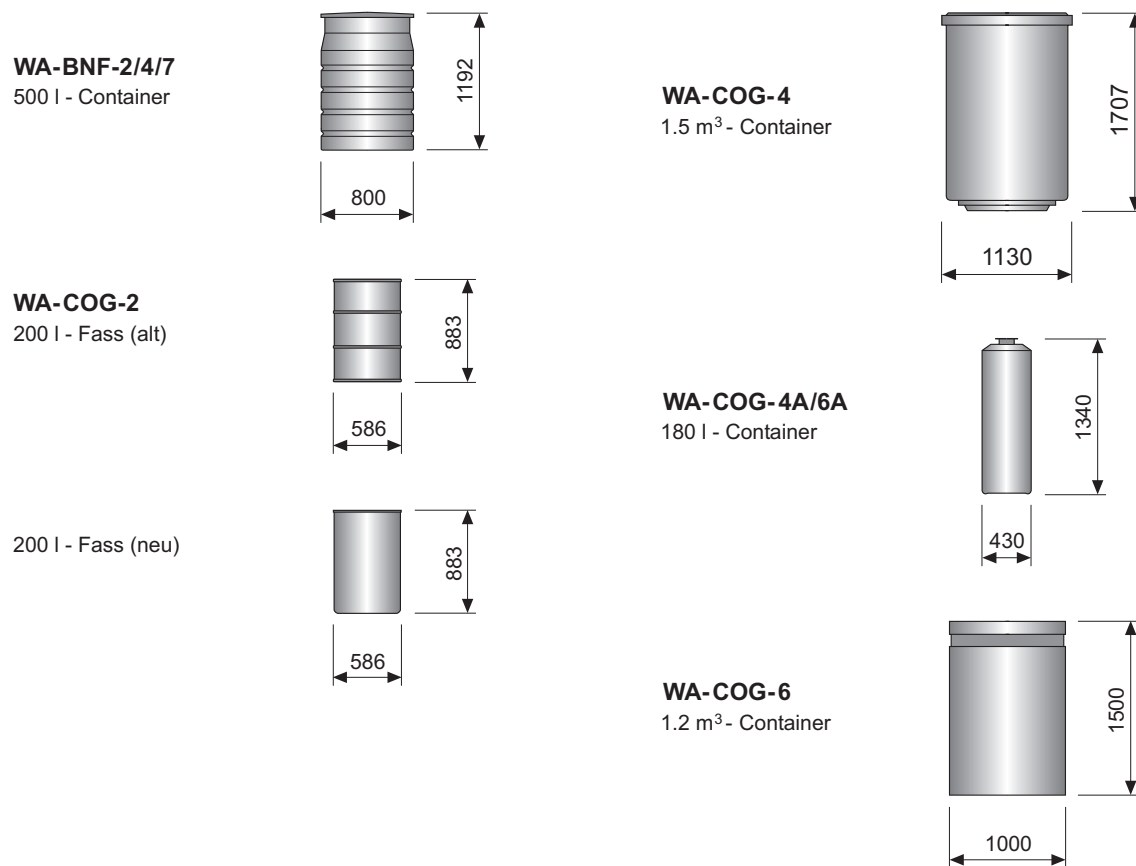


Fig. 2.6 Behälter für langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) (Nagra 2002b)
Abmessungen in mm
WA = Wiederaufarbeitung; BNF = British Nuclear Fuel; COG = Cogema

2.4.2 Abfallmengen und Gewichte

Für den Referenzfall ist als Basis für das Projekt Entsorgungsnachweis eine Stromproduktion von 192 GW_ea zur Ermittlung des Abfallmengengerüsts festgelegt worden. Dies entspricht einer bezüglich Abfallmengen konservativ angesetzten, internationale Trends berücksichtigende Betriebsdauer der z.Zt. im Betrieb stehenden Kernkraftwerke von 60 Jahren (Kap. 1.2.1). Für den Nachweis der bautechnischen Machbarkeit sind auf dieser Basis zwei Varianten des Abfallmengengerüsts zu berücksichtigen: Der Fall "*Cemented waste option*" und der Fall "*High force compacted waste option*" (McGinnes 2002), welche sich bei den WA-COG-4 und WA-COG-4A/6A sowie WA-COG-6 unterscheiden (Tabelle 2.2).

Für die BE-Behälter sind drei Referenzbehälter BE-1, BE-2 und BE-3 definiert worden. Der BE-1 enthält Siedewasserreaktor-Elemente, BE-2 und BE-3 Druckwasserreaktor-Elemente, wobei bei den zwei letzteren, aufgrund der verschiedenen Brennelement-Typen und unterschiedlichen Mengen, für Rechenzwecke je eine äquivalente Länge ermittelt wurde (McGinnes 2002).

Abfall		Menge, Anzahl		Gebinde		
Typ	Sorte	"Cement- ed waste option"	"High force compac- ted" ¹⁾	Gewicht nominal [kg]	Gewicht maximal [kg]	Volumen oder Länge nominal
BE	BE-1	935	935	ca. 28'600	-	4.92 m lang
	BE-2	450	450	ca. 24'000	-	4.40 m lang
	BE-3	680	680	ca. 24'000	-	4.40 m lang
HAA	WA-BNF-1	270	270	480	550	180 l-Container
	WA-COG-1	460	460	480	550	180 l-Container
	Stahlbehälter (leer)	730	730	8'400	-	2.0 m lang
LMA	LMA-1:					
	WA-BNF-2	30	30	1'115	1'400	500 l-Container
	WA-BNF-4	270	270	1'510	2'000	500 l-Container
	WA-BNF-7	170	170	1'148	1'400	500 l-Container
	WA-COG-4	320	-	3'560	4'400	1.5 m ³ -Container
	WA-COG-4A/6A	-	1'030	700	1'360	180 l-Container
	WA-COG-6	510	-	2'350	4'000	1.2 m ³ -Container
	LMA-2:					
	WA-COG-2	380	380	224	250	200 l-Fass

Tab. 2.2 In das Tiefenlager BE/HAA/LMA einzulagernde Abfälle für 192 GW_a (Mengenangaben gerundet)
Für die aufgeführten LMA ergibt sich für die "Cemented waste option" ein Volumen der in Lagercontainer verpackten Abfälle von ca. 4'360 m³ (McGinnes 2002).

¹⁾High force compacted waste option

Die Abfalltypen sind wegen ihrer hohen Oberflächendosisleistung fernbedient oder mit Abschirmungen zu handhaben (McGinnes 2002).

2.4.3 Zeitliche Verfügbarkeit der Abfälle

Beim zeitlichen Anfall der Abfälle wird davon ausgegangen, dass zum Zeitpunkt der Betriebsaufnahme des geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA ein grosser Teil der zu erwartenden Gesamtabfallmenge vorliegt und Abfälle entsprechend den Bedürfnissen des Lagerbetriebs angeliefert werden können. Dies wird durch die Festlegung des Baubeginns der Anlage gesteuert.

2.4.4 Optionen – Abfallmengen

Zur Abklärung der Platzverhältnisse im potenziellen Standortgebiet Zürcher Weinland und zum Nachweis einer genügenden Flexibilität des Anlagen- und Betriebskonzeptes sind im Sinne von "was, wenn" (what if)-Szenarien als Zusatz zum Referenzprojekt die Auswirkungen erhöhter Abfallmengen darzulegen. Es sind zwei Varianten zu überprüfen:

Variante 1 Es sind auch ausgewählte Abfälle aus dem Betrieb der Kernkraftwerke, der Medizin, Industrie und Forschung (MIF), der Konditionierung abgebrannter Brennelemente oder weiteren diversen Quellen für die Einlagerung im geologischen Tiefenlager BE/HAA/LMA zu berücksichtigen. Die für 192 GW_ea *zusätzlich* zu berücksichtigende Abfallmenge wird auf

- ca. 2'900 m³ in Lagercontainer verpackte Abfälle geschätzt (McGinnes 2002), wobei davon ausgegangen werden kann, dass diese Abfälle in den vorhandenen Lagercontainern (Fig. 5.1) eingelagert werden können.

Variante 2 Als Extremvariante und als Umhüllende aller Eventualitäten wird ein gerundetes Abfallmengengerüst postuliert, welches einer Energieproduktion von 300 GW_ea entspricht:

- BE-1: Anzahl 1'630 Länge 4.92 m,
BE-2: 450 4.40 m,
BE-3: 1'500 4.58 m (Äquivalenzlänge),
- HAA Anzahl 730 Länge 2.00 m,
- LMA ca. 8'200 m³ in Lagercontainer verpacktes Gesamtabfallvolumen ("Cemented waste option").

Auch in dieser Variante wird davon ausgegangen, dass alle Abfälle in den vorhandenen Behältern (Fig. 2.5) und Containern (Fig. 5.1) der geologischen Tiefenlagerung zugeführt werden können.

3 Beschreibung der Anlage

3.1 Überblick über die Gesamtanlage

Das geologische Tiefenlager ist ein bergmännisch zu erstellendes System von Lagerstollen, Lagertunneln, Verbindungstunneln und Betriebshohlräumen, welche über eine Rampe und einen Schacht erschlossen werden. Es umfasst ferner die Aussenanlagen der Rampe und des Schachtes.

Das Anlagenkonzept (Referenzprojekt) ist modular im Baukastensystem aufgebaut. Dies erlaubt in der weiteren Projektbearbeitung eine weitgehende individuelle Bearbeitung und Optimierung einzelner Anlagenteile und Handhabungsschritte und gewährleistet eine hohe Flexibilität.

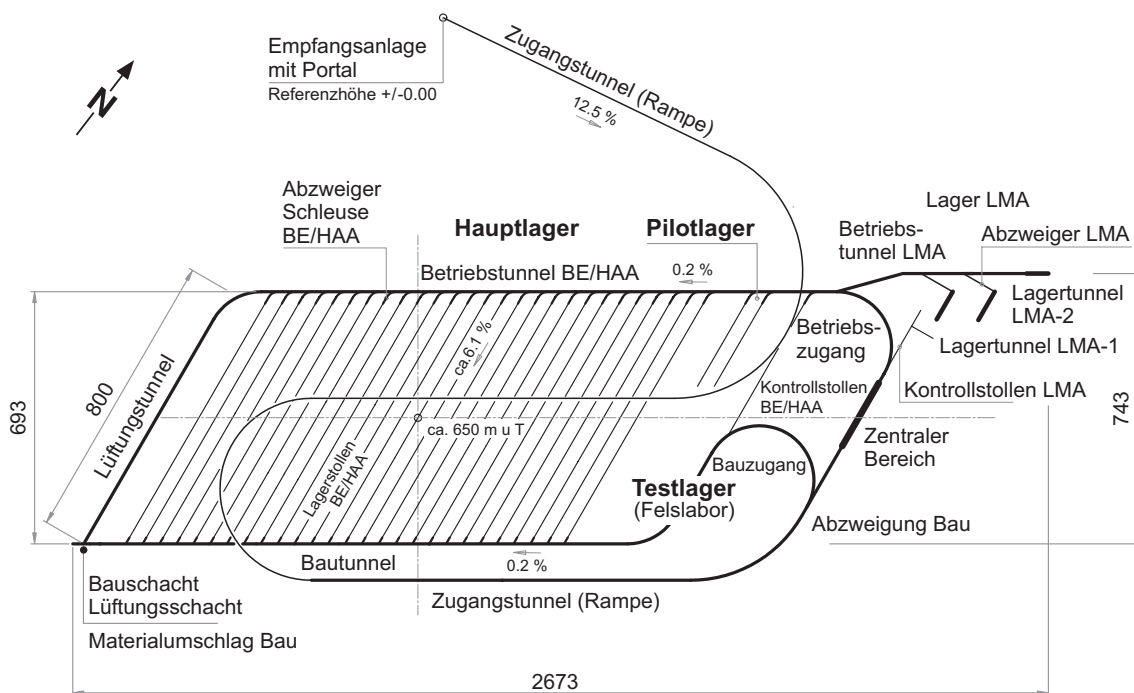


Fig. 3.1 Übersicht über die untertägigen Anlagen eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA – Auslegungsbasis 192 GW_ea (Referenzfall) – Abmessungen in m

Die untertägigen Anlagen des Tiefenlagers (Fig. 3.1 und 10.1 sowie Beilagen 3-1 bis 3-9), auf welche in den folgenden Kapiteln noch weiter eingegangen wird, setzen sich zusammen aus

- den Lagerstollen für die abgebrannten Brennelemente und die verglasten hochaktiven Abfälle. Die um ca. 6.1 % geneigten Lagerstollen weisen einen kreisförmigen Ausbruchquerschnitt von 2.5 m Durchmesser und eine Länge von 800 m auf, verlaufen in einem gegenseitigen Abstand von 40 m in N-S Richtung und schliessen im Norden via Schleuse und Abzweiger an den Betriebstunnel, im Süden via TBM-Starttröhre (*Tunnelbohrmaschine*) an den Bautunnel an. Aufgrund der Abfallmenge, welche dem vorliegenden Referenzprojekt zugrunde liegt, sind 27 Lagerstollen vorzusehen. Sie bilden das Hauptlager im KGL-Konzept (kontrollierte geologische Langzeitlagerung, EKRA 2000, KEG 2001).
- drei Lagertunneln am entgegengesetzten Ende des Lagerfeldes für die langlebigen mittelaktiven Abfälle, wobei der eine, kleinere Tunnel für die Abfälle mit sorptionsmindernden und

löslichkeitserhöhenden Verunreinigungen, sog. LMA-2 Abfälle, reserviert ist. Der Ausbruchquerschnitt der LMA-1-Tunnel hat eine maximale Breite von rund 8 m und eine Höhe von rund 10 m. Gestützt auf das in Tab. 2.2 gegebene Inventar beträgt die Länge der Tunnel ca. 90 m für LMA-1 und ca. 60 m für LMA-2. Die LMA-Lagertunnel sind ebenfalls Bestandteil des Hauptlagers gemäss KGL.

- dem Pilotlager, bestehend aus zwei verkürzten Lagerstollen mit demselben Ausbruchquerschnitt wie die Lagerstollen BE/HAA und einem parallel dazu verlaufenden Kontrollstollen zur Überwachung und Gewinnung von Daten für den Entscheid zum Lagerverschluss. Ein weiterer Kontrollstollen ist in der Verlängerung des Zentralen Bereichs geplant und ermöglicht die Überwachung eines LMA-Lagertunnels.
- dem Testlager (Felslabor), bestehend aus den Anlagen für die untertägigen Untersuchungen für die definitive Lagerauslegung und den abschliessenden Sicherheitsnachweis vor Betriebsaufnahme.
- dem Zentralen Bereich mit den unterirdischen Infrastrukturanlagen für die Betriebsphase mit Ausbruchabmessungen von rund 12 m Breite und rund 9 m Höhe.
- den Betriebs- und Bautunnel sowie Lüftungstunnel, welche die verschiedenen Anlagenteile innerhalb des Wirtgesteins verbinden und im Ausbruch eine Breite von rund 5.5 m und eine Höhe von rund 6 m aufweisen.
- dem Zugangstunnel, welcher die unterirdische Anlage als Rampe erschliesst. Die Abmessungen des Zugangstunnels im Opalinuston (Ausbruchmasse) sind rund 7 m in der Breite und ca. 6.5 m in der Höhe.
- dem Lüftungs- und Bauschacht an der südlichen Ecke des BE/HAA-Einlagerungsfeldes mit den Anlagen zum Materialumschlag und dem Pumpensumpf am Schachtfuss; Ausbruchdurchmesser 4.0 m.

Die Gesamtabmessungen der Lagerzone betragen ca. 2'700 m in der Länge und ca. 750 m in der Breite. Das Zentrum der Lagerstollen BE/HAA ist modellmässig auf ca. 650 m unter Terrain festgelegt worden. Der Zugangstunnel (Rampe) ist 12.5 % geneigt und so gelegt worden, dass er den Opalinuston ca. 50 m bis 100 m vor der Abzweigung Bau erreicht.

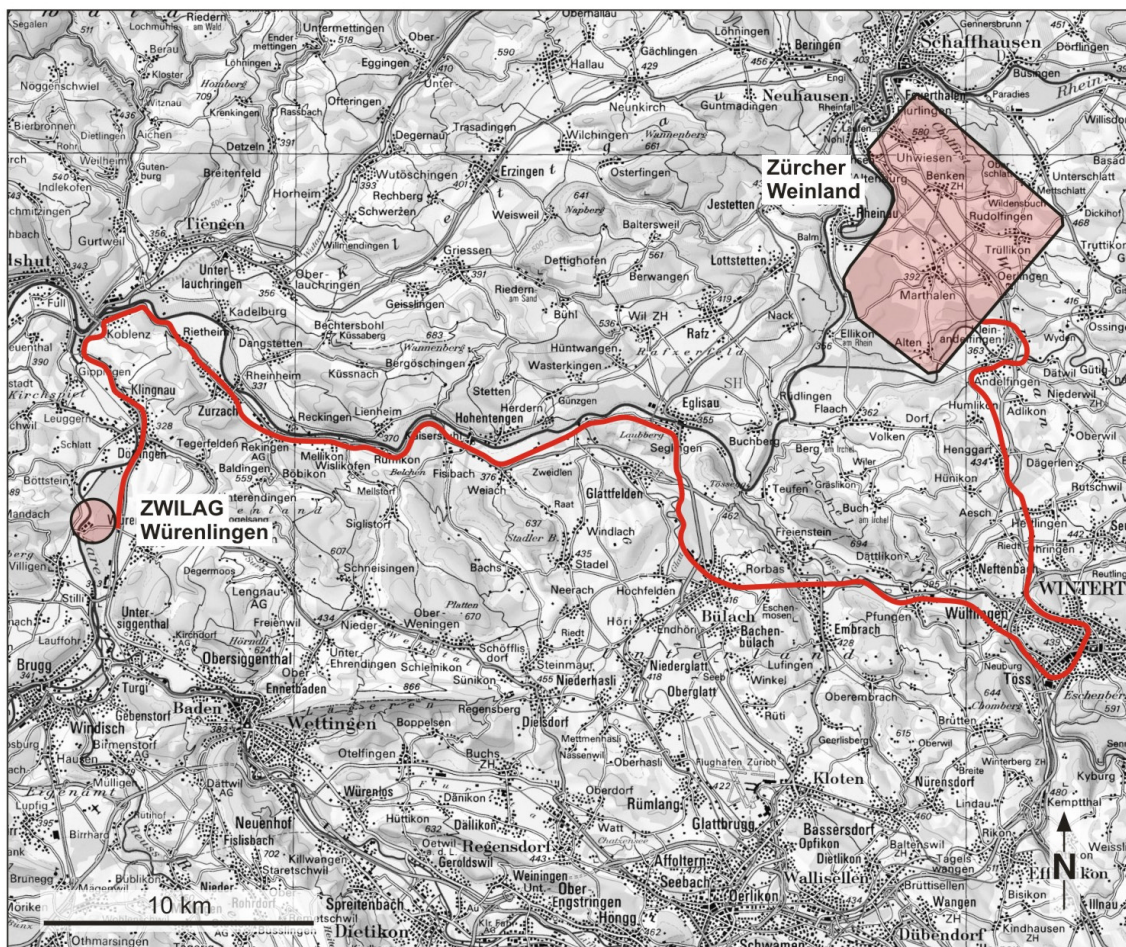
Die Aussenanlagen teilen sich auf zwei Lokationen auf: Auf die eigentlichen Empfangs- und Betriebsanlagen im Portalbereich des Zugangstunnels (Rampe) und die Anlagen im Bereich des Schachtkopfes (Lüftungs- bzw. Bauschacht).

3.2 Oberirdische Anlagen

3.2.1 Verkehrstechnische Erschliessung

Infolge der guten verkehrstechnischen Infrastruktur der Region Nordschweiz wird bei der Wahl der Standorte für die Aussenanlagen anzustreben sein, den Portalbereich sowohl per Strasse wie Schiene einfach und mit geringem Aufwand zu erschliessen. Beim Schachtkopf genügt die Zugänglichkeit per Strasse. Damit soll ermöglicht werden, dass in der Betriebs- bzw. Einlagerungsphase insbesondere die Abfälle primär per Bahn angeliefert werden können und dadurch das öffentliche Strassennetz von Schwertransporten möglichst entlastet wird. Wie bereits im Kap. 2.3.1 dargelegt, wird die Festlegung konkreter, überflutungssicherer Standorte für die Aussenanlagen unter Berücksichtigung raumplanerischer Verhältnisse und lokaler Präferenzen in einer späteren Projektphase festzulegen sein.

Der Zugang zur Region Zürcher Weinland durch eine potenzielle Transportroute für die Schiene ist als Beispiel vom Zwischenlager Würenlingen aus in Fig. 3.2 dargestellt.



Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie (BA024647)

Fig. 3.2 Potenzielle Transportroute für die Eisenbahn vom Zwischenlager Würenlingen ins Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland

3.2.2 Aussenanlagen der Portalzone

Die Portalzone wird im Verlaufe der Lagerrealisierung unterschiedlich genutzt. Nachfolgend wird die Situation während der Exploration unter Tag, dem Lagerbau und schwerpunktmässig beim Einlagerungsbetrieb dargestellt.

3.2.2.1 Explorationsphase

Im Bereich der Portalzone werden während der Explorationsphase für den Bau und Betrieb des Zugangstunnels (Rampe) und des Testlagers (Felslabor) diverse Provisorien erstellt. Diese bestehen einerseits aus den Installationen des Bauunternehmers, andererseits aus jenen der wissenschaftlichen Kontraktoren sowie der Nagra. Nach Abschluss der Bauarbeiten dieser Phase wird der Unternehmer abziehen und seine Einrichtungen bis auf betriebsnotwendige Logistikanlagen wie z.B. die Lüftungsanlage und die Elektroinstallationen abbauen. Die übrigen Anlagen bestehen im wesentlichen aus Büroräumlichkeiten, z.T. mit Laboreinrichtungen, Vorführ- und Aufenthaltsraum sowie aus einer einfachen mechanischen Werkstatt sowie Parkplätzen für Angestellte und Besucher. Sie dienen dem Betrieb des Testlagers (Felslabor). Der Zugang zu den Aussenanlagen erfolgt in dieser Phase über die Strasse.

3.2.2.2 Lagerbau

Während des Lagerbaus erfolgt der Zugang ebenfalls über die Strasse. Bis zur Aufnahme des Einlagerungsbetriebs sind im Portalbereich die definitive Erschliessung mit Strasse und Schiene und als weitere Bauwerke das Administrations- und Betriebsgebäude (Empfangsanlage), das Lüftungsgebäude mit Trafostation, die Geräteschleuse und der im Tagbau zu erstellenden Teil des Zugangstunnels (Fig. 3.3) zu bauen und die Umgebungsarbeiten auszuführen. Bestünde die Absicht, die im Kap. 1.3.2 erwähnte Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA auf dem Areal der Aussenanlagen zu realisieren, so müsste diese ebenfalls in dieser Bauetappe erstellt werden. Im Bereich der Aussenanlagen finden sich in dieser Phase neben den Anlagen zum Felslaborbetrieb wieder Installationen der verschiedenen Unternehmer.

3.2.2.3 Betrieb des Tiefenlagers

Während des Lagerbetriebs dient das *Betriebsgebäude* der Empfangsanlage (Fig. 3.3) der Verarbeitung angelieferter Güter sowie der Vorbereitung der Abfälle zur Einlagerung. Das Gebäude wird mit den dazu notwendigen technischen Räumlichkeiten und Betriebseinrichtungen ausgestattet und umfasst auch einen Kommandoraum, Labors und eine Werkstatt. Den nukleartechnischen Anforderungen entsprechend wird eine kontrollierte Zone eingerichtet und mit zugehörigen Absperrungen und Schleusen versehen. Im *Administrationsgebäude* der Empfangsanlage wird die Verwaltung und Betriebsleitung sowie die Umgebungsüberwachung aber auch eine permanente Ausstellung und ein Vorführraum zur Information von Besuchergruppen untergebracht.

Die Einrichtungen des *Lüftungsgebäudes* dienen der Frischluftversorgung aller Anlagen unter Tag und die in diesem Gebäude integrierte Elektroinspeisung versorgt sowohl die untertägigen Anlagen als auch die gesamten Aussenanlagen der Portalzone mit elektrischer Energie. Die Belüftung der verschiedenen Gebäude im Portalbereich erfolgt individuell und gebäudespezifisch.

Das Gebäude der *Geräteschleuse* enthält einen vertikalen Zugang zum Zugangstunnel. Dadurch wird das Ein- und Ausbringen grösserer Geräte und Komponenten wie z.B. der Stollenlokomotive, des Verfüllwagens etc. ermöglicht. Dies kann z.B. bei Installationsarbeiten im untertägigen Bereich während des Baus der Anlage oder bei Generalrevisionen von Geräten während des Lagerbetriebs bzw. Revisionsunterbrüchen erfolgen. Die Geräteschleuse ist kein routinemässig benutzter Durchgang im Einlagerungsbetrieb und ist deshalb entsprechend gegen unbefugte Benützung gesichert.

Im Sinne einer für den Platzbedarf der Aussenanlagen Maximallösung ist die *Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA* modellhaft in Fig. 3.3 dargestellt. In dieser Anlage werden die einlagerungsfähigen Gebinde gemäss Fig. 2.5 hergestellt und für die Einlagerung bereitgestellt. Der Platzbedarf dieser "Maximalvariante" beträgt für die gesamte Anlage ca. 300 m in der Länge und ca. 150 m in der Breite. Das gesamte Gelände wird eingezäunt.

Ohne die Konditionier- und Verpackungsanlage würden die BE/HAA gemäss Fig. 2.5 angeliefert und müssten im Betriebsgebäude der Empfangsanlage zur Einlagerung bereitgestellt werden. Dazu müsste das in Fig. 3.3 modellhaft dargestellte Betriebsgebäude um ca. 30 % vergrössert werden.



Fig. 3.3 Modellhafte Ansicht der Aussenanlagen des Portalbereichs im Einlagerungsbetrieb; inkl. Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA zum Aufzeigen des maximalen Platzbedarfes. Dieser beträgt ca. 300 m x 150 m.

- | | |
|--------------------------|--|
| 1 Administrationsgebäude | 5 Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA |
| 2 Betriebsgebäude | 6 Bahnzufahrt |
| 3 Lüftungsgebäude | 7 Strassenzufahrt |
| 4 Geräteschleuse | 8 Zugangstunnel, Rampe (überdeckt) |

3.2.3 Anlagen im Schachtkopfbereich

Der Schachtkopfbereich wird in der Phase des *Lagerbaus* mit einer Strasse erschlossen, sodass sich der Unternehmer für den Schachtbau einrichten und den Schacht erstellen kann. Neben der Aufnahme von Installationen dient der Platz insbesondere dem Materialumschlag, vor allem von Ausbruchmaterial.

Nach dem Erstellen des Schachtes installiert sich nach dem Abzug des Schachtbauers der Tunnelunternehmer zur Erstellung der Lagerstollen BE/HAA des Hauptlagers. Diese werden zeitgleich zur Einlagerung gebaut und zwar in Jahrestanchen, abgestimmt auf den Bedarf des *Einlagerungsbetriebes* (Kap. 4.4.1). Die Bauinstallationen im Schachtkopfbereich werden somit während des gesamten Einlagerungsbetriebes gebraucht. Allerdings ist ihre Belegung bzw. Ausnutzung eher gering, weil die Baukapazität für die Stollen höher als die vorgesehene Einlagerungsfrequenz ist.

Als dominanter Teil der Installation ist der Förderturm zu nennen, welcher zum Ein- und Ausfahren von Personen und Material benötigt wird und zur Abgabe der Abluft in die Umgebung konzipiert wird (Fig. 3.4). Weitere Installationen sind ein Gebäude mit Baubüro, Mannschaftsräumen, Werkstatt, Trafoanlage etc., ein überdachtes Ausbruchmaterialdepot sowie eine Geräte- und Materialhalle. Der Platzbedarf für die Anlagen im Schachtkopfbereich dürfte mit ca. 100 m x 100 m grosszügig bemessen sein.



Fig. 3.4 Modellhafte Ansicht der Anlagen im Schachtkopfbereich im Einlagerungsbetrieb (Bauetappe 3). Der Platzbedarf beträgt max. 100 m x 100 m

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1 Förderturm mit Abluftöffnungen | 3 Ausbruchmaterialdepot, gedeckt |
| 2 Baubüro, Mannschaftsräume,
Werkstatt, Trafoanlage, etc. | 4 Geräte-/Materialhalle |

3.3 Unterirdische Anlagen

3.3.1 Zugangstunnel und Testlager (Felslabor)

3.3.1.1 Zugangstunnel

Der Zugangstunnel führt vom Betriebsgebäude der Aussenanlagen zum Zentralen Bereich in der Lagerzone und dient in der Betriebsphase dem Transport von Abfallgebinden, Bentonitauflagern und Bentonitgranulat etc. sowie dem Personentransport und der Frischluftzufuhr von der Oberfläche in den Bereich der Lageranlage (Beilage 3-1). Vor dem Erreichen des Zentralen Bereichs führt ein Abzweiger zum Testlager (Felslabor). Der Zugangstunnel ist um 12.5 % geneigt (Beilage 3-2) und ist, um die Höhendifferenz von ca. 620 m zu überwinden, ca. 5 km lang. In seinem Grundriss ist er modellhaft als Doppelkurve über dem Lagerbereich angelegt. Die Flexibilität in seiner Auslegung erlaubt eine optimale Anordnung der ober- und unterirdischen Anlagen. Die Neigung des Zugangstunnels basiert auf einer Optimierung betrieblicher, baulicher und sicherheitstechnischer Aspekte.

Die Transporte erfolgen im Regelfall mit der Zahnradbahn, deren Lokomotiven über eine Stromschiene mit elektrischer Energie versorgt werden. Das Normalprofil und der Innenausbau ist derart, dass in Ausnahme- und Notfällen auch das Befahren mit Personenwagen, leichteren Transportern und Kleinbussen sowie Spezialfahrzeugen möglich ist (Beilage 3-3). Der Zugangstunnel weist periodisch angeordnete Ausstellbuchten auf. Diese werden für den Bau der Anlage und während der Exploration gebraucht und sind während des Einlagerungsbetriebes für das Kreuzen z.B. mit leeren Transportabschirmungen gedacht.

Zum Durchfahren stark wasserführender Zonen ist ein zweischaliger Ausbau mit Wasserisolation und Injektionen vorgesehen. Das durch die Injektionen nicht verdrängbare Bergwasser wird gefasst und in einer Drainage zur nächsten Pumpanlage geleitet. Solche Pumpstationen werden an ausgewählten Orten nach Bedarf eingerichtet. In wenig durchlässigen Formationen erfolgt die Felssicherung durch Anker und Spritzbeton als einschaliger Ausbau.

Ver- und Entsorgungsleitungen werden in Kabelschutzrohren eingebaut oder im Bereich des Tunnelgewölbes befestigt. Die Frischluftzufuhr in die untertägigen Anlagen erfolgt über den Gesamtquerschnitt des Tunnels.

Der Zugangstunnel wird bis zur Abzweigung Bau und der Bauzugang bis zum Testlager (Felslabor) bereits in der Phase der Exploration unter Tag erstellt, jedoch erst unmittelbar vor Aufnahme des Einlagerungsbetriebes auf Schienenbetrieb (Zahnradbetrieb) umgerüstet. Bis zur Umstellung erfolgen alle Transporte mit Pneufahrzeugen. In der Explorationsphase und während des Baus bis zum Anschluss an den Lüftungsschacht wird die Frischluft durch Lutten eingeblasen und über den Gesamtquerschnitt des Zugangs als verbrauchte Luft abgeführt.

3.3.1.2 Testlager (Felslabor)

Das Testlager (Felslabor) umfasst die Anlagen, welche die zusätzlich zur Standorterkundung nötigen Untersuchungen ermöglichen, die zur Erlangung der Betriebsbewilligung erforderlich sind.

Die Testlagerzone wird in der Explorationsphase durch den Bauzugang erschlossen, der ca. 200 m vor dem Zentralen Bereich vom Zugangstunnel abzweigt und liegt etwa in der Mittelebene des Opalinustons (Beilagen 3-1 und 3-2). Somit lassen sich repräsentative Untersuchungen und Tests für das geologische Tiefenlager durchführen. Die Erstellung diverser Nischen und

Kurzstollen sind dazu vorgesehen. Die Tests selbst sind im Rahmen der Explorationsplanung zu konkretisieren. Das Felslabor ist so angeordnet, dass Langzeittests auch während des Lagerbaus und späteren Einlagerungsbetriebes bis zum Verschluss der Gesamtanlage weitergeführt werden können.

Der Zugang zum Felslabor erfolgt in der Einlagerungsphase, also während des Lagerbetriebes, von der Abzweigung Bau an mit Pneufahrzeugen, ansonsten per Bahn. Ein Zugang via Bauschacht und Bautunnel wäre denkbar.

3.3.2 Zentraler Bereich

Der Zentrale Bereich wird durch den Zugangstunnel erreicht. Er stellt die unter Tag gelegene Schnittstelle zwischen Zahnrad- und Adhäsionsbetrieb dar und ist horizontal, d.h. ohne Gefälle angelegt. Mit dem Zahnradbetrieb wird die Höhendifferenz überwunden und durch Adhäsion erfolgt die Verteilung der Abfälle, Verfüllmaterialien etc. auf Höhe der Lagerzone. Es erfolgt somit ein Wechsel der Zugmaschine. Um dies zu ermöglichen und um z. B. leere BE-Transportabschirmungen für den Transport zur Oberfläche bereitzustellen und zu übernehmen, sind im Zentralen Bereich ein Doppelgleis mit entsprechender Umfahrungsmöglichkeit sowie entsprechende Abstellgleise geplant (Beilage 3-4). Eine Abschirmwand schützt Personen vor Direktstrahlung, welche sich in den angrenzenden technischen und Infrastrukturräumen aufhalten, wenn sich in diesem Gleisabschnitt Abfalltransporte befinden.

Im weiteren sind eine Umschlagsanlage für Bentonitgranulat mit entsprechenden Staubschutzvorkehrungen, eine Trafo- und Ladestation sowie Kontroll- und Elektroverteilstation mit entsprechenden Einrichtungen, ein Reserveraum sowie für die unter Tage arbeitende Mannschaft ein Aufenthaltsraum sowie für Notfälle ein Sanitätsraum vorgesehen. Abstellflächen für einzelne Personenwagen, Kleintransporter etc. werden für den Ausnahme- bzw. Notfall bereitgestellt.

Der Zentrale Bereich liegt vollständig im dichten Opalinuston. Es ist deshalb ein einschaliger Ausbau geplant. Er ist, wie die Lagerstollen BE/HAA, aus Optimierungsgründen in Richtung der maximalen Hauptspannung angeordnet.

3.3.3 Haupttunnel

Unter dem Begriff Haupttunnel werden der Betriebszugang, die Betriebstunnel BE/HAA und LMA sowie der Bauzugang und Bautunnel sowie der Lüftungstunnel verstanden. Ihre Querschnitte und Felssicherungsmassnahmen sind, von kleineren Unterschieden abgesehen, alle gleich und sind in Schnitt C der Beilage 3-6 dargestellt. Unterschiedlich ist vor allem der Innenausbau. So ist z.B. Schienenbetrieb mit Stromabnehmer nur in dem gering geneigten Betriebszugang und den beiden Betriebstunneln geplant, wobei auch hier das Befahren mit schmalen Pneufahrzeugen im Notfall möglich ist. In den übrigen Tunneln erfolgen Transporte durch Pneufahrzeuge. Weitere Unterschiede bestehen bei den Werkleitungen.

Der *Betriebszugang* führt vom Zentralen Bereich zum *Betriebstunnel*. Am Verbindungspunkt mit dem Betriebstunnel führt ein Ast desselben, der Betriebstunnel BE/HAA, in den Lagerbereich BE/HAA und der andere, der Betriebstunnel LMA, in den Einlagerungsbereich LMA (Beilage 3-1).

Der *Bautunnel* stellt die Verlängerung des vor der Empfangsanlage vom Zugangstunnel abzweigenden Bauzuganges dar und mündet beim Schachtfuss in den Materialumschlag Bau. Er

erschliesst die Lagerstollen BE/HAA des Hauptlagers an ihrem tiefer liegenden Ende und stellt somit die Zugänglichkeit via Schacht für deren Erstellung sicher.

Der *Lüftungstunnel* verbindet den Betriebstunnel BE/HAA mit dem Schachtfuss und dient dazu, die aus dem im Betrieb stehenden Lagerteil anfallende Verbrauchsluft zum Lüftungsschacht zu führen. Er dient ferner als Sicherheitsstollen sowohl für den Betrieb wie für den Bau.

3.3.4 Lagerzone BE/HAA

Die Lagerzone BE/HAA besteht aus dem geneigt angeordneten *Pilot-* und *Hauptlager*, die räumlich soweit getrennt sind, dass eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen werden kann (Beilage 3-1). Die beiden Lager unterscheiden sich durch ihre Grösse: Im Pilotlager wird gemäss Zielsetzung (Kap. 2.2.2.3) ein kleiner, jedoch repräsentativer Teil der Abfälle zentrisch in den Lagerstollen BE/HAA eingelagert, um Informationen zum Verhalten der Sicherheitsbarrieren und zur Überprüfung der Rechenprogramme zu erhalten; im Hauptlager die restlichen Abfälle, ebenfalls zentrisch.

- Für das *Pilotlager* sind dazu zwei Lagerstollen von je 300 m Länge und 2.5 m Durchmesser festgelegt worden, welche ca. 2.5 % der für das Referenzprojekt vorgegebenen Anzahl BE- und HAA-Behälter aufnehmen können. Das Verhalten des Sicherheitssystems wird mit Bohrungen aus dem parallel dazu verlaufenden Kontrollstollen BE/HAA verfolgt und überwacht.
- Beim *Hauptlager* sind aufgrund der verbleibenden Abfallmenge 27 Lagerstollen notwendig. Die Länge beträgt je 800 m und der Durchmesser ebenfalls 2.5 m. Die Anzahl an benötigten Lagerstollen kann problemlos an geänderte Abfallmengen angepasst werden. Auf diesen Punkt wird später bei der Behandlung des 300 GW_e-a-Szenariums (Kap. 2.4.4, Variante 2) noch separat eingegangen. Ebenso können Änderungen im Platzbedarf der Stollenabschlüsse aufgefangen werden. Sowohl Stollenlänge wie Stollendurchmesser basieren auf ausführungstechnischen, betrieblichen, sicherheitsrelevanten und wirtschaftlichen Optimierungsüberlegungen.

Die Lagerzone BE/HAA wird durch den im Streichen des Opalinustons angelegten *Betriebstunnel BE/HAA* betrieblich und durch den parallel zum Betriebstunnel, jedoch am gegenseitigen, tiefer liegenden Ende der Lagerstollen verlaufenden *Bautunnel*, baulich erschlossen.

Die *Lagerstollen BE/HAA* sind, wie aus Gründen der Langzeitsicherheit erwünscht, praktisch vollständig in der Mittelebene des leicht nach Südost fallenden Opalinustons und dadurch um ca. 6.1 % geneigt, parallel zu einander und in Richtung der grössten horizontalen Hauptspannung, d.h. in Nord-Süd Richtung angeordnet. Dadurch werden die Stollen in ihrem Querschnitt am wenigsten beansprucht, was erlaubt, mit minimalen Felssicherungsmaßnahmen auszukommen. Zur Begünstigung einer genügenden Wärmeabfuhr sind die Stollen in einem Abstand von 40 m angelegt (Beilage 3-1).

Die Lagerstollen sowohl des Pilot- wie des Hauptlagers bestehen aus einem vom Betriebstunnel unter ca. 60° horizontal wegführenden Stollenstück, dem *Abzweiger*, einer anschliessenden ebenfalls horizontalen Übergabestrecke, der *Schleuse*, sowie dem eigentlichen, entsprechend der Wirtgesteinsneigung angeordneten Einlagerungsstollen zur Aufnahme der BE- und HAA-Behälter. Diese Elemente sind beim Pilot- und beim Hauptlager gleich gestaltet (Beilagen 3-5 und 3-6). Der *Kontrollstollen* schliesst direkt an den Betriebstunnel an und mündet in den Bauzugang. Sein Durchmesser beträgt ebenfalls 2.5 m.

Die Abzweiger sind doppelspurig ausgelegt und dienen bei der Einlagerung als Zugang zur Schleuse, ansonsten werden sie als Park- bzw. Abstellposition für Rollmaterial benutzt. In der Schleuse werden die BE/HAA-Behälter aus ihren Transportabschirmungen bzw. Transportcontainern entnommen und zur Einlagerung im Lagerstollen vorbereitet.

Abzweiger und Schleuse haben den gleichen Querschnitt und werden durch Anker und Spritzbeton als einschaligem Ausbau gesichert (Beilage 3-6).

Auf Grund der Forschungsergebnisse im Opalinuston des Felslabors Mont Terri und den geotechnisch/felsmechanischen Resultaten der Sondierbohrung Benken konnte gezeigt werden, dass für die Lagerstollen bei dem geringen Durchmesser und der optimalen Ausrichtung im Bezug auf die horizontalen Hauptspannungen zur Sicherstellung der Hohlraumstabilität keine Felssicherungsmassnahmen notwendig sind und zur Vermeidung von Blocksturz bzw. zur Sicherstellung der Arbeitssicherheit eine Ankerung in Verbindung mit Draht- bzw. Armierungsnetzen genügt (Beilage 3-6 und Kap 4.2).

Die Lagerstollen BE/HAA des Hauptlagers werden vom Bautunnel aus steigend mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) aufgefahren und vor ihrer Beschickung im bautunnelseitigen Ende verschlossen. Die zur Einlagerung notwendigen Schienen (Meterspur) werden auf gekrümmten, dem Stollenradius angepassten Flachstahlschwellen im Stollen fixiert und verbleiben nach dessen Beschickung – mit Ausnahme der Verschlussstrecken – im Stollen.

3.3.5 Lagerbereich LMA

Der *Lagerbereich LMA* gliedert sich, zur Separierung von Abfällen unterschiedlicher chemischer Eigenschaften und Verträglichkeit, in den Bereich LMA-1 und LMA-2.

Der *Bereich LMA-1* wird über den *Betriebstunnel LMA* via *Abzweiger* erreicht und besteht aus zwei Lagertunneln von je ca. 90 m Länge und zugehöriger *Umladestation* (Beilagen 3-7 und 3-8). Die gesamte Einlagerungslänge ergibt sich aus dem Abfallmengengerüst, dem Einlagerungskonzept mit Lagercontainern aus Beton (Kap. 5) und dem Lagertunnelquerschnitt. Die Länge eines Lagertunnels wird durch das Einlagerungskonzept, die Schichtneigung des Wirtgesteins, die Tunnelhöhe, die minimale Wirtgesteinsüberdeckung und die erforderliche Gesamteinlagerungslänge bestimmt.

Aus Gründen der Langzeitsicherheit wird die Umladestation im Lagertunnel im oberen Bereich des Querschnittes erschlossen. Dies wird mit einer kurzen Brücke ermöglicht. Die Umladestation dient dazu, die einzulagernden Abfälle vom Bahnwagen abzuheben und zum Einbringen in den Lagertunnel bereit zu stellen. Sie ist auch der Abstellort für das Luftkissenfahrzeug mit welchem die Abfälle in die Lagertunnel gebracht werden.

Umladestation und Lagertunnel LMA-1 sind aus denselben Überlegungen wie die Lagerstollen BE/HAA in N-S Richtung angelegt. Als Felssicherungsmassnahme ist ein einschaliger Ausbau bestehend aus Ankern und Spritzbeton vorgesehen. Vom Aufbau her ist ein gleicher Ausbau für den kleineren Querschnitt des Abzweigers LMA vorgesehen, der den gleichen Ausbruchquerschnitt hat wie der Betriebstunnel LMA.

Für den *Lagertunnel LMA-2*, bei welchem es sich um eine Verlängerung des Betriebstunnels LMA handelt (Beilage 3-7), resultiert aufgrund des vorgegebenen Abfallmengengerüsts und der Einlagerungsart eine Tunnellänge von rund 60 m.

Der Lagerbereich LMA wird als Ganzes in einer Bauetappe erstellt. Problemlos können die Lagertunnel in der vorliegenden Situation bei Bedarf einem anderen Abfallaufkommen angepasst werden (Kap. 3.7.3).

Ein Pilotlager für LMA ist wegen der geringen und heterogenen Abfallmenge sowie der entsprechend kleinen Abmessung des LMA-Lagerteils nicht in sinnvoller Weise zu errichten. Es wird deshalb ein *Kontrollstollen LMA* vorgeschlagen, von welchem aus ein Lagertunnel LMA-1 überwacht werden kann. Sollte ein LMA Pilotlager dennoch vorgesehen werden, z.B. wenn wesentlich grössere Abfallmengen zu erwarten wären, könnte ein solches ohne Schwierigkeit in die geplante Anlage integriert werden.

3.3.6 Schacht und Schachtfuss

Der Schacht dient dem Ein- und Ausbringen von Personen und Material in der Phase der Lagererstellung und insbesondere bei der Lagererweiterung nach Aufnahme des Einlagerungsbetriebs. Er dient ferner als Lüftungsschacht und Notausstieg.

Am Schachtfuss befindet sich der Pumpensumpf als tiefstem Punkt mit der entsprechenden Pumpanlage und der Materialumschlag Bau mit der Hauptfunktion Ausbruchmaterial, insbesondere aus den Lagerstollen des Hauptlagers, für den Abtransport nach oben umzuschlagen.

Im Bereich wasserführender Schichten ist ein zweischaliger Ausbau mit Wasserisolation und Injektionen geplant (Beilage 3-9). Nicht verdrängbares Bergwasser wird nach unten drainiert und, falls notwendig, im oberen Bereich der undurchlässigeren Felsschichten gesammelt und zur Oberfläche gepumpt. Ist der Wasserandrang gering, wird das Wasser erst im Schachtsumpf gesammelt und nach oben gepumpt.

In dichten Felsformationen erfolgt der Ausbau einschalig.

3.4 Technische Ausrüstung

Wie bereits früher vermerkt, stellen die Aussenanlagen die Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA im Opalinuston nicht in Frage. Die zur Handhabung der Abfälle in Oberflächengebäuden notwendigen Geräte und Einrichtungen bestehen seit längerer Zeit, und es besteht eine breite diesbezügliche Erfahrung auch in der Schweiz. Sie müssen deshalb hier nicht weiter diskutiert werden. Die nachstehenden Ausführungen beziehen sich somit, wo nichts anderes vermerkt ist, auf die Anlagen unter Tag.

3.4.1 Lüftungskonzept

3.4.1.1 Grundprinzip des Lüftungskonzepts

Die Belüftung der untertägigen Anlage während des Einlagerungsbetriebes bzw. der Lagererweiterung beruht auf folgendem Grundprinzip, welches bei der weiteren Projektierung im Detail umzusetzen sein wird:

- Die Lüftungsanlage versorgt alle Lagerteile mit Frischluft. Die Frischluftzufuhr erfolgt vom Lüftungsgebäude im Portalbereich durch den vollen Querschnitt des Zugangstunnels. Verunreinigte oder erwärmte Luft wird vom Arbeitsort abgesaugt und über Tunnel/Stollen, Stahlrohre oder Lutten in den Lüftungsschacht und von dort an die Terrainoberfläche (Schachtkopfbereich) gebracht.

- An ausgewählten Orten werden Ventilatoren, Luftverteiler, Rückschlag- und Brandschutzklappen sowie Filter eingebaut.
- Eine Druckstaffelung in den Anlagen unter Tag wird durch Absaugen der Luft an den Stollen- bzw. Tunnelenden erreicht. Luft fliesst somit immer über den vollen Querschnitt in die Lagerstollen und Lagertunnel hinein und über Lüftungsrohre, somit nie unkontrolliert, aus diesem heraus.
- Die Lüftung ist so konzipiert, dass dem unverkleideten Fels in den Lagerstollen BE/HAA nie Feuchtigkeit zugetragen sondern immer Feuchtigkeit entzogen wird.
- Das Lüftungskonzept wird mit den neusten Erkenntnissen aus den letzten grossen Brandfällen in Tunneln wie etwa Montblanc, Gotthard etc. in der weiteren Projektbearbeitung in ein umfassendes diesbezügliches Sicherheitskonzept einzubeziehen sein. Die Frage nach der grundsätzlichen bautechnischen Machbarkeit eines Tiefenlager für BE/HAA/LMA-Abfälle im Opalinuston ist davon aber nicht betroffen.

3.4.1.2 Luftmenge, Kondensation, Temperatureinfluss

Unter Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen im Bereich der Aussenanlagen, der Fels-temperatur entlang dem Zugangstunnel, den voraussichtlich unter Tage zu erwartenden Wärmequellen sowie der SUVA-Richtlinie für Untertagarbeiten in feuchtwarmem Klima wurde eine benötigte Frischluftmenge von ca. 50'000 m³/h berechnet.

Die Berechnungen zeigen ferner, dass die Luft vor dem Einblasen in die Untertageanlagen weder im Winter vorgewärmt noch im Sommer vorgekühlt werden muss. In der Regel ist die zugeführte Luft in der Lage, Feuchtigkeit aus dem Fels bzw. der Betonauskleidung aufzunehmen. Temporäre Kondensation im oberen Bereich des Zugangstunnels ist nur bei Gewitterregen oder extremen Nebeltagen zu erwarten, falls die relative Luftfeuchtigkeit 100 % erreicht.

Aufgrund des relativ langen Zugangstunnels sind sowohl die täglichen wie die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen an der Oberfläche bereits im Bereich des Zentralen Bereiches kaum mehr wahrnehmbar. Die Temperatur im Zentralen Bereich wird aufgrund der Berechnungen bei etwa 24 °C erwartet.

3.4.1.3 Führung des Luftstroms im Überblick

Der Frischluftstrom wird im Zugangstunnel bis zur Abzweigung Bau gebracht und dort aufgeteilt (Fig. 3.5):

- Ein Teil fliesst via Zentralem Bereich und Betriebszugang in den Betriebstunnel, wo einerseits die Lagertunnel LMA, andererseits die Lagerstollen BE/HAA versorgt werden. An den Tunnel- und Stollenenden wird die Luft als Abluft abgesogen und über Lüftungsrohre via Betriebs- und Lüftungstunnel sowie Schacht an die Oberfläche gebracht. Ein Teil des BE/HAA-Luftstromes belüftet den verbleibenden Teil des Betriebstunnels und fliesst im Vollquerschnitt durch den Lüftungstunnel in den Schacht und ebenfalls zur Terrainoberfläche.
- Mit dem andern Ast des Frischluftstroms wird der Bereich der Bauaktivität versorgt, wobei im Bereich des Bauzugangs ein geringer Teil zur Versorgung des Kontrollstollens BE/HAA sowie des Testlagers (Felslabor) abgezweigt wird. Vom Bautunnel gelangt ein Teil der Frischluft zum Vortrieb in den Lagerstollen wo sie als Abluft abgesogen und in Lüftungsrohren via Schacht nach Aussen gebracht wird. Der andere Teil fliesst im Bautunnel weiter

zum Materialumschlag am Schachtfuss und von dort über den Schachtquerschnitt nach oben.

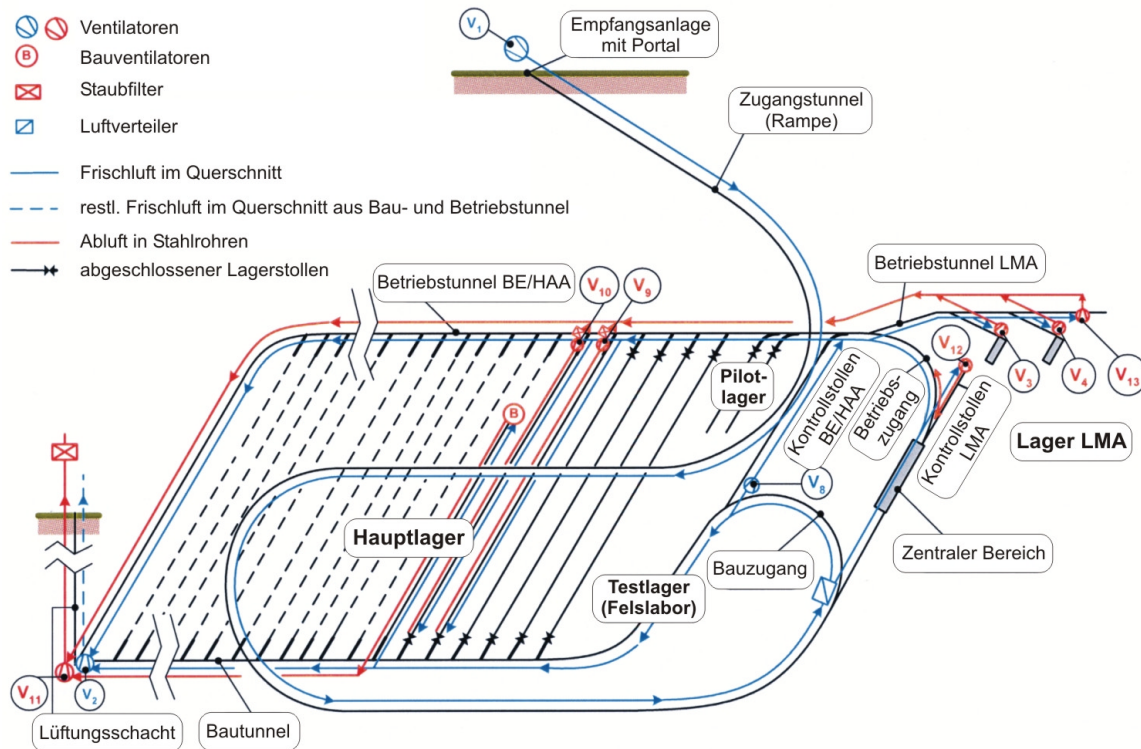


Fig. 3.5 Lüftungsschema für die Anlagen unter Tag während der Einlagerung von BE/HAA

Die aus den Lagertunneln LMA abgesogene Luft wird kontinuierlich radiologisch überwacht und beim Feststellen volatiler Nuklide automatisch über einen im By-Pass vorgesehenen Filter geführt. Die Lagerstollen BE/HAA werden ebenfalls kontinuierlich überwacht.

3.4.2 Elektrotechnische Einrichtungen

Für den Betrieb der unter Tage installierten Einrichtungen wird die benötigte Leistung auf ca. 5'000 kVA geschätzt. Dieser Wert beinhaltet einen Gleichzeitigkeitsfaktor von 0.8 und umfasst als wesentlichste Verbraucher nachstehende Anlagen:

- Zahnradbahn,
- Betriebs- und Baulüftung,
- Fördereinrichtungen im Lüftungs- bzw. Bauschacht,
- Beleuchtungsinstallationen, Pump- und Hebezeuge sowie diverse sekundäre Anlagen unter Tag und die
- Tunnelbohrmaschine zur Erstellung der Lagerstollen BE/HAA.

Eine genauere Bestimmung der benötigten Leistung und die Festlegung entsprechender Gleichzeitigkeitsfaktoren wird Gegenstand der weiteren Planung sein, wenn die Stromverbraucher wie z.B. im Testlager (Felslabor) oder im Zentralen Bereich genauer bekannt sind.

Als Grobkonzept der elektrischen Versorgung ist geplant, die benötigte Leistung aus dem öffentlichen 16 kV-Hochspannungsnetz zu beziehen und bei den Aussenanlagen der Portalzone und den Anlagen im Schachtkopfbereich in die als Ringleitung konzipierte Versorgungsleitung unter Tage einzuspeisen (Fig. 3.6). Um den Spannungsabfall in den relativ langen Zuleitungsstrecken in tolerierbaren Grenzen zu halten, wird die Versorgungsleitung unter Tag als Hochspannungsleitung mit 16 kV ausgelegt. Dies bedingt die Installation entsprechender Trafostationen bei den Verbrauchern. Die Auslegung erfolgt verbraucherspezifisch.

Zum Betrieb sicherheitsrelevanter Anlagen bei Stromunterbrüchen in der externen Einspeisung sind Notstromgeräte vorgesehen. Ihre konkrete Auslegung erfolgt ebenfalls im Rahmen der weiteren Projektbearbeitung.

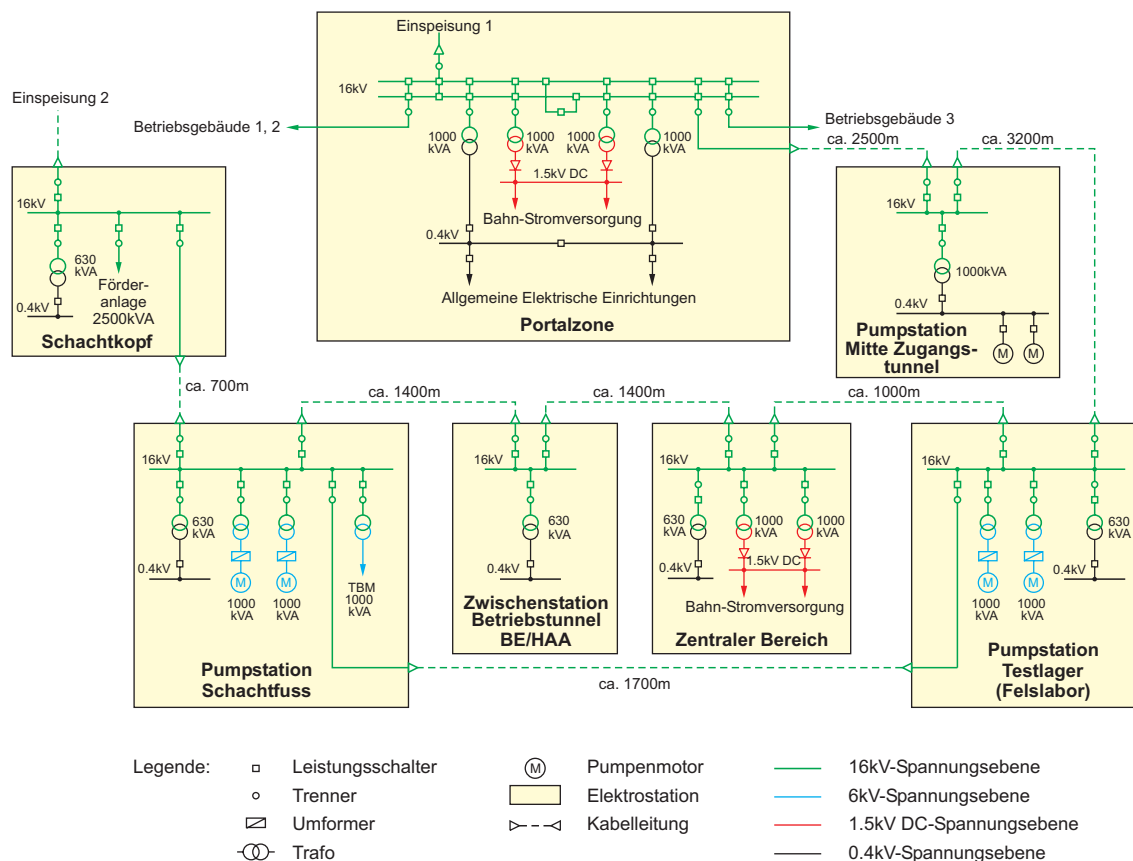


Fig. 3.6 Stromversorgung der Anlagen unter Tag während des Einlagerungsbetriebs

3.4.3 Wasserhaltung

Der Wasserhaltung kommt sowohl beim Bau der untertägigen Anlage, wo im fallenden Vortrieb gearbeitet wird, wie im Einlagerungsbetrieb, wo ein Einfließen von Wasser in die Lagerstollen BE/HAA vermieden werden muss, eine besondere Bedeutung zu. Auf die während des Baus geplanten Massnahmen wird in Kap. 4.2.2 und 4.3 näher eingegangen. Nachstehend werden einige grundsätzliche Überlegungen zu Wasserzutritten im Einlagerungsbetrieb festgehalten.

Die einzige realistischerweise anzunehmende Möglichkeit eines Wasserzutrittes ist über die Zugänge, d.h. über die Rampe oder den Lüftungsschacht. Die Rampe wird als erstes bereits in der Explorationsphase zur Erschliessung des Testlagers (Felslabor) erstellt. Trotz Abdichtungs-injektionen zutretendes Restwasser wird gefasst und via Drainage zur Pumpanlage, welche voraussichtlich noch im Malm erstellt werden kann, geleitet und zur Oberfläche gepumpt. Die zu handhabende Wassermenge ist dannzumal aus dem Bau des Tunnels bekannt und die Auslegung der Pumpanlage erfolgt mit entsprechender Grosszügigkeit. Eine weitere Pumpanlage wird am tiefsten Punkt des Testlagers (Felslabor) als Reserve eingerichtet.

Beim Bau des Schachtes wird die Pumpanlage zum Hochpumpen des Restwassers im Schachtfuss bzw. Pumpensumpf installiert.

Die Abzweigung Bau, also die Stelle, wo der Bauzugang vom Zugangstunnel abzweigt, wird konstruktiv z.B. mit einer Schwelle so ausgebildet, dass mit der "Malmpumpe" nicht mehr handhabbares Wasser zur Pumpanlage im Testlager (Felslabor) fliesst. Ist auch diese überfordert, wird das Wasser nach Durchfliessen des Bautunnels im Pumpensumpf der Schachanlage gefasst und nach oben gefördert.

Erfolgt ein Wasserzutritt via Schacht, stehen, ebenfalls gestaffelt, zwei Pumpanlagen zur Verfügung, nämlich jene im Pumpensumpf und jene im Testlager (Felslabor).

Ferner ist zu beachten, dass der mit Spritzbeton verkleidete Bautunnel als Folge der geneigt angeordneten Lagerzone im Notfall als Retensionsvolumen genutzt und dadurch wertvolle Zeit zur Einleitung entsprechender Gegenmassnahmen gewonnen werden kann. Das Volumen des Bautunnels beträgt ca. 30'000 m³. Bei einem Wasserzufluss von z.B. 100 l/sec dauert das Auffüllen dieses Tunnels mehr als 80 Stunden!

Alle mit Abfällen belegten Lagerstollen sind an ihren beiden Enden mit Abschlüssen gesichert. Effektiv offen und durch Einlagerungsarbeiten belegt sind in der Regel zwei, evtl. ausnahmsweise drei Lagerstollen BE/HAA, welche notfalls, z.B. im Bereich der Abzweiger, kurzfristig und temporär geschlossen werden könnten.

Die Versorgung der Pumpanlagen mit elektrischer Energie erfolgt über die redundant angespiesene Ringleitung oder bei Ausfall der externen Stromzufuhr via Notstromaggregat. Die Pumpanlagen im Testlager (Felslabor) und im Schachtfuss sind in doppelter Ausführung und mit eigenem Trafo vorgesehen (Fig. 3.6).

Nach Abschluss der Einlagerung sind alle Lagerstollen und Lagertunnel verfüllt und durch Abschlüsse gesichert (Kap. 5 und Kap. 8).

3.4.4 Wasserversorgung und -entsorgung

In den *Oberflächenanlagen* erfolgt die Trinkwasserversorgung aus dem öffentlichen Leitungsnetz. Abwässer aus der nicht kontrollierten und kontrollierten Zone werden separat gesammelt. Sie werden je nach Herkunft auf ihren Aktivitätsinhalt überprüft und, falls erforderlich, vor der Einleitung ins Kanalisationsnetz in einer Aufbereitungsanlage für radioaktive Abwässer gereinigt. Häusliche Abwässer werden direkt der Kanalisation zugeleitet.

In den im Betrieb stehenden *Anlagen unter Tag* wird Wasser nur im sanitären Bereich des Zentralen Bereiches gebraucht. Die geringen Frischwassermengen werden periodisch per Tankwagen einem Reservoir von ca. 10 m³ Inhalt zugeführt und als Abwasser ebenfalls per Tankwagen wieder weggebracht.

3.4.5 Heizung und Warmwasser

Die erwartete, über das gesamte Jahr praktisch unveränderte Temperatur im Zentralen Bereich wurde auf ca. 24 °C geschätzt. Eine Heizung erübrigt sich deshalb und eine Kühlung ist unter diesen Verhältnissen nicht vorgesehen.

Die geringe Menge an warmem Brauchwasser wird mit einem Elektroboiler aufbereitet.

3.4.6 Dekontamination von Transportcontainern

Extern angelieferte Transportbehälter werden in den Aussenanlagen des Portalbereichs auf Kontamination geprüft und müssen vor dem Rücktransport gegebenenfalls dekontaminiert werden. Ebenso werden lagerintern verwendete Transportcontainer und Transportabschirmungen periodisch auf Kontamination geprüft und bei positivem Befund dekontaminiert.

3.4.7 Leit- und Kommunikationstechnische Anlagen

Mit den Anlagen der Verfahrensleittechnik wird die Überwachung, Steuerung und Regelung der in der Lageranlage ablaufenden Verfahren und Handhabungsvorgänge sowie die Dokumentation wichtiger Messwerte und Daten sichergestellt.

3.4.8 Brandschutz

Wie bereits beim Lüftungskonzept im Kap. 3.4.1.1 erwähnt, muss in der weiteren Projektbearbeitung die Frage des Brandschutzes unter Einbezug der Lüftung detaillierter ausgearbeitet werden. Neben den Anlagen unter Tag sind dabei insbesondere die Anlagen über Tag genauer zu untersuchen.

Aus heutiger Sicht wird für die Anlagen unter Tag folgendes Brandschutzkonzept verfolgt:

- In den gesamten Anlagen unter Tag wird die Verwendung brennbarer Materialien und der Einsatz möglicher Zündquellen auf ein absolutes Minimum reduziert, sodass letztlich nur noch einzelne, klar definierte Geräte oder Installationen wie z.B. Transformatoren, Lokomotiven oder Pneufahrzeuge bei Ausnahmetransporten mit einem potenziellen Brandrisiko verbleiben (Minimierung der Brandlasten).
- Für diese Geräte und Installationen werden gezielt Massnahmen zur Überwachung und Alarmierung, zur Verhinderung bzw. Erschwerung einer Brandentstehung, zur Brandbekämpfung und, wo technisch machbar, zu dessen Isolation getroffen (Brandabschnitte).
- Die gesamte unter Tag arbeitende Belegschaft wird in der Brandbekämpfung ausgebildet und periodisch geschult.

Die Anlage wird in Brandabschnitte aufgeteilt. Dazu werden Bauelemente mit definiertem Feuerwiderstand verwendet und die Lüftung entsprechend ausgelegt. Fluchtwege werden definiert.

3.5 Handhabungseinrichtungen und Transportmittel

Zwischen den Handhabungseinrichtungen und Transportmitteln und dem Einlagerungsbetrieb, insbesondere dem Betriebsablauf (Kap. 5.2) besteht ein enger Zusammenhang. Um die Lesbarkeit und das Verständnis dieser beiden Kapitel zu erleichtern, werden die wichtigsten Handhabungseinrichtungen hier vorgestellt. Weitere Geräte und die Transportmittel werden in Kap. 5.2 mit dem Betriebsablauf beschrieben.

3.5.1 Anlagen zur Lagerung, Handhabung und Einbringung von Verfüllmaterialien

3.5.1.1 Verfüllmaterialien

Beim Betrieb eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA müssen folgende Verfüllmaterialien gelagert, gehandhabt und eingebracht werden:

- Auflager aus kompaktierten Bentonitblöcken,
- Bentonitgranulat,
- Mörtel sowie
- Materialien zum Verschluss der Lagerstollen BE/HAA und der Lagertunnel LMA: Schotterkies und Beton sowie Bentonit/Quarzsand-Gemisch.

3.5.1.2 Auflager aus kompaktierten Bentonitblöcken

Diese werden in Plastikhüllen vakuumverpackt auf Paletten angeliefert; etwa wie dies beim FEBEX-Versuch im Felslabor Grimsel erfolgt ist (Enresa 1998). Der Umlad im Betriebsgebäude der Empfangsanlage erfolgt mit Kran und Gabelstapler. Werden die Auflager nicht unmittelbar bei ihrer Anlieferung gebraucht, werden sie im Betriebsgebäude abgestellt.

3.5.1.3 Bentonitgranulat

Bentonitgranulat wird in geschlossenen, luftdichten Containern (Silos) angeliefert, deren Umlad im Betriebsgebäude mit einem Kran erfolgt. Die Container werden in der Empfangsanlage gestapelt bevor sie auf Plattformwagen zum Zentralen Bereich unter Tage gebracht werden. Dort erfolgt der Umschlag des Granulats in den *Verfüllwagen* (Fig. 3.7), der via Betriebstunnel, Abzweiger und Schleuse in den Lagerstollen BE/HAA einfahren kann, um dort die Granulatverfüllung einzubringen.

Der Verfüllwagen fasst 11 m^3 Granulat und hat eine Verfüllleistung von $14 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Leerung desselben dauert somit ca. $\frac{3}{4} \text{ h}$. Er ist so konstruiert, dass er eingelagerte Abfallgebinde überfahren (Fig. 3.7, Schnitt C) und dadurch mit seinen Entladerohren den Anschluss an die bestehende Granulatböschung herstellen kann. Das Granulat wird seitlich mit je einem Förderband zu den Entladerohren gebracht, wo es mit Spiralförderern in den Stollen gebracht wird. Die Energieversorgung erfolgt über ein Elektro- und Steuerkabel, welches auf einer Trommel auf dem Wagen montiert ist.

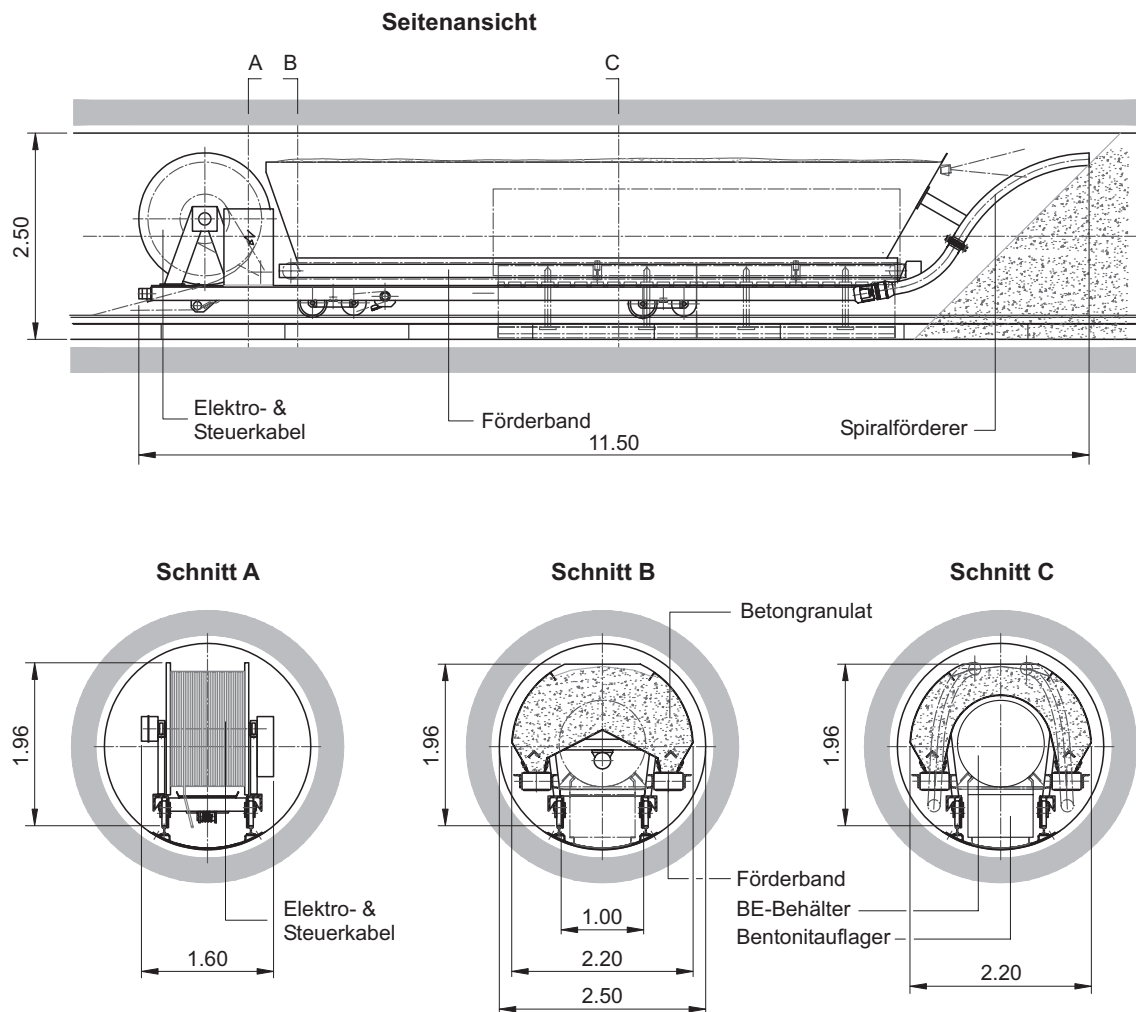


Fig. 3.7 Verfüllwagen für Bentonitgranulat – Seitenansicht und Schnitte in einem Lagerstollen BE/HAA – Abmessungen in m

3.5.1.4 Mörtel

Sand wird in gedeckten Wagen, Zement in Silowagen angeliefert. Sowohl Sand wie Zement werden im Betriebsgebäude in Silos gelagert und je nach Bedarf und Rezeptur mit herkömmlichen Betonmischern verarbeitet. Weil mit diesem Mörtel komplizierte Hohlraumformen gefüllt werden müssen, wird der Mörtel dünnflüssig und leicht pumpbar hergestellt (Mayer & Wittmann 1996). Sowohl zum Verfüllen der Lagercontainer in der Empfangsanlage wie bei der Verfüllung der Lagertunnel LMA werden herkömmliche Beton- bzw. Mörtelpumpen eingesetzt.

3.5.1.5 Beton und Schotterkies, Bentonit/Quarzsand-Gemisch

Die Anlieferung von Betonkies und Zement sowie deren Lagerung erfolgen gleich wie beim Mörtel. Ebenso die Herstellung des Betons. Das Einbringen vor Ort erfolgt vorzugsweise mit Bandförderern. Das Einbringen durch Pumpen ist beim Beton jedoch möglich. Schotterkies wird wie Betonkies angeliefert und gehandhabt.

Bentonit/Quarzsand-Gemisch wird wie Bentonitgranulat in Containern (Silos) einbaubereit angeliefert und gehandhabt. Der Einbau erfolgt mit Bandförderern und die Verdichtung vor Ort z.B. mit einer Kleinwalze und Handstampfer, wie dies im Projekt Gewähr (Nagra 1985) dargestellt wurde.

3.5.2 Anlagen zur Handhabung und Einlagerung von Abfällen

3.5.2.1 Betriebsgebäude der Empfangsanlage

Alle Abfälle werden in einlagerungsfähiger Form in Transportbehältern angeliefert. In der Empfangsanlage sind somit diverse Krane mit Hebekapazitäten bis gegen 130 t und verschiedenste Greifvorrichtungen sowie entsprechende Deckelabschraubgeräte vorzusehen. Generell wird bei der Auslegung der Hebezeuge darauf geachtet, die Hubhöhen minimal zu halten.

Wird die Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA in die Aussenanlagen integriert, werden die BE/HAA dort für die Einlagerung vorbereitet.

3.5.2.2 Einlagerung BE/HAA

Zur Bereitstellung des Einlagerungspaketes, d.h. des Bentonitauflagers und des BE- bzw. HAA-Behälters in der Schleuse BE/HAA und zum Einbringen desselben in den Lagerstollen sind folgende Einrichtungen und Geräte geplant:

- *Ladekran 3t*, manuell bedient, auf Bahnwagen montiert zum Versetzen der Bentonitauflager vom Plattformwagen zum Einlagerungstrolley.
- *Hydraulikwagen* (Fig. 3.8), ein horizontal und teleskopartig ausfahrbarer Hydraulikzylinder, installiert auf einem leichten Fahrgestell. Er wird gebraucht um den Abfallbehälter aus der

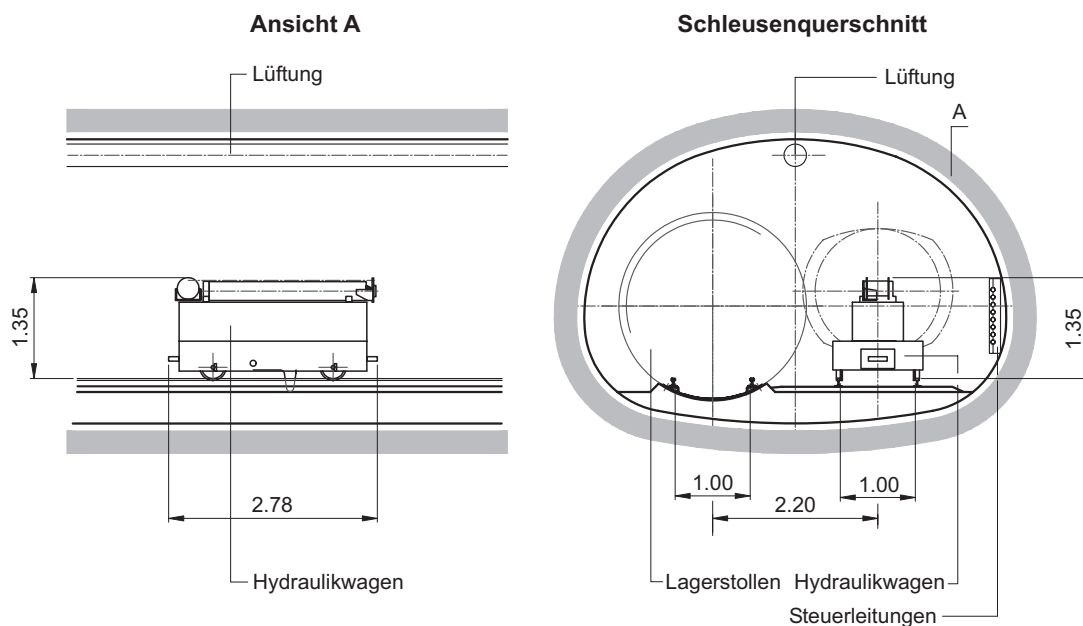


Fig. 3.8 Hydraulikwagen – Seitenansicht und Ansicht in der Schleuse BE/HAA
Abmessungen in m

anlagenintern verwendeten Transportabschirmung bzw. Transportcontainer fernbedient auf das Umsetzgerät (Fig. 3.9) zu schieben.

- *Umsetzgerät* (Fig. 3.9), ein konkav geformter kräftiger Unterbau zur Aufnahme des Abfallbehälters; mit zwei hydraulischen Greifern, vergleichbar einer mächtigen Hand, mit welchem die bis gegen 30 t schweren BE-Behälter sicher und präzise auf den Einlagerungstrolley (Fig. 3.10) umgesetzt werden können. Das Umsetzgerät ist beim Beschicken der Lagerstollen fix in der Schleuse BE/HAA installiert und im Boden verankert.

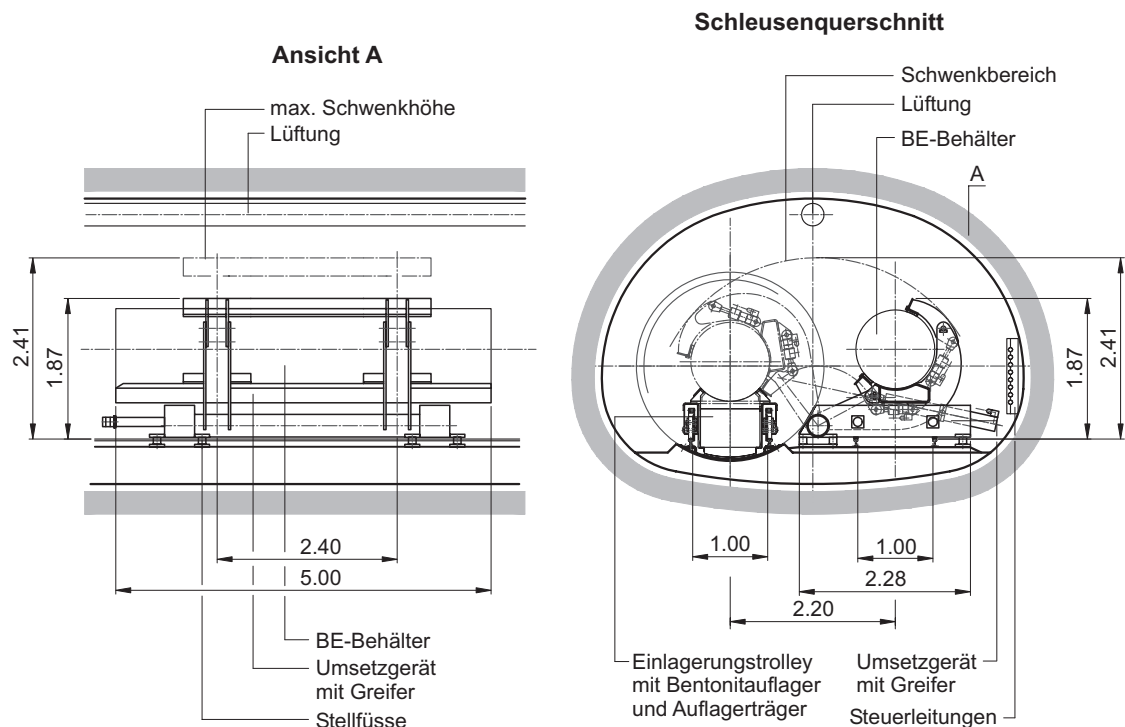


Fig. 3.9 Umsetzgerät für BE/HAA-Behälter – Seitenansicht und Ansicht in der Schleuse BE/HAA – Abmessungen in m

- *Einlagerungstrolley* (Fig. 3.10), ein Gerät aus zwei über den Schienen laufenden Hohlprofilen, welche die Radsätze enthalten und die auf der Seite des Antriebes und der Kabelrolle biege- und torsionssteif verbunden sind. Auf der gegenüberliegenden Seite und zwischen den Hohlträgern ist der Trolley offen. Er besitzt einen eigenen elektrischen Fahrtrieb und kann gegenüber der Schiene um mehrere Zentimeter angehoben und ebenso abgesenkt werden. Der dazu eingesetzte Mechanismus stammt aus dem Untertagbau und hat sich dort unter schwierigsten Umständen bestens bewährt. Um die Bentonitauflager tragen zu können, sind auf den Trägerinnenseiten entsprechende Abkantbleche vorhanden, die vor Rangiermanövern im Anschlussstollen entfernt werden. Zur direkten Lasteinleitung in die kräftigen Längsträger und dadurch unmittelbar in die Räder und Schienen werden die Abfallbehälter von zwei Auflagerträgern auf dem Trolley gehalten. Die Abfallbehälter liegen somit *nicht* auf den Bentonitauflagern auf. Über die Kabelrolle wird der Trolley mit elektrischer Energie und den nötigen Steuersignalen versorgt.

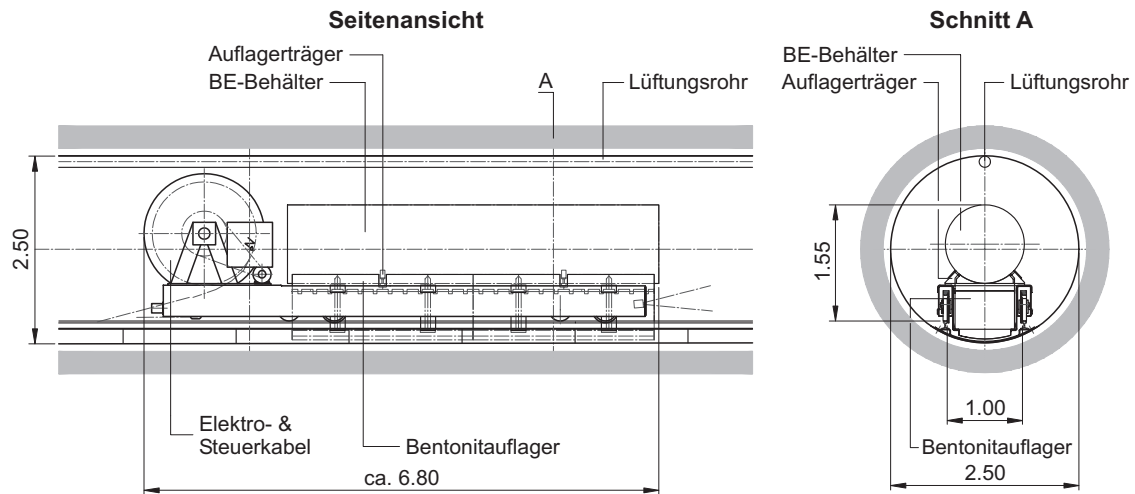


Fig. 3.10 Einlagerungstrolley – Seitenansicht und Schnitt durch einen Lagerstollen BE/HAA
Abmessungen in m

- *Winde*, mit welcher der Einlagerungstrolley und der Verfüllwagen während des Einfahrens in den Lagerstollen BE/HAA gesichert und zum Herausfahren gezogen werden, wird auf eine akkubetriebene Stollenlokomotive montiert und bildet die *Windenlokomotive* (Fig. 3.11).

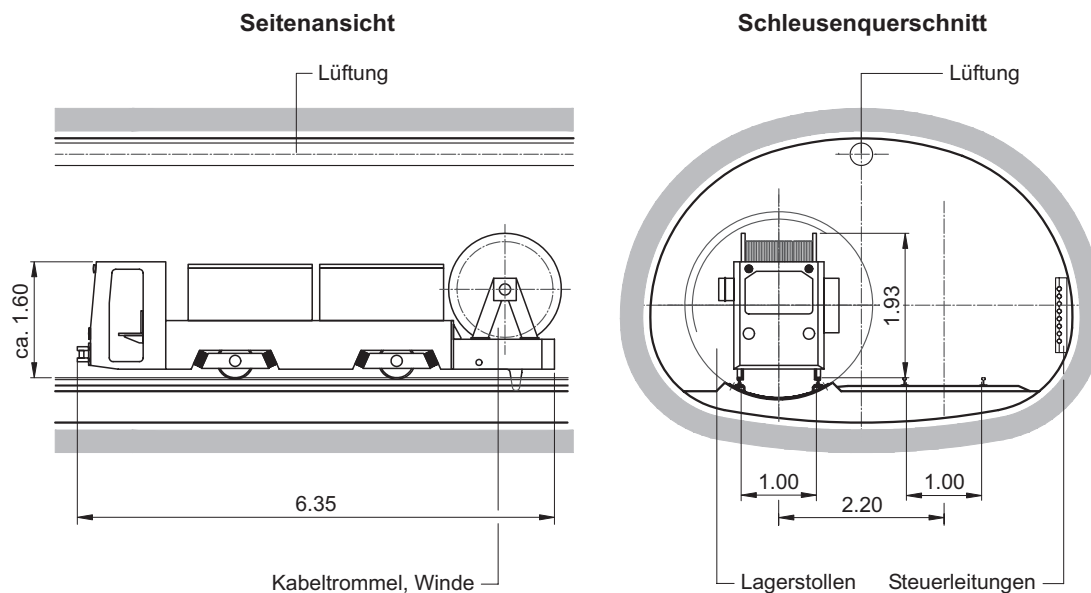


Fig. 3.11 Windenlokomotive – Seitenansicht und Schnitt durch die Schleuse BE/HAA
Abmessungen in m

3.5.2.3 Einlagerung LMA

LMA-1

Zur Einlagerung der LMA-1 in die Lagertunnel sind folgende Geräte vorgesehen (Fig. 3.12):

- *Umladekran*, ausgelegt für eine Hublast von 40 t, fernbedient.
- *Hilfskran* für 5 t Hublast, fernbedient.

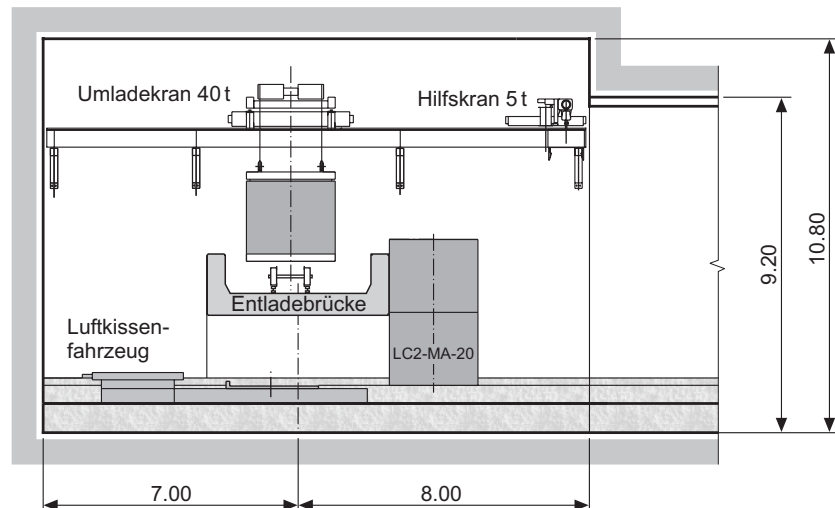


Fig. 3.12 Umladestation LMA-1; Längsschnitt mit Einlagerungsgeräten - Abmessungen in m

- *Luftkissenfahrzeug* (Fig. 3.13) Hublast 100 t, fernbedient, für den Transport von Containerstapeln. Der zwischen den Luftkammern und dem Boden entstehende Spalt beträgt weniger als 0,1 mm, sodass nur sehr wenig Luft austreten kann. Der Luftbedarf während des Einsatzes beträgt ca. 20 m³/min. Die Qualitätsanforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit der Transportstrecke sind höher als bei konventionellen Betonoberflächen, können aber auch im Untertagbau problemlos erfüllt werden. Die Luftkissentechnik hat sich als sehr gering störanfällig erwiesen und wird deshalb auch in der Kerntechnik seit Jahren erfolgreich eingesetzt.

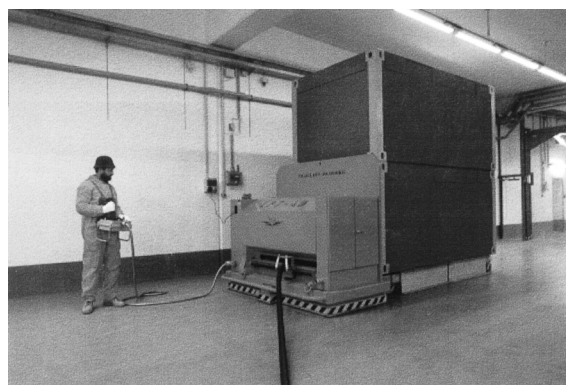


Fig. 3.13 Luftkissenfahrzeug – Beispiele aus dem Zwischenlager Gorleben

LMA-2

Die Einlagerung von WA-COG-2 als LMA-2 ist in einem verlängerten Abschnitt des Betriebs-tunnels LMA vorgesehen (Beilage 3-1 und 3-7).

- Das *Einlagerungsgerät LMA-2* (Fig. 3.14) ist als fahrbarer Portalkran mit hydraulischer Hubvorrichtung konzipiert. Die Hublast beträgt 40 t und die Steuerung erfolgt fernbedient. Die Horizontalverschiebung von maximal ca. 70 m erfolgt über Elektroantrieb.

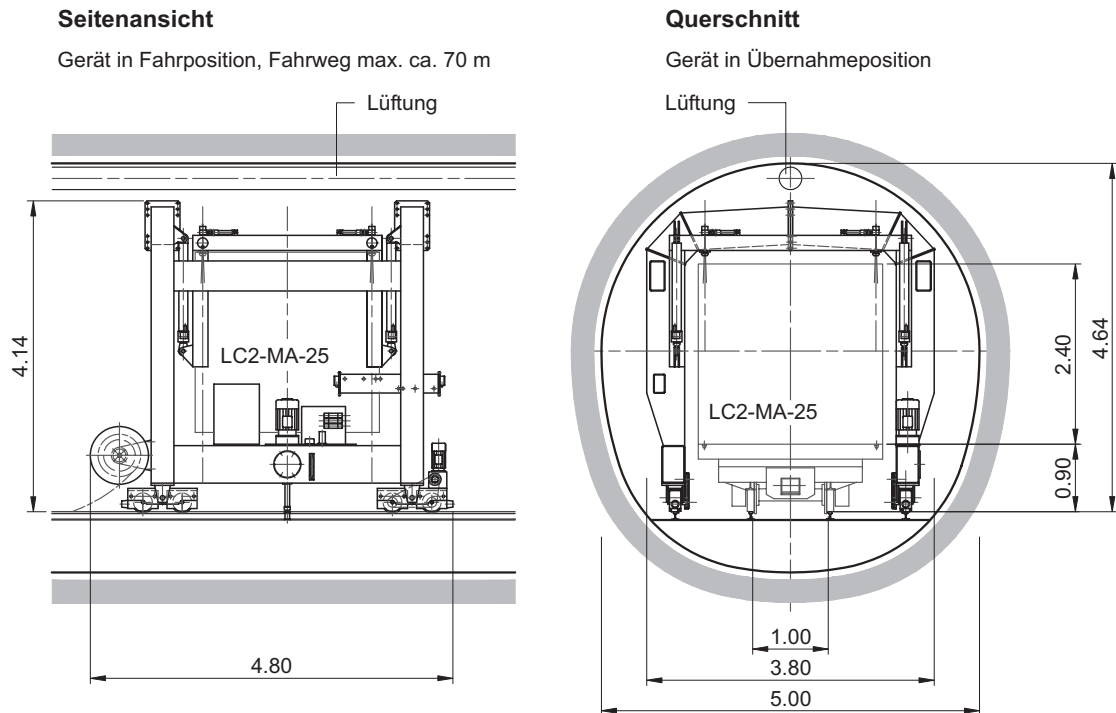


Fig. 3.14 Einlagerungsgerät für LMA-2 – Seitenansicht und Schnitt durch den Lagertunnel LMA-2 – Abmessungen in m

3.6 Strahlenschutzzone

3.6.1 Zielsetzung und Grundlagen

Das Festlegen einer Strahlenschutzzone ist eine sicherheitstechnische Massnahme, die dazu dient, eine unzulässige Strahlenexposition des Betriebspersonals, von Besuchern und der Bevölkerung in der Umgebung einer Kernanlage zu vermeiden.

Die Grundlagen dazu sind die Strahlenschutzverordnung (StSV 1994) sowie die HSK Richtlinien, wie sie in Kap. 2.2.4.2 aufgeführt sind. Auf dieser Basis bilden die umzäunten Aussenanlagen des Portal- und Schachtkopfbereiches sowie die Anlagen unter Tag den *überwachten Bereich*. Dieser wird in eine *kontrollierte Zone* und eine *nicht kontrollierte Zone* unterteilt.

3.6.2 Kontrollierte Zone

Zur *kontrollierten Zone* gehören die für den Betrieb freigegebenen Anlagen unter Tag und die an den Zugangstunnel angrenzenden Teile der über Tage liegenden Empfangsanlage inkl. deren Schleusen. Die eingezäunten Aussenanlagen und jene Bereiche der Empfangsanlage bis zu den Schleusen in der Empfangsanlage gehören zur *nicht kontrollierten Zone*. Ebenso zur nicht kontrollierten Zone gehören der eingezäunte Schachtkopfbereich und die durch Bauaktivitäten belegten Anlagenteile unter Tag inkl. Schacht.

Die kontrollierte Zone wird entsprechend den behördlichen Vorschriften festgelegt. Sie wird nach potenziellem Oberflächen- bzw. Luftkontaminationsgrad und Ortsdosisleistungen in *Zonentypen* und *Gebiete* unterteilt.

3.6.3 Zonentypen

Die Unterteilung in Zonentypen hat zum Ziel, *Inkorporationen* (Inhalation) radioaktiver Stoffe zu vermeiden und beim Auftreten von Luftkontamination die daraus folgenden Personendosen möglichst niedrig zu halten. Gemäss HSK/KSA Richtlinie R-07 (HSK/KSA 1995) erfolgt die Zonentypenunterteilung in die vier Gruppen I bis IV. In den verschiedenen Zonen ist dem Zonentyp entsprechend eine Unterdruckstaffelung vorzusehen, um einen Kontaminationsübertritt von einem Zonentyp höherer Aktivität in einen geringerer Aktivität zu vermeiden.

Die Möglichkeit einer Inkorporation (Inhalation) kann beim Umladen von Abfällen in der Empfangsanlage, insbesondere bei Oberflächenkontamination der Abfallgebinde, nicht ausgeschlossen werden. Die diesbezüglich vorzusehenden Massnahmen sind aus dem Betrieb von Nuklearanlagen bekannt und werden bei Aufnahme der Projektbearbeitung für die Aussenanlagen berücksichtigt.

In den Anlagen unter Tag kann eine Inhalation von Radionukliden bei der Einlagerung von BE/HAA ausgeschlossen werden, weil diese Abfälle in entsprechend ausgelegten Behältern eingeschlossen (eingeschweisst) sind. Ein geringes potenzielles Inhalationsrisiko besteht bei einem längerdauernden Offenhalten der LMA-Lagertunnel (was im Referenzfall nicht vorgesehen ist), weil nicht alle Behälter gasdicht verschlossen sind und die Verfüllung der Lagercontainer aus Gründen der Langzeitsicherheit porös sein muss und damit ein Einschluss volatiler Nuklide nicht gegeben ist. Werden volatile Nuklide in der Abluft festgestellt, wird diese automatisch über Filter geführt und dem Lagertunnel ein entsprechend erhöhter Zonentyp zugewiesen. Durch Absaugen der Luft am Tunnelende wird bereits während des Lagerbetriebes in diesem ein Unterdruck erzeugt und dadurch ein Zufließen von Frischluft gewährleistet.

Die *gesamten Anlagen unter Tag* werden somit dem *Zonentyp I*, der *"gelben Zone mit geringer Kontaminationswahrscheinlichkeit"* (HSK/KSA 1995) zugewiesen, wo bezüglich Inkorporation (Inhalation) keine spezifischen Zutrittsbedingungen bestehen und bei Einhaltung des ALARA-Prinzips die Aufenthaltsdauer nicht beschränkt ist.

3.6.4 Gebiete

Die Unterteilung in Gebiete hat zum Ziel, Personendosen infolge externer *Bestrahlung* möglichst niedrig zu halten. Sie sind entsprechend der dort zu erwartenden Ortsdosisleistungen zu kennzeichnen. Gemäss HSK/KSA Richtlinie R-07 (HSK/KSA 1995) werden die fünf verschiedenen Gebiete V bis Z definiert. Die Zutrittsbedingungen und die Aufenthaltsdauer sind gemäss den Gebietstypen festgelegt.

Alle Abfälle im geologischen Tiefenlager BE/HAA/LMA werden lagerintern nur in entsprechend ausgelegten Abschirmungen und Containern transportiert und in entsprechend ausgerüsteten und abgeschirmten Räumen hantiert. Daraus ergibt sich, dass die Transportwege gebietsmässig sehr tief und die Handhabungsräume entsprechend höher eingestuft werden können bzw. müssen.

Für die Anlagen unter Tag gilt

- Gebietstyp V, wenn keine Abfälle, auch nicht in Abschirmungen, vorhanden sind,
- Gebietstyp W, wenn abgeschirmte Abfälle vorhanden oder unmittelbar unterwegs sind,
- Gebietstyp Z, wenn unabgeschirmte Abfälle gehandhabt werden.

Für Gebietstyp V bestehen keine speziellen Zutrittsbedingungen und die Aufenthaltsdauer ist unter Beachtung des ALARA-Prinzips nicht eingeschränkt (HSK/KSA 1995). Beim Gebietstyp W ist der Zutritt nur nach Weisung der nach Betriebsreglement autorisierten Stelle erlaubt und die Aufenthaltsdauer ist entsprechend beschränkt. Beim Gebietstyp Z ist der Zutritt nur unter sehr restriktiven Bedingungen und sehr starken Beschränkungen erlaubt. Die Aufenthaltsdauer ist dort sehr stark eingeschränkt.

Gebietstyp Z gilt in den Anlagen unter Tag in der Schleuse BE/HAA und anschliessendem Lagerstollen sowie in der Umladestation LMA und anschliessenden Lagertunnel, wenn unabgeschirmte Abfälle gehandhabt werden. Sind in diesen Anlagenteilen keine Abfälle vorhanden oder sind diese abgeschirmt, gilt Gebietstyp V bzw. W wie im übrigen Teil der Anlagen unter Tag.

3.6.5 Betriebliche Massnahmen

Die Handhabung radioaktiver Abfälle bedingt spezielle betriebliche Massnahmen wie z.B. Strahlenschutzüberwachung, Dosimetrie des Betriebspersonals und der Besucher sowie die Emissionsüberwachung. Auf diese Aspekte wird im Kap. 5.5 noch näher eingegangen.

3.7 Optionen – Auslegung Anlagen unter Tag

Der bautechnische Machbarkeitsnachweis wird an einem Referenzprojekt geführt, in welchem die Anlagenteile aufgrund konkreter Vorgaben ausgelegt und dann baukastenmässig zu einem in sich geschlossenen Ganzen zusammengefügt werden. Um die Flexibilität der Anlage und Robustheit des Systems zu überprüfen, werden am Schluss jedes Hauptkapitels Fragen im Sinne von "was, wenn"-Szenarien diskutiert. In diesem vorliegenden Kapitel geht es vor allem um Fragen zur Auslegung der Anlagen unter Tag.

3.7.1 Erschliessung der Lagerzone

Die Erschliessung der Lagerzone für den Einlagerungsbetrieb kann durch eine Rampe oder durch einen Schacht erfolgen. Beide haben ihre Vor- und Nachteile. Je nach Gewichtung dieser Aspekte fällt der Entscheid zu Gunsten der einen oder der andern Zugangsvariante aus. Für das Referenzprojekt wurde, insbesondere zur Elimination des Störfalls "Behälterabsturz", der Schacht zu Gunsten der Rampe zurückgestellt. Ein weiterer wichtiger Grund war die Flexibilität in der Anordnung sowohl der ober- wie unterirdischen Anlagen, weil die Linienführung des Zugangstunnels weitgehend frei gewählt werden kann.

3.7.2 Unterteilung des Einlagerungsbereichs BE/HAA

Im Referenzprojekt sind die Lagerstollen in *einem* Einlagerungsfeld angeordnet (Fig. 3.1). Sollte sich die Notwendigkeit ergeben, das Einlagerungsfeld zu unterteilen, könnte dies z.B. wie in Fig. 3.15 dargestellt, erfolgen. Die beiden Felder müssen dabei nicht gleich gross sein.

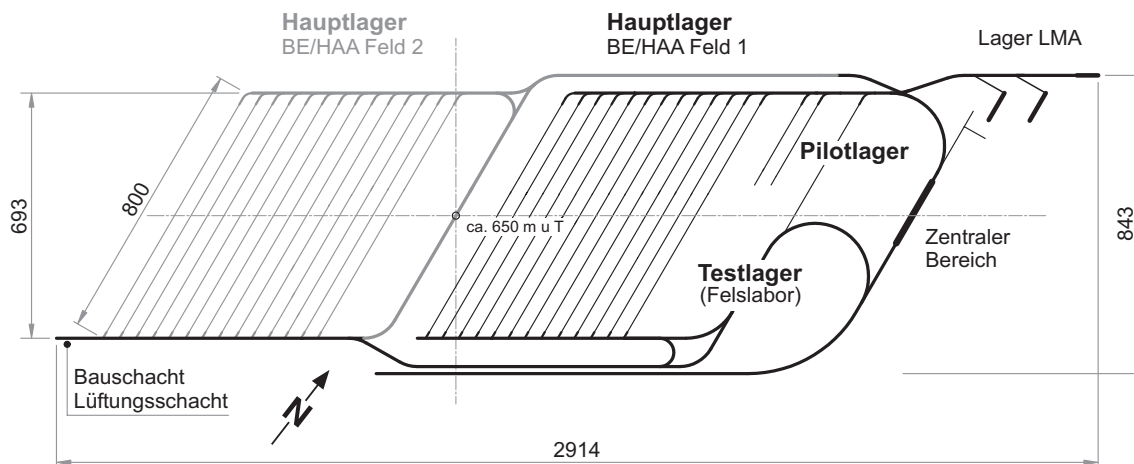


Fig. 3.15 Übersicht über die untertägigen Anlagen eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA – Auslegungsbasis 192 GW_ea – Abmessungen in m
Option mit zwei Einlagerungsfeldern BE/HAA

3.7.3 Grössere Abfallmengen

In Kap. 2.4.4 sind zwei Varianten vorgegeben:

- Variante 1: ca. 2'900 m³ zusätzliche LMA zum Referenzfall,
- Variante 2: Abfallmenge für 300 GW_ea als Extremvariante.

3.7.3.1 Variante 1

Im Referenzfall mit ca. 4'360 m³ konditioniertem LMA-Volumen (Tab. 2.2) resultieren 2 Lagertunnel LMA-1 von je 90 m und 1 Tunnelstück von 60 m für LMA-2 (Beilage 3-1). Mit 2'900 m³ zusätzlichen Abfällen erhöhen sich diese Tunnellängen geringfügig. Insgesamt ergeben sich für LMA-1 2 Tunnel zu ca. 145 m und für LMA-2 1 Tunnel von ca. 100 m. Diese Mehrlängen lassen sich problemlos realisieren.

3.7.3.2 Variante 2

Zur Entsorgung dieser Abfallmenge werden 44 Lagerstollen BE/HAA zu 800 m benötigt, die in zwei Feldern angeordnet werden. Dies könnte z.B. wie in Fig. 3.15 gezeigt oder gemäss Fig. 3.16 erfolgen. Für die LMA-1 werden 2 Lagertunnel zu je 160 m und für die LMA-2 ein Tunnelstück von ca. 110 m berechnet (Fig. 3.16). Die LMA-1 könnten aber auch in 3 etwas kürzeren Tunneln und die LMA-2 in der gleichen Tunnelanordnung wie die LMA-1 angeordnet werden. Infolge der grösseren Ausdehnung der Lagerzone muss ein zweiter Lüftungsschacht vorgesehen werden.

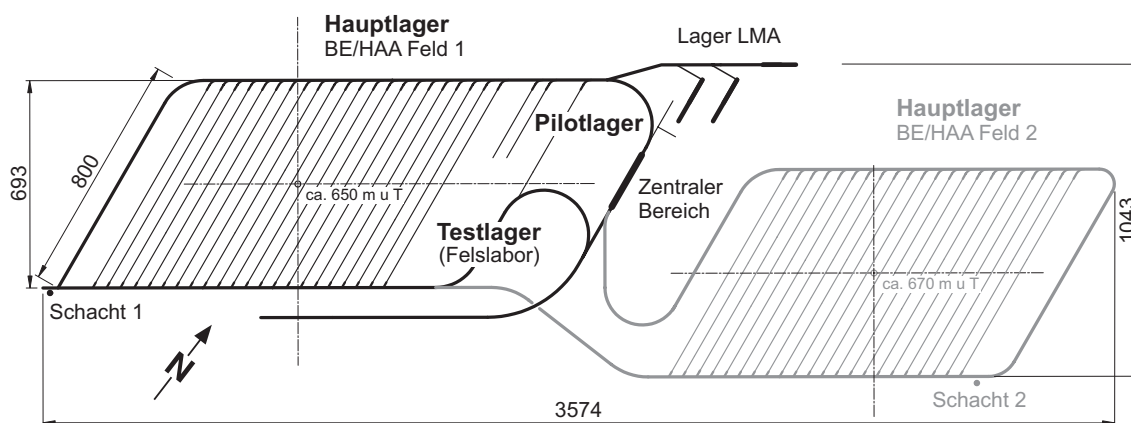


Fig. 3.16 Beispiel eines möglichen geologischen Tiefenlagers für ein Abfallinventar auf der Basis von 300 GW_ea – Abmessungen in m

3.7.4 Platzverhältnisse im Opalinuston des Zürcher Weinlandes

Die Beschreibung der geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland im Kap. 2.3.2.1 zeigt, dass wegen der ruhigen Lagerung in einem Bereich von 2 km im Streichen und 1 km im Fallen des Opalinustons keine auslegungsbestimmenden Störzonen zu erwarten sind. Die Überprüfung der Lokalisierungsmöglichkeiten der für den Referenzfall ermittelten Lagerzone (Fig. 3.1) mit den geologischen Tiefenkarten (Birkhäuser et al. 2001) hat bestätigt, dass insbesondere bei Aufgabe der Tiefenvorgabe von 650 m, verschiedene Möglichkeiten zur Platzierung derselben bestehen.

Um eine verlässliche Aussage darüber zu machen, ob die räumlichen Verhältnisse des Gebietes auch für eine Abfallmenge aus dem 300 GW_a-Szenarium reichen, müssen zwei Unterlagen vorliegen, nämlich

- eine mögliche Auslegung der Lagerzone mit ungefähren Abmessungen sowie
- die minimal garantierte Fläche, in welcher ein Tiefenlager aus geologischer Sicht, bzw. aus der Sicht der Langzeitsicherheit platziert werden könnte.

Eine denkbare Auslegung der Lagerzone für 300 GW_a ist in Fig. 3.16 dargestellt. Die grösste Länge beträgt ca. 3'600 m, die Breite über alles ca. 1050 m. Die aus geologischer Sicht evaluierten potenziellen Lagergebiete sind in Fig. 3.17 dargestellt. Unter Berücksichtigung auch geringfügigster geologischer Störeinflüsse ist das Lagergebiet erster Priorität ermittelt worden, welches der oben genannten geologischen Minimalfläche entspricht.

Der Vergleich der beiden Fig. 3.16 und 3.17 zeigt, dass die 300 GW_a-Lagerzone im geologisch evaluierten Minimalgebiet untergebracht werden kann. Das potenzielle Standortgebiet Zürcher Weinland weist somit gegenüber dem Referenzprojekt eine genügende Raumreserve auf. Die Platzierungsmöglichkeiten für das 300 GW_a-Szenarium sind jedoch beschränkt.

3.7.5 Normalprofil der Haupttunnel

Im heutigen Normalprofil der Haupttunnel (Schnitt C, Beilage 3-6) ist noch Raum für Fussgänger eingeplant, obwohl Fussgängerverkehr im Normalbetrieb in den Betriebstunneln BE/HAA und LMA nicht vorgesehen ist. Wird dieser Raum eliminiert und für den Notfall Nischen wie z.B. in Eisenbahntunneln eingeplant, kann die Querschnittsbreite reduziert werden. Dies wird Gegenstand zukünftiger Optimierungen sein, wo auch die Profilhöhe für die verschiedenen Tunnel evtl. unterschiedlich definiert werden kann, siehe auch Kap. 5.7.6.

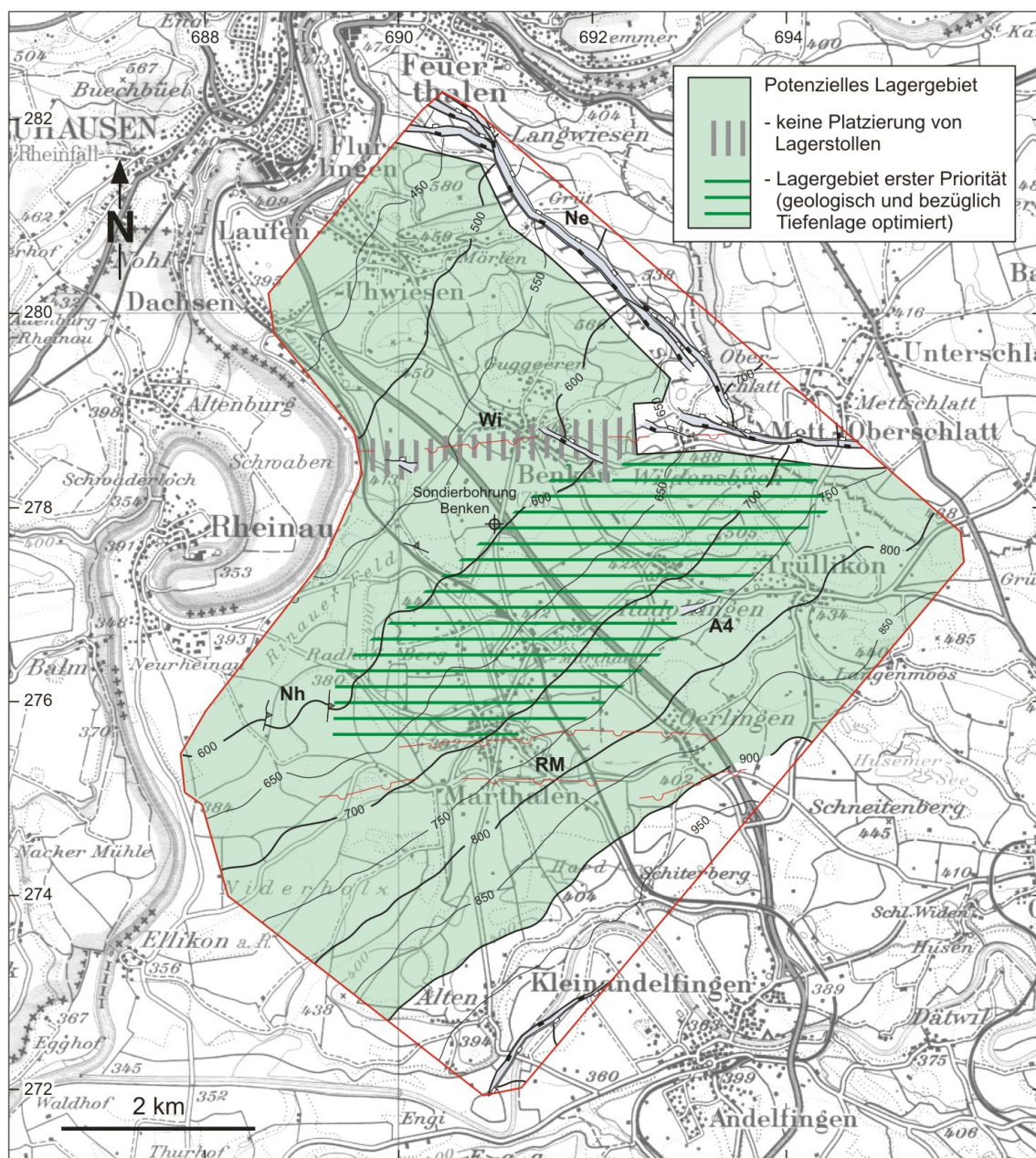
3.7.6 Frischluftversorgung des Baubereiches

Die Frischluftzufuhr zur gesamten Anlage unter Tag erfolgt über den Gesamtquerschnitt des Zugangstunnels. Bei der Abzweigung Bau wird der Luftstrom geteilt und ein Teil in den Kontrollstollen BE/HAA, das Testlager (Felslabor) und in den Baubereich geleitet (Fig. 3.5). Sollte dies aus z.Zt. nicht bekannten Gründen in Zukunft nicht mehr zulässig sein, kann die Frischluftversorgung dieser Anlagenteile z.B. über eine separate, im Zugangstunnel zu installierende Lüftungsleitung erfolgen. Die im Tunnel fliessende Luft müsste dann am Übergang zum Baubereich als Abluft abgeleitet werden.

3.7.7 Zusätzliche Massnahme zur Wasserhaltung

Die Wasserhaltung ist im Kap. 3.4.3 beschrieben. Wird ein Überfliessen der Schwelle beim Abzweiger Bau und somit ein Einfließen von Wasser in den Betriebstunnel via Zentralem Bereich befürchtet, sind drei Massnahmen möglich:

- Erhöhung der Schwelle durch entsprechend ausgelegte Dammbalken,
- Einbau einer weiteren Pumpstation am Ende des Zugangstunnels, beim Zentralen Bereich,
- Kurzfristiger und temporärer Verschluss der Lagertunnel im Bereich der Abzweiger.



Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie (BA034965)



Fig. 3.17 Potenzielles Lagergebiet im Zürcher Weinland mit geologischen Eingrenzungen

4 Bautechnische Machbarkeit des Tiefenlagers

4.1 Einleitung

Um ein geologisches Tiefenlager im Opalinuston zu erstellen, müssen einerseits die in der Lagerzone benötigten Anlagen in dieser Formation gebaut und andererseits die Lagerzone von der Geländeoberfläche her erschlossen werden. Das letztere bedeutet, dass die überliegenden Gesteinsschichten durch Rampen und/oder Schächte durchfahren werden müssen (Fig. 3.1 und 10.1 sowie Beilagen 3-1 und 3-2).

Es ergeben sich somit beim bautechnischen Machbarkeitsnachweis zwei unterschiedliche Fragestellungen, welche im folgenden auch unterschiedlich behandelt werden, nämlich:

- Für die *Lagerzone* stellt sich die Frage, ob die *Lagerstollen BE/HAA* möglichst ohne schwerere stabilitätsbedingte Einbauten machbar sind. Aus Gründen der Langzeitsicherheit sind zementgebundene Felssicherungsmassnahmen wie z.B. Spritzbeton zumindest in jenen Bereichen der Lagerzone nicht erwünscht, wo Abfälle (BE/HAA) einzulagern sind. Die Verwendung von Stahleinbauten als Felssicherung ist zwar grundsätzlich zulässig, sollte aber aus verschiedenen Gründen wie z.B. Entstehung von Korrosionsgasen in der Langzeitentwicklung, möglichst sparsam erfolgen.

Im weiteren sind bei den Lagerstollen die zu erwartenden Deformationen zur Beurteilung des geplanten Tunnelbohrmaschineneinsatzes (TBM) abzuschätzen. Dies deshalb, weil durch den Einsatz einer TBM der anstehende Fels, insbesondere bei dem kleinen Stollendurchmesser, bezüglich Auflockerung wesentlich geringer beansprucht wird als z.B. im Sprengvortrieb. Beim Einsatz von Teilschnittmaschinen müsste der Stollenquerschnitt vergrössert werden, was unerwünscht ist.

Bei den *grösseren Querschnitten*, wie z.B. der Umladestation im Lagertunnel LMA-1 sind die Beanspruchungen der vorgesehenen Felssicherungsmassnahmen zu ermitteln, um deren Machbarkeit zu überprüfen. Hier bestehen keine Restriktionen bezüglich zu verwendender Materialien.

Diese Nachweise werden durch felsmechanische Berechnungen erbracht, wobei die eingesetzten Modelle vereinfacht und die getroffenen Annahmen konservativ sein können, jedoch bezüglich Machbarkeit belastbare Aussagen zulassen müssen. Eine Optimierung der Querschnitte ist zur Zeit nicht erforderlich und bleibt einer weiteren Projektphase vorbehalten.

Ergänzend zu den Berechnungen werden ausführungstechnische Massnahmen beschrieben, welche nicht nur das Erstellen von Anlagenteilen im Opalinuston sondern auch deren längerfristige Nutzung sicherstellen sollen.

- Bei den *überliegenden Formationen* stellt sich die Frage der Durchörterung wasserführender Schichten, insbesondere in Verbindung mit dem fallenden Vortrieb der Rampe. Als wasserführend gelten die an der Oberfläche liegenden Lockergesteine des Quartärs, z.T. das Tertiär sowie die oberen Schichten des Malms (Beilage 2-1).

Dieser Machbarkeitsnachweis wird durch den Beschrieb der dazu vorgesehenen baulichen Massnahmen erbracht.

Die tunnelbautechnische Machbarkeit in den übrigen Schichten erfordert keine spezielle Diskussion. Sie betrifft ausschliesslich wenig wasserführendes und standfestes Gestein und kann als gegeben eingestuft werden. Die bautechnisch problematischen Formationen des

Gipskeuper und die Anhydritgruppe des Mittleren Muschelkalk liegen unterhalb des Lager-niveaus und werden somit durch bauliche Massnahmen nicht tangiert (Beilage 3-2 und Fig. 2.4).

Im weiteren werden in diesem Kapitel Angaben zur baulichen Realisierung der Anlage mit generellem Bauprogramm sowie Hinweise auf spezifische bautechnische Gesichtspunkte gemacht. Diese sind von allgemeinem Interesse und für die Machbarkeit der Anlage von untergeordneter Bedeutung.

4.2 Stollen und Tunnel im Opalinuston

4.2.1 Felsmechanische Berechnungen

4.2.1.1 Vorgaben und Annahmen

Das geschichtete Gebirge lässt sich als ein Material mit transversal-isotropen Eigenschaften beschreiben, was bedeutet, dass innerhalb der Schichten isotrope Verhältnisse vorherrschen. Die Eigenschaften parallel zur Schichtung unterscheiden sich von jenen senkrecht dazu. Die Festigkeitseigenschaften des Gebirges werden durch die Festigkeit der Schichtpakete und die Festigkeit der Schichtung bestimmt.

Die felsmechanischen Kennziffern des Opalinustons sind aus den geologisch/geotechnischen Untersuchungen im Zürcher Weinland ermittelt worden und sind als Planungsgrundlage in Kap. 2.3.2.1, Tab. 2.1 mit entsprechenden Referenzen aufgeführt. Diese Werte sind für einen mittleren Wassergehalt des Tons von ca. 3.5–4.5 Gewichtsprozenten (Gew.-%) charakteristisch.

Die Spannungsverhältnisse in 650 m Tiefe sind wie folgt charakterisiert (Kap. 2.3.2.1): Die maximale horizontale Spannung beträgt 22.6 MPa und ist ca. N–S ausgerichtet; die minimale horizontale Spannung beträgt 15.1 MPa und für den Überlagerungsdruck sind 15.9 MPa, für den max. Porenwasserdruck 8 MPa ermittelt worden (Nagra 2002a). Die Schichten fallen nach Südosten ein. Die Neigung beträgt ca. 4°.

Auf Grund dieser anisotropen Spannungsverteilung und dem Ziel, in den Lagerstollen HAA/BE möglichst *keine* stabilitätsbedingten Einbauten zu verwenden, sind die Lagerstollen spannungsmässig optimal in Richtung der maximalen horizontalen Spannung in N–S Richtung angelegt worden (Beilage 3-1). Um geringe Beanspruchungen und dadurch wirtschaftliche Einbauten zu erhalten, sind die Anlagenteile mit grösseren Querschnitten, das sind die Lagertunnel LMA-1 und deren Umladestationen sowie der Zentrale Bereich, ebenfalls so ausgerichtet worden. Der etwa mittelgrosse Betriebstunnel und Lagertunnel LMA-2 sowie querschnittsgleiche Bautunnel mussten dann gezwungenermassen felsmechanisch etwas weniger günstig angelegt werden.

Aufgrund ihrer Bedeutung für die Langzeitsicherheit, der Orientierung im Spannungsfeld sowie der Querschnittsgrösse sind für den felsmechanischen Machbarkeitsnachweis die nachstehenden Stollen bzw. Tunnel repräsentativ:

- Lagerstollen BE/HAA, Ausbruchquerschnitt 4.9 m² (keine Einbauten),
- Lagertunnel LMA-1 (Umladestation), Ausbruchquerschnitt 77.7 m² (grosser Querschnitt),
- Betriebstunnel, Ausbruchquerschnitt 26.5 m² (ca. quer zur max. Horizontalspannung).

Bezüglich Vortriebsart ist vorgesehen, die Lagerstollen BE/HAA mit einer Tunnelbohrmaschine aufzufahren und als Sicherungsmittel Anker und Stahlnetze als Arbeitsschutz einzusetzen. Die übrigen Tunnel werden mit einer Teilschnittmaschine oder schonend im Sprengvortrieb, nach Möglichkeit im Vollausschub, aufgefahren und mit Spritzbeton und Ankern gesichert.

Die Spritzbetonqualität soll einem B 35/25 nach SIA-Norm 162 (SIA 1993) mit einer einaxialen Druckfestigkeit von 16 MPa entsprechen und als Sicherheitsfaktoren werden die Werte nach SIA-Norm 162 bzw. V 162.001 (SIA 1992) zur Anwendung gebracht.

Felsanker und Armierung werden in den felsmechanischen Berechnungen und den statischen Nachweisen konservativerweise nicht berücksichtigt.

4.2.1.2 Numerische Modellierung und Berechnung

Die Berechnungen wurden mit dem Code FLAC Version 3.4 (ITASCA 1998) durchgeführt, welcher eine realitätsnahe Modellierung des gekoppelten hydro-mechanischen Verhaltens ermöglicht. Die Berechnungen wurden zweidimensional für den ebenen Dehnungszustand durchgeführt, wobei der Opalinuston als elasto-plastisches, dehnungserweichendes Material mit "verschmierten" Trennflächen modelliert wurde. Mit letzteren wurde die im Vergleich zu den Hohlräumen enge Schichtung berücksichtigt (Nagra 2000).

Als Materialeigenschaften für den Opalinuston wurden die Kennwerte der Tabelle 2.1 eingesetzt.

Im Gegensatz zu den Angaben zu den Gebirgseigenschaften wurde ein E-Modul von 5 GPa in allen Richtungen angenommen, was einem elastisch-isotropen Medium entspricht, weil das verwendete Rechenprogramm elastische Transversalisotropie – also unterschiedliche E-Moduli in verschiedenen Richtungen – nicht berücksichtigt. Da der E-Modul parallel zur Schichtung jedoch 10.5 GPa beträgt, werden die Deformationen vor allem in horizontaler Richtung überzeichnet.

Der Porenwasserdruck von 8 MPa wurde an der Hohlraumwand auf 0 gesetzt, und es wurde kein Wasserfluss zugelassen. Dadurch blieb eine Änderung des Porenwasserdruckes durch Drainage unberücksichtigt. Die Änderung des Porenwasserdruckes infolge der volumetrischen Dehnungen des Gebirges wird jedoch rechnerisch berücksichtigt.

Eine Drainage des Porenwassers in die Hohlräume würde erheblich zum Abbau der Porenwasserdrücke beitragen und so indirekt die Verformungen reduzieren. Im Felslabor Mont Terri (Opalinuston) konnte messtechnisch nachgewiesen werden, dass sich der Porenwasserdruck in der Umgebung der Stollen bereits nach wenigen Tagen stark reduziert (Martin & Lanyon 2002).

Für die Lagerstollen BE/HAA wurden keine Sicherungsmittel modelliert. Bei den anderen Tunneln wurde der Spritzbeton mit an der Tunnelwand angebrachten Stäben berücksichtigt. Die Stäbe wurden nach einer Reduzierung des Stützdruckes von 99.5 % eingebracht. Damit wird auch der geplante Bauvorgang berücksichtigt, nämlich die relativ späte Einbringung und das allmähliche Erhärten des Spritzbetons. Die vorgesehenen Stahlfasern, Armierungsnetze und Anker sind aus der Sicht der Arbeitssicherheit und der konstruktiven Ausbildung erforderlich, werden in den Berechnungen jedoch nicht als statisch wirksam angenommen. Aufgrund des jungen Alters wurde für den Spritzbeton ein E-Modul von 7.5 GPa eingesetzt.

Sowohl für die Materialparameter wie die hydraulischen Annahmen lässt sich feststellen, dass die Berechnungen damit unter konservativen Annahmen durchgeführt wurden.

4.2.1.3 Ergebnisse

Die Maximalwerte der numerischen Berechnungen (Nagra 2000) sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Trotz konservativen Annahmen, welche zwangsläufig zu ungünstigen Ergebnissen führen, kann festgestellt werden, dass aus felsmechanischer Sicht alle Anlagen im Opalinuston gebaut werden können, wobei von besonderer Bedeutung ist, dass die Lagerstollen BE/HAA keine stabilitätsbedingten Einbauten brauchen und mit einem Arbeitsschutz aus Ankern und Netzen auskommen. Die im Felslabor Mont Terri festgestellte erhöhte Standfestigkeit des Opalinustons, welche auf eine gewisse Austrocknung durch Belüftung zurück zu führen ist, bildet in den Lagerstollen eine zusätzliche, nicht berücksichtigte Tragreserve (Martin & Lanyon 2002).

	Rechenmodell	Ausbruch- Querschnitt [m ²]	Spritz- beton [cm]	Moment [kNm]	Normal- kraft [kN]	Querkraft [kN]	max. Verschie- bung [mm]
Lagerstollen BE/HAA	<i>Strain softening</i> und Trennflächen- modell, quasi homogenes Spannungsfeld	4.9	0	kein Einbau	kein Einbau	kein Einbau	24
Lagertunnel LMA 1 (Umlade- station)		77.7	30	25	748	70	78
Betriebstunnel (und Lagertunnel LMA-2)	<i>Strain softening</i> und Trennflächen- modell, hohe Horizontalspan- nungen	26.5	25	20	759	75	142

Tab. 4.1 Resultate der numerischen Berechnungen, maximale Schnittkräfte und Verschiebungen (Nagra 2000)

Die Beanspruchung der Spritzbetonauskleidung wurde im Rahmen einer Vordimensionierung überprüft, wobei die jeweils zusammengehörenden Wertepaare aus Normalkraft und Moment sowie Normalkraft und Querkraft sowie umgekehrt, eingesetzt wurden. Die nach SIA 162 und V 162.001 (SIA 1992, 1993) verlangten Sicherheitswerte können eingehalten werden (Nagra 2000). Die erforderlichen Auskleidungsstärken bewegen sich somit im Rahmen des im Untertagbau Üblichen.

Bei den in Tabelle 4.1 aufgeführten Verschiebungen handelt es sich um Gesamtdeformationen. Etwa in der Größenordnung von 50 % davon sind Vordeformationen, d.h. dass die in den Hohlräumen messbaren Verschiebungen bzw. Konvergenzen weniger als 50 % – realistischweise etwa 30 % bis 40 % – betragen. Ein Verklemmen der TBM in den Lagerstollen BE/HAA kann somit ausgeschlossen werden. Dies auch deshalb, weil diese Deformationen infolge der stollenparallelen, quasi horizontalen Schichtung nur lokal in der Sohle und der Firste auftreten (Fig. 4.1).

Deformationen im Lagertunnel LMA-1 und im Betriebs- und Lagertunnel LMA-2 sowie den übrigen Anlagen im Opalinuston stellen für einen Ausbruch mit Teilschnittmaschine oder konventionell durch Sprengen keine Schwierigkeit dar.

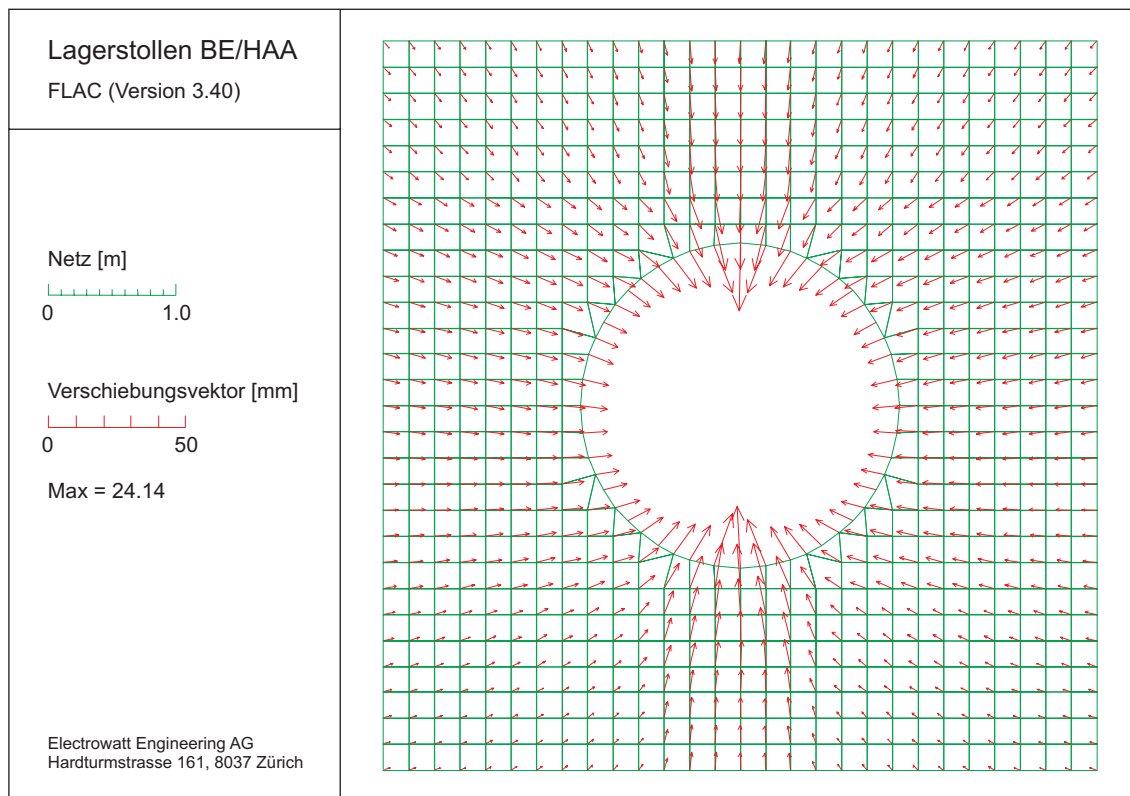


Fig. 4.1 Gesamtdeformationen im Lagerstollen BE/HAA
Die maximale Verschiebung in der Sohle und der Firste inkl. Vordeformation beträgt 24 mm (Nagra 2000)

4.2.1.4 Vergleichsberechnung mit dem Kennlinienverfahren

Für den Lagerstollen BE/HAA wurde eine Abschätzung mit dem Kennlinienverfahren durchgeführt. Dabei sind die Entfestigung des Gebirges beim Bruch und der Überlagerungsdruck berücksichtigt worden. Unberücksichtigt blieben der Einfluss des Porenwasserdruckes und die Anisotropie durch die Schichtung. Mit diesen Annahmen ergab sich eine radiale Gesamtverschiebungen von rund 6 mm, also nur rund 25 % der in Tab. 4.1 aufgeführten 24 mm.

Dies deutet darauf hin, dass die durch numerische Modellierung errechneten Deformationen und Schnittkräfte im Ausbau (Tab. 4.1) eher höher sind als die tatsächlich zu erwartenden, was eine Folge der konservativen Annahmen bei der numerischen Modellierung und anderer Randbedingungen, wie der Porenwasserdrücke ist.

4.2.2 Ausführungstechnische Besonderheiten

4.2.2.1 Schichtparalleler Ausbruch

Aus Gründen der Langzeitsicherheit sollten die Abfälle möglichst in der Mittelebene der Wirtgesteinsformation eingelagert werden. Diese Forderung ist mit dem Layout des Referenzprojektes durch eine schichtparallele Anordnung der Lagerstollen und damit auch der Haupttunnel in der Mittelebene des Opalinustons in idealer Weise erfüllt.

Bei der baulichen Realisierung ist jedoch zu beachten, dass ein schichtparalleler Vortrieb verlangt, dass die Firste in allen Stollen und Tunneln *zwingend* mit Felsankern und Netzen oder Spritzbeton gesichert werden müssen, um die Arbeitssicherheit zu gewährleisten. Niederbrüche flach einfallender Schichten – im Untertagbau unter der Bezeichnung "Sargdeckel" bekannt – müssen vermieden werden.

4.2.2.2 Plazierung der baulichen Anlagen der Lagerzone

Mit den ausgewerteten Unterlagen der umfangreichen geophysikalischen Aufnahmen im Zürcher Weinland (Birkhäuser et al. 2001), wie sie z.B. in der Isohypsenkarte der Wirtgesteinsmittelebene in Fig. 3.17 dargestellt sind, werden die seitlichen Grenzen für die Plazierung der baulichen Anlagen der Lagerzone aus heutiger geologischer Sicht festgelegt. Ist die Lage in der Horizontalen bestimmt, muss die Höhenlage der einzelnen Anlagenteile so festgelegt werden, dass die Lagerstollen möglichst in der Wirtgesteinsmittelebene zu liegen kommen. Dazu muss

- die Geometrie, insbesondere die obere und untere Begrenzungsfläche des Opalinustons möglichst genau bekannt sein. Im weiteren muss sichergestellt sein, dass
- die Bauausführung der Tunnel und Stollen gemäss Planvorgabe erfolgt.

Der Verlauf der oberen und unteren Begrenzung des Opalinustons ist bereits heute auf wenige Meter genau bekannt (Birkhäuser et al. 2001). Weitere Informationen werden evtl. zusätzliche Sondierbohrungen, dann aber der Bau des Zugangstunnels sowie weitere seismische Aufnahmen aus dem über der zukünftigen Lagerzone geplanten Zugangstunnel (Fig. 3.1) und Messungen aus dem Testlager (Felslabor) liefern. Mit diesen Informationen werden primär die Achsen des Betriebs- und des Bautunnels, sekundär die Lagerstollen BE/HAA und weiteren Anlagenteile festgelegt. Der zentimetergenaue Vortrieb der Tunnel und Stollen bereitet keine Schwierigkeiten. Die effektive Lage des Betriebs- und Bautunnels bzw. der Verlauf der oberen und unteren Wirtgesteinsbegrenzung entlang der Tunnel wird voraussichtlich bereits während des Vortriebs, spätestens jedoch nach Abschluss desselben bestimmt.

4.2.2.3 Baumassnahmen im quellfähigen Opalinuston

In der bis weit ins 19. Jahrhundert zurückreichenden Tunnelbautätigkeit wurden in der Schweiz eine grosse Anzahl verschiedenster Untertagbauten realisiert (Tab. 4.2), wobei beim Bau Schwierigkeiten unterschiedlichster Art überwunden werden mussten und im Verlaufe der Nutzung unterschiedliche Erfahrungen im Bezug auf das Bauwerksverhalten gemacht wurden. Im Bezug auf den Opalinuston sind die Probleme im Zusammenhang mit dem beachtlichen Quellpotential zu erwähnen, wo z.T. bereits während der Bauausführung, oft aber im Laufe der Zeit Schäden durch aufwendige Sanierungsarbeiten behoben werden mussten, wie z.B. im Bözbergtunnel, Heitersberg- und Belchentunnel, (z.B. Amstad & Kovari 2001).

Kategorie	Anzahl	Gesamtlänge in km	Gesamtes Ausbruchvolumen in Mio m ³
Eisenbahntunnel	539	392	19.97
Strassentunnel	314	322	24.42
Wasserstollen	256	776	8.02
Sonstige	77	124	1.32
Total	1186	1614	53.73

Tab. 4.2 Am 1.1.2001 in der Schweiz in Betrieb stehende Tunnel und Stollen (Egger 2001)

Generell gelten der Opalinuston, der Gipskeuper und die Anhydritgruppe des Mittleren Muschelkalks als quelfähig. Weil der Gipskeuper und die Anhydritformationen unterhalb dem Lagerniveau liegen, wird im folgenden nur der Opalinuston betrachtet.

Amstad und Kovari beschäftigen sich in (Amstad & Kovari 2001) eingehend mit dem Phänomen der Quellung im Untertagbau und kommen aufgrund von Auswertungen von Erfahrungen mit dem Bau und Betrieb einer umfangreichen und repräsentativen Anzahl von Untertagbauten in tonhaltigem Fels zu nachstehenden, stark gekürzten und zusammenfassend wiedergegebenen Erkenntnissen:

- Quellerscheinungen werden dann beobachtet, wenn *Wasser* quelfähige Gesteine erreichen kann.
- Beobachtungen und Feldmessungen zeigen, dass vorwiegend der *Sohlbereich* vom Quellen erfasst wird.
- Bei hufeisenförmigen Hohlräumen werden die grössten *Sohlhebungen* in Sohlmitte beobachtet. Diese nehmen mit zunehmender Sohlbreite zu.
- Wo quelfähiges Gestein in Kontakt mit feuchter Tunnelluft steht, sind in tonigen Gesteinen oft oberflächennahe *Verwitterungserscheinungen* zu beobachten.
- Die Wasseraufnahme ist in der Regel mit einer *Gebirgsentfestigung* verbunden, welche bis zu einem völligen Festigkeitsverlust führen kann.

Aus diesen Beobachtungen folgt klar, dass Quellvorgänge nur dann möglich sind, wenn Wasser den Zutritt zur Formation schafft; oder anders ausgedrückt: *Kein Wasser, kein Quellen!*

Daher gilt es, möglichst jeden Kontakt von Wasser mit dem Opalinuston zu vermeiden. Das kann erreicht werden durch Vermeidung von Wasserzutritten in die quelfähige Formation oder durch Schutz derselben vor Wasserkontakt oder beidem. Um entsprechende Massnahmen zu treffen, ist die Herkunft des Wassers von Bedeutung.

Bei der Herkunft des Wassers kann unterschieden werden zwischen Bergwasser, Brauchwasser und Meteorwasser.

Folgende Massnahmen sind geplant:

- Die extrem geringen *Bergwasserzutritte* aus dem anstehenden Fels (Opalinuston) werden durch die Baulüftung und bei den Lagerstollen BE/HAA ebenfalls durch die Betriebslüftung ausgetragen; der Fels wird ausgetrocknet. Zur Unterbindung der *Wasserlängsläufigkeit* in

der Zugangsrampe sind scheibenförmige Ausweitungen in der Sohle und den Wänden geplant, wo längsströmendes Wasser aufgefangen und in die nächste Pumpstation abgeleitet werden soll. Eine erste solche Scheibe könnte z.B. bereits in den Effinger Schichten eingebaut werden. Aus Stabilitätsgründen könnten diese Schlitze bei Bedarf mit Sickerbeton oder Kies/Sand gefüllt werden. Solche Scheiben sind ebenfalls im Lüftungsschacht vorgesehen.

- Die Verwendung von *Brauchwasser* bei der Erstellung der Anlagen im Opalinuston wird sehr restriktiv gehandhabt. Diverse diesbezügliche Erfahrungen – auch aus dem Felslabor Mont Terri – liegen bereits vor, und weitere technische Entwicklungen in dieser Richtung sind in nächster Zeit zu erwarten (Amstad & Kovari 2001).

Im Einlagerungsbetrieb wird das im Zentralen Bereich für sanitäre Bedürfnisse benötigte Brauchwasser periodisch mit Tankwagen angeliefert und ebenso wieder entsorgt (Kap. 3.4.4).

- Das Eindringen von *Meteorwasser* via Zugangstunnel oder via Schacht wird durch flutungssichere Platzierung des Tunnelportales und des Schachtkopfes verhindert (Kap. 3.2.1) und die Lüftung der Lageranlage wird so ausgelegt, dass weder im Sommer noch im Winter Feuchtigkeit in die Lagerzone eingebracht, sondern immer Feuchtigkeit entnommen wird.

4.2.2.4 Ausbruch und Felssicherung

Die *Lagerstollen HAA/BE* werden mit einer Tunnelbohrmaschine (Fig. 4.2) vom Bautunnel her aufgeföhren und Niederbrüche werden mit Felsankern und Netzen vermieden. Als Anker sind Stahl- oder Kunststoffanker vorgesehen. Sowohl der Vortrieb wie das Bohren der Anker erfolgen ohne oder mit minimalem Wassereinsatz (pastöses Bohren für Anker, Amstad & Kovari 2001). Die Entstehung von Staub wird möglichst vermieden und/oder evtl. Staub am Entstehungsort abgesaugt und die Luft vor der Rückgabe in offene Tunnelquerschnitte oder der Abgabe an die Umgebung über entsprechende Filter geführt (Fig. 3.5).



Fig. 4.2 Tunnelbohrmaschine wie sie z.B. zur Erstellung des FEBEX-Teststollens im Felslabor Grimsel eingesetzt wurde; Ausbruchdurchmesser 2.30 m

Alle übrigen Tunnel und Anlagen im Opalinuston werden mit Teilschnittmaschinen (Fig. 4.3), evtl. im gebirgsschonenden Sprengverfahren vorgetrieben (Fig. 4.4). Die Felssicherung erfolgt mit Ankern und faserverarmtem Spritzbeton. Für die Anker sind auch hier Stahl- oder Kunststoffanker geplant. Werden als Armierung Stahlfasern eingesetzt, wird eine unarmierte Deckschicht am Schluss aufgebracht. Bei Verwendung von Kunststofffasern ist dies nicht nötig. Durch mehrschichtigen Auftrag wird die im entsprechenden Bauteil notwendige Auskleidungsstärke bis ca. 50 m hinter der Tunnelbrust erreicht. Eine erste Spritzbetonschicht wird unmittelbar nach dem Ausbruch als Arbeitsschutz angebracht. Der Ausbau erfolgt überall einschalig. Bezüglich Wassereinsatz und Staubbekämpfung gilt dasselbe wie für die Lagerstollen BE/HAA.



Fig. 4.3 Teilschnittmaschine mit Längs- und Querschneidkopf wie sie z.B. im Opalinuston des Felslabors Mont Terri eingesetzt wurde



Fig. 4.4 Bohrjumbo zum Bohren der Löcher im Sprengvortrieb

4.3 Überliegende Schichten

4.3.1 Allgemeines

Zur Erschliessung der Lagerzone müssen als überliegende Schichten die Lockergesteine des Quartärs und als Festgesteine die Untere Süsswassermolasse inkl. Bohnerz-Formation, der Obere und Untere Malm sowie der Obere und Mittlere Dogger durchfahren werden (Kap. 2.3.2.2, Fig.2.4, Beilage 3-2).

Portal und Schachtkopf werden nach Möglichkeit in ein Gebiet gelegt, wo die Lockergesteinsüberdeckung gering ist und welches nicht überflutet werden kann. Diese Bauabschnitte werden in offener Baugrube erstellt und durch entsprechende Abschlüsse gesichert.

Die Festgesteinsformationen sind standfest und bieten stabilitätsmässig kaum Schwierigkeiten. Weil sie z.T. wasserführend sind, muss dieser Aspekt besonders beachtet werden.

4.3.2 Zugangstunnel

In der Unteren Süsswassermolasse sind lokal erhöhte Durchlässigkeiten zu erwarten und im Oberen Malm wird das Risiko, karstbedingte Wassereinbrüche anzufahren, als mittel bis hoch eingestuft (Beilage 2-1). Es wird deshalb von einem mechanischen Auffahren des Zugangstunnels abgesehen und ein konventioneller Sprengvortrieb, allenfalls ein Vortrieb mit Teilschnittmaschine bevorzugt, welcher unvohergesehene Situationen besser meistern lässt. Um das Risiko eines unerwarteten Wassereinbruchs zu minimieren, werden systematisch Vorauserkundungsbohrungen ausgeführt. Wo mit Wasserzutritten gerechnet werden muss, sind von der Tunnelbrust aus 30 m bis 50 m lange, schirmartig nach aussen gerichtete Injektionsbohrungen geplant. Als Injektionsgut ist Zement, allenfalls mit Zusätzen oder chemische Mittel vorgesehen. Ist die Zone durchfahren, werden radiale Ergänzungsinjektionen ausgeführt, mit welchen die Wasserzutritte in den Tunnel minimiert werden sollen. Nicht verdrängbares Bergwasser wird gefasst und in einer Drainage der Pumpstation zugeführt, von wo es an die Oberfläche gefördert wird.

Im Bereich der wasserführenden Schichten ist ein zweischaliger Einbau mit zwischenliegender Wasserisolation vorgesehen. Die Ausbruchsicherung erfolgt, wie im Untertagbau meist üblich, durch Felsanker und armierten Spritzbeton, wobei die Ankerdichte und die Betonstärke auf die geologischen Verhältnisse und die Tiefenlage abgestimmt werden. Das Innengewölbe ist in geschaltem, hochwertigem Ortbeton vorgesehen und die Sohle wird ebenfalls in Ortbeton ausgeführt.

In nicht wasserführenden Schichten ist ein einschaliger Ausbau mit Spritzbeton geplant, wobei beim Einsatz von Stahlfaserarmierungen eine Deckschicht ohne Fasern angebracht wird. Auch beim einschaligen Ausbau werden Anker und Gewölbestärke auf die geologischen Verhältnisse sowie die Tiefenlage abgestimmt. Spritzbeton wird in Schichten aufgebracht, die erste Schicht unmittelbar nach dem Ausbruch als Arbeitsschutz, die übrigen etappenweise bis ca. 50 m hinter der Tunnelbrust.

Die Baulüftung erfolgt blasend, d.h. die Frischluft wird in Lutten zum Arbeitsort geführt und als Abluft im Tunnelquerschnitt zum Portal geleitet.

4.3.3 Schacht

Sobald der Bautunnel den Schachtfuss erreicht hat, wird von der Oberfläche aus in der Schachtachse eine Pilotbohrung abgeteuft. Wasserzuflüsse werden sorgfältig beobachtet und gezielt ausinjiziert. Ist die Bohrung erstellt, wird der Schacht mit einer Raisebohrmaschine aufgefahren, und wasserführende Stellen werden zur Minimierung des Wasseranfalls nachinjiziert. Nicht verdrängbares Wasser wird wie im Zugangstunnel gefasst und durch eine Drainage der Pumpanlage zugeführt.

Als Felssicherung und Auskleidung ist in den dichten, kompakten Formationen eine einschalige Betonkonstruktion mit Felsankern vorgesehen und in den wasserführenden Schichten ein zweischaliger Ausbau mit Wasserisolation.

Sollte sich z.B. nach dem Abteufen der Pilotbohrung das Auffahren des Schachtes im Raisebohrverfahren als zu riskant erweisen, kann der Schacht konventionell im Sprengverfahren von oben nach unten mit entsprechenden Vorausböhrungen erstellt werden.

Die bauphysikalische Erschließung erfolgt beim Raiseboring über den Zugangs- und Bautunnel, beim evtl. konventionellen Abteufen von oben über den Schachtkopf.

4.4 Realisierung des geologischen Tiefenlagers

4.4.1 Bauetappen und Generelles Bauprogramm

4.4.1.1 Realisierungsphasen

Für die Realisierung, den Betrieb und den Verschluss der Lageranlage sind, nachdem der Standort bestimmt und die Untersuchungen von der Oberfläche abgeschlossen sind, die nachstehenden Schritte geplant:

- Exploration unter Tage – Bauetappe 1,
- Bau der Lageranlage – Bauetappe 2,
- Einlagerungsbetrieb und Lagererweiterung – Lagerbetrieb und Bauetappe 3,
- Überwachung und Verschluss des Hauptlagers,
- Überwachung des Pilotlagers sowie
- Verschluss der Gesamtanlage.

Die zu realisierenden Anlagen sowie der geschätzte Zeitaufwand für die einzelnen Schritte werden nachstehend beschrieben.

4.4.1.2 Exploration unter Tag – Bauetappe 1

Zur *Exploration unter Tage* ist der Bau und Betrieb eines Testlagers (Felslabor) geplant, bei welchem Testnischen, Kurzstollen und sonstige Testanlagen im Bereich der Mittelebene des Opalinustons auf geplanter Lagertiefe und somit an repräsentativer Stelle des Wirtgesteins gebaut werden sollen. Dazu wird der Zugangstunnel bis zur Abzweigung Bau erstellt und die Testzone durch den Bauzugang erschlossen (Fig. 4.5). Beim Übergang in dichte Schichten sowie am tiefsten Punkt der Anlage sind Pumpstationen vorgesehen.

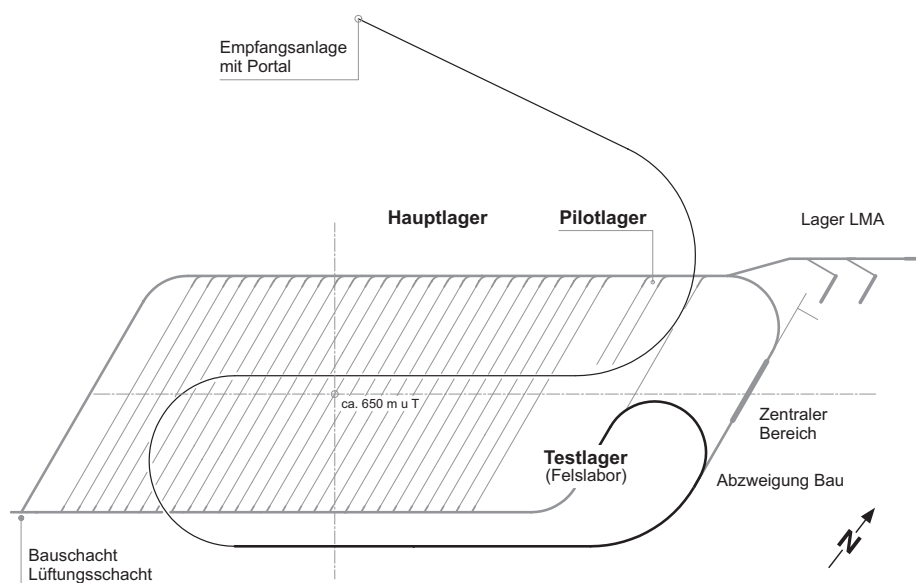


Fig. 4.5 Exploration unter Tage – Bauetappe 1

Nach einer ca. halbjährigen Erschliessungs- und Installationszeit wird der Zeitaufwand für die Bauarbeiten inkl. Innengewölbe und Räumung durch den Unternehmer auf ca. 6 Jahre geschätzt (Beilage 4-1). Diese relativ lange Bauzeit ist einerseits durch den fallenden Vortrieb, andererseits durch die Unmöglichkeit eines Zwischenangriffs bedingt.

Wissenschaftliche Messungen und Experimente werden bereits im Zugangstunnel, später auch im Testlager (Felslabor) durchgeführt. Das Testlager (Felslabor) ist so angelegt, dass es auch während des Lagerbaus, dem Einlagerungsbetrieb und bis zum Verschluss der Gesamtanlage zugänglich bleibt und somit auch Langzeitexperimente durchgeführt und betreut werden können. Aus diesem Grund gibt es für den Testlager(Felslabor)-Betrieb keinen genauer definierten Zeitabschnitt.

4.4.1.3 Bau der Lageranlage – Bauetappe 2

Im Betriebskonzept für das geologische Tiefenlager – dieses wird in Kap. 5.1 detaillierter beschrieben – ist vorgesehen, zu Beginn der Einlagerung mit der Beschickung des Pilotlagers und dem Lagerteil LMA zu beginnen und diese abzuschliessen, bevor die Einlagerung in den Lagerstollen BE/HAA aufgenommen wird. Beim *Bau der Lageranlage* müssen somit alle Anlagenteile und technischen Ausrüstungen erstellt bzw. installiert sein, die zur Einlagerung von BE/HAA im Pilotlager sowie von LMA benötigt werden. Es sind dies (Fig. 4.6 und 3.1, Beilage 3-1):

- Anlagen über Tag, d.h. Aussenanlagen der Portalzone und im Schachtkopfbereich, beide inkl. vollständiger Erschliessung (Portalzone mit Bahnanschluss),
- Bautunnel, Materialumschlag Bau sowie Lüftungs-/Bauschacht, Pumpstation und Ansatzstellen für die TBM bei den Lagerstollen,
- Zugangstunnel zum Zentralen Bereich, Zentraler Bereich, Betriebszugang, Betriebstunnel BE/HAA und LMA sowie Lüftungstunnel, Abzweiger und Schleusen BE/HAA,
- Pilotlager und Lagerteil LMA komplett inkl. Kontrollstollen.

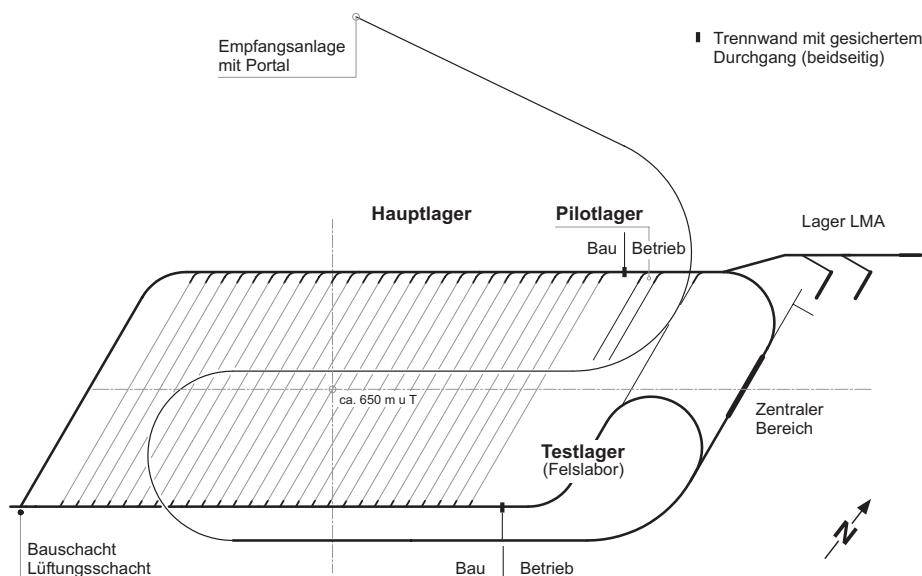


Fig. 4.6 Bau der Lageranlage – Situation am Schluss der Bauetappe 2

Nach ca. einem halben Jahr für die ergänzende Erschliessung und Installation der verschiedenen Unternehmer wird der Zeitbedarf für diese Bauetappe 2 – den eigentlichen Lagerbau – auf ca. 4 Jahre geschätzt. Wie aus Beilage 4-1 ersichtlich, wird an verschiedenen Orten gleichzeitig gearbeitet, sodass sich diese arbeitsintensive Etappe in relativ kurzer Zeit realisieren lässt.

4.4.1.4 Einlagerungsbetrieb und Lagererweiterung – Lagerbetrieb und Bauetappe 3

Während der Einlagerung im Pilotlager und den Lagertunneln LMA erfolgt gleichzeitig der Bau der ersten Lagerstollen BE/HAA im Hauptlager. Die beiden Bereiche sind durch Abschlüsse im Bau- und Betriebstunnel klar von einander getrennt und via Rampe für den Betrieb und via Bau- bzw. Lüftungsschacht für den Bau zugänglich. Die Abschlüsse sind in der Form von Gittertoren vorgesehen und gesichert. Sie können jedoch im Notfall sowohl von der Betriebs- wie Bauseite her geöffnet werden.

Aus sicherheitstechnischen Gründen werden keine Lagerstollen BE/HAA auf Vorrat erstellt. Dies bedingt ein auf den Einlagerungsbetrieb abgestimmtes und während des Einlagerungsbetriebs zu erfolgendes Auffahren dieser Stollen. Die *Bauetappe 3* erfolgt somit nicht nur zeitgleich sondern auch abgestimmt auf den *Einlagerungsbetrieb* (Fig. 4.7).

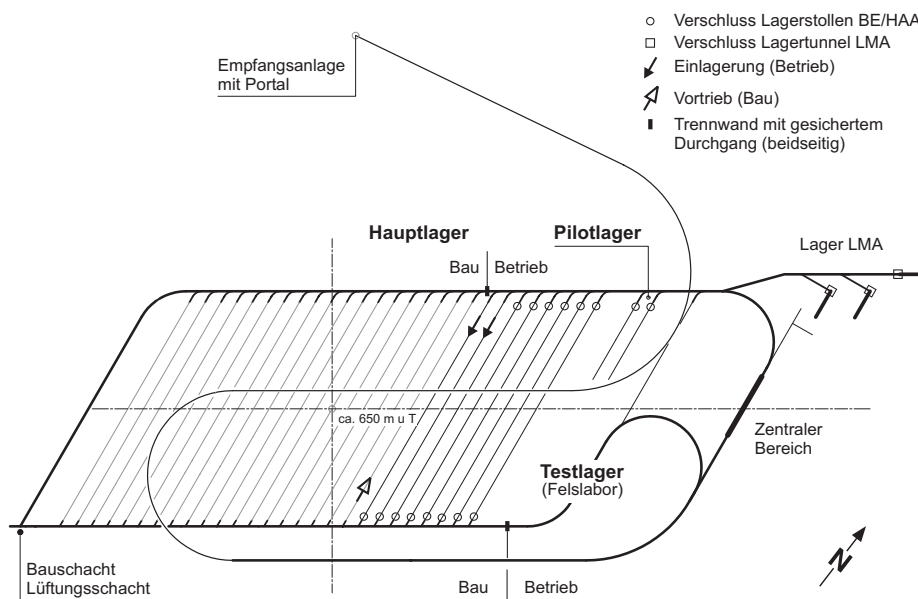


Fig. 4.7 Einlagerungsbetrieb und Lagererweiterung – Lagerbetrieb und Bauetappe 3

Einlagerungsbereite, bauseitig verschlossene Lagerstollen BE/HAA werden durch den Betrieb übernommen. Dazu wird der Betriebsbereich durch Verschieben des Abschlusses im Betriebstunnel entsprechend vergrößert und dadurch der Zugang zum neu erstellten Lagerstollen von der Betriebsseite her freigegeben.

Wie in Kap. 5 gezeigt wird, wird der Zeitaufwand zur Beschickung des Pilotlagers und des Lagerteils LMA auf ca. 2 Jahre, der Lagerstollen BE/HAA inkl. Reserve auf ca. 15 Jahre geschätzt. Bei 27 Stollen werden somit pro Jahr ca. 2 Lagerstollen BE/HAA zu erstellen sein. Der Vortrieb erfolgt steigend vom Bautunnel zum Betriebstunnel. Das Umsetzen der TBM zum nächsten Stollen kann durch Zurückziehen oder Rücktransport via Lüftungstunnel erfolgen.

Eine thermische Beeinflussung offener Lagerstollen aus den bereits befüllten Stollen ist in der kurzen Zeit der Stollenerstellung und Stollenbeschickung nicht zu erwarten.

4.4.1.5 Überwachung und Verschluss des Hauptlagers

Während der *Überwachung und dem Verschluss des Hauptlagers* sind die Abfälle eingelagert, die Resthohlräume verfüllt und die Lagerstollen BE/HAA und Lagertunnel LMA an ihren Enden verschlossen. Schacht und Zugangsrampe sowie die Haupttunnel sind zugänglich bis zum Entscheid, das Hauptlager zu verschliessen. Die Lüftung muss, wenn auch reduziert, weiterbetrieben werden. Ebenso sind in dieser Phase die Wartungsarbeiten weiterhin auszuführen und die Drainage(n) zu unterhalten und die Pumpanlage(n) zu betreiben.

Beim Verschluss des Hauptlagers werden der Betriebstunnel BE/HAA sowie LMA, der Lüftungs- und Bautunnel sowie der Lüftungsschacht verschlossen. Die Anlagen im Schachtkopfbereich werden demontiert und das Grundstück rekultiviert. Weitere Angaben dazu siehe Kap. 8.

4.4.1.6 Überwachung des Pilotlagers

Die *Überwachung des Pilotlagers* beginnt, sobald es die baulichen Verhältnisse unter Tag zulassen, was etwa nach Erstellung des Kontrollstollens BE/HAA der Fall sein dürfte und wird fortgesetzt, bis der Verschluss des Tiefenlagers beschlossen und behördlich bewilligt ist. Zeitlich lässt sich diese Phase nicht abschätzen. Sie wird voraussichtlich mehrere Jahrzehnte dauern. In der Überwachungsphase muss die Lüftung, wenn auch reduziert, weiterbetrieben werden. Ebenso sind die Wartungsarbeiten weiterhin auszuführen und insbesondere die Drainage zu unterhalten und die Pumpanlage(n) zu betreiben.

4.4.1.7 Verschluss der Gesamtanlage

Wird der Entscheid zum *Verschluss der Gesamtanlage* getroffen, werden alle technischen Einrichtungen und Installationen demontiert und entsorgt. Im Bereich des Opalinustons werden die noch offenen Tunnel mit Sand/Bentonit verfüllt und zur Verfüllung der Zugangsrampe in den überliegenden Schichten ist der Einsatz von Opalinuston vorgesehen. Gebäude, Zufahrten, Leitungen etc. im Portalbereich werden abgebrochen bzw. entfernt und das Grundstück wieder seiner ursprünglichen Nutzung zugeführt. Weitere Angaben dazu siehe Kap. 8.

4.4.2 Bauinstallationen

Die schrittweise Realisierung eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA, wie dies im vorherigen Kapitel dargelegt wurde, erfordert Bauinstallationen in den drei Bauetappen, beim Verschluss des Hauptlagers und beim Verschluss der Gesamtanlage. Diese können grob wie folgt charakterisiert werden:

- In der Bauetappe 1, der Explorationsphase, wird von der Portalzone der Zugangstunnel vorgetrieben und das Testlager (Felslabor) gebaut. Die dazu notwendigen Installationen dürften mit einem Landbedarf von ca. 1 ha^{*)} bis 2 ha auskommen und der Personalbestand dürfte in der Grössenordnung von ca. 20 bis 25 Personen liegen. Als Elektroanschluss

^{*)} 1 ha = 1 Hektare = 100 m x 100 m = 10'000 m²

sollten ca. 2'000 kVA bis 3'000 kVA genügen und der Wasseranschluss sollte für eine Tagesmenge von ca. 40 m³ bis 50 m³ ausgelegt sein.

- In der Bauetappe 2, dem eigentlichen Bau der Anlage, wird an verschiedenen Stellen unter Tage, an den Aussenanlagen im Portalbereich sowie beim Schachtkopf gearbeitet. In dieser Phase wird für die Bauinstallationen am meisten Platz gebraucht, weil verschiedene Unternehmer z.T. gleichzeitig vor Ort sind. Der Platzbedarf im Portalbereich wird auf ca. 5 ha bis 6 ha, im Schachtkopfbereich auf ca. 1 ha bis 2 ha geschätzt, eingerechnet jeweils der Platzbedarf für die oberirdischen Bauwerke für den Einlagerungsbetrieb. Insgesamt ist mit einem Personalbestand von ca. 100 bis 120 Personen zu rechnen. Als Elektroanschluss für die Portalzone sollten ca. 4'000 kVA bis 6'000 kVA genügen und der Wasseranschluss sollte für eine Tagesmenge von ca. 100 m³ bis 120 m³ ausgelegt sein.
- Die Bauetappe 3 läuft parallel zum Einlagerungsbetrieb. Es werden die Lagerstollen des Hauptlagers erstellt, wobei der Bauzugang über den Lüftungs- und Bauschacht erfolgt. Bauinstallationen befinden sich somit nur im Bereich des Schachtkopfes, wo der Platzbedarf etwa 1 ha betragen dürfte (Fig. 3.4). Der Elektroanschlusswert beträgt ca. 3'000 kVA. Als Wasserverbrauch werden etwa 10 m³ bis 15 m³ pro Tag geschätzt und der Personalbestand auf ca. 8 bis 12 Personen.
- Für den Verschluss des Hauptlagers sowie der Gesamtanlage werden ebenfalls Installationen benötigt. Diese werden jedoch im Vergleich zur Bauetappe 2 bedeutend kleiner. Konkretere Angaben dazu sind Gegenstand zukünftiger Planungsarbeiten.

4.4.3 Transporte und Deponien

Beim Bau der Lageranlage sind es vor allem die Anlagenteile unter Tag, welche das Gros der Transporte bedingen. Dies deshalb, weil dort die Massengüter Ausbruchmaterial und Beton anfallen. Um die Grössenordnung der zu erwartenden Transporte abzuschätzen, wurden je Bauetappe die diesbezüglichen Mengen ermittelt (Tabelle 4.3).

	Vortriebsdauer	ca. Ausbruch (lose)			ca. Beton (Kies, Zement)		
	ca.	m ³	m ³ pro Tag	Lastwagen pro Tag	m ³	m ³ pro Tag	Lastwagen pro Tag
Bauetappe 1 (Zugang, Felslabor)	5 Jahre à 220 AT	420'000	380	30	90'000	80	7
Bauetappe 2 (Lagerbau)	3 Jahre à 220 AT	400'000	610	50	63'000	95	8
Bauetappe 3 (Lagerstollen Hauptlager)	15 Jahre à 220 AT	195'000	60	5	2'900	1	0.1

Bemerkungen: Beim Ausbruch sind 10 % für Überprofil und ein Auflockerungsfaktor von 1.7 berücksichtigt
 Beim Beton sind 20 % für Überprofil und Rückprall eingerechnet
 Die Lademenge pro Lastwagen wurde beim Ausbruch und beim Beton zu je 12 m³ eingesetzt

Tab. 4.3 Transporte von Ausbruchmaterial und Beton für Untertageanlagen in den Bauetappen 1, 2 und 3 (Mittelwerte)

Obwohl zu diesen Transporten noch Personentransporte für die Baumannschaft sowie weitere Transporte wie z.B. für Armierungen oder Felsanker, sowie für den Bau der Aussenanlagen dazukommen, ist das durch den Bau eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA verursachte Verkehrsaufkommen als gering zu bezeichnen.

Die Abschätzung in Tabelle 4.3 zeigt, dass in der Bauetappe 1, der Explorationsphase, mit ca. 420'000 m³ (lose) zwar die grösste Materialmenge verschoben werden muss, erwartungsgemäss aber in der kürzeren Bauetappe 2, dem eigentlichen Lagerbau, mit ca. 50–60 Lastwagen pro Tag die meisten Transporte pro Zeiteinheit im Portalbereich anfallen. In der Bauetappe 3 ist die zu verschiebende Materialmenge gering und das bauinduzierte Verkehrsaufkommen sehr gering; die Transporte erfolgen in dieser Etappe zudem im Schachtkopfbereich. Der Portalbereich ist in dieser Zeit für den Betrieb reserviert (Kap. 5.3.1).

Die ermittelten Transportfrequenzen basieren auf Lastwagen mit einer Zuladung von 12 m³. Für diese Schätzung wurde der Strassentransport gewählt, weil dieser überall machbar ist und im Vergleich zu anderen Möglichkeiten, konservative (hohe) Frequenzwerte ergibt. Als reelle Alternative für den Abtransport von Ausbruchmaterial bietet sich, bei nicht allzu langen Transportdistanzen, der Einsatz von Förderbändern an. Der Bahntransport ist nur zu empfehlen, wenn die Deponieorte bahntechnisch erschlossen sind. Für den Antransport von Beton bzw. Kies und Zement ist bei vorhandenem Bahnanschluss ein Schienentransport z.B. für Zement, evtl. auch für Kies denkbar, wenn beim Absender ein entsprechender Anschluss besteht.

Gemäss Tabelle 4.3 ist ein Ausbruchvolumen von insgesamt ca. 1'000'000 m³ lose, (ca. 550'000 m³ fest) einer Deponie zuzuführen. In diesem Wert ist das Überprofil mit 10 % und die Auflockerung mit einem Faktor 1.7 berücksichtigt. Als Deponiemöglichkeit bieten sich diverse, im Zürcher Unterland vorhandene Kiesabbaugebiete an, wo das Gros des Ausbruchmaterials eingebracht und damit ein Beitrag zur Renaturierung solcher Anlagen erbracht werden könnte. Der zur späteren Verfüllung des Zugangstunnels benötigte Opalinuston von ca. 130'000 m³ (fest) ist in einer geschützten Deponie einzubringen.

4.5 Bautechnische Sicherheitsaspekte

4.5.1 Arbeitssicherheit

Zur Sicherstellung der Arbeitssicherheit im Untertagbau wird vor allem auf eine strikte Einhaltung der diesbezüglich relevanten SUVA-Richtlinien Wert gelegt.

Weil für den Schachtbau keine diesbezüglichen Vorgaben existieren, gelangt die

- Bergverordnung des Landesoberbergamtes Nordrhein-Westfalen für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS) vom 20. Juli 1977 sowie die dazugehörige Richtlinie Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS)

zur Anwendung.

4.5.2 Wassereinbruch

Wassereinbrüche in fallenden Vortrieben, jedoch auch im Schachtbau bedeuten eine Gefährdung für Personen und Gerätschaften und sind deshalb absolut unerwünscht. Es gelangen deshalb bei der Erstellung der Lageranlage die in Kap. 4.3 beschriebenen Massnahmen zur

Anwendung. Für die während des Einlagerungsbetriebs getroffenen Vorkehrungen und Überlegungen zur Wasserhaltung wird auf die Ausführungen im Kap. 3.4.3 verwiesen.

4.5.3 Gasvorkommen

Obwohl in der Bohrung Benken, mit welcher die geologische Situation in der vorgegebenen Standortregion charakterisiert wird, kein Permokarbon angetroffen wurde und nur unbedeutende Gasaustritte registriert wurden, können grössere Austritte nicht ausgeschlossen werden. Es werden deshalb von Anbeginn an die im Untertag- und Bergbau üblichen Schutzvorkehrungen getroffen.

4.5.4 Niederbrüche

Niederbrüche können möglicherweise in den schichtparallelen Vortrieben der Stollen und Tunnel der Lagerzone im Opalinuston eintreten. Nicht auszuschliessen sind sie aber auch in der Rampe, wo die Schichten auch relativ flach einfallen. Als Sicherungsmassnahme sind in den Lagerstollen Anker und Netze, in allen übrigen Anlagen eine erste Spritzbetonschicht als Arbeitsschutz, dann Anker und weitere Spritzbetonschichten vorgesehen.

4.5.5 Querschnittsdeformationen

Querschnittsdeformationen können beim mechanischen Vortrieb problematisch werden, wenn sie so gross werden, dass ein Verklemmen des Bohrkopfes bei der TBM erfolgt. Beim Sprengvortrieb oder beim Ausbruch mit Teilschnittmaschinen ist dieser Aspekt nicht relevant. Entsprechende Überprofile können ohne Schwierigkeiten in den Vortrieb integriert oder noch nachträglich lokal ausgeführt werden. Ein Nachprofilieren über längere Strecken ist (sehr) aufwendig und deshalb nicht zu empfehlen.

Somit ist nur der Ausbruch der Lagerstollen BE/HAA, welche als einzige mit einer TBM aufgefahren werden, genauer zu untersuchen. Dies ist im Kap. 4.2.1 gemacht worden. Die berechneten, lokal auftretenden Gesamtdeformationen betragen lediglich 24 mm oder weniger und stellen sich zudem zum grössten Teil durch Spannungsumlagerungen bereits vor der Tunnelbrust ein. Die im Zentimeterbereich erwarteten Restdeformationen sind ausführungstechnisch nicht relevant. Sie sind mit entsprechenden Vorkehrungen am Bohrkopf der TBM problemlos beherrschbar.

4.6 Optionen – Bautechnische Machbarkeit

4.6.1 Parameterstudien Lagerstollen BE/HAA

Zur Abschätzung des Langzeitverhaltens der Lagerstollen BE/HAA (Langzeitsicherheitsanalyse) sind felsmechanische Untersuchungen der Auflockerungszone EDZ (*excavation damaged zone*) in der Form von Modellrechnungen auch für den Betriebszustand der Stollen durchgeführt worden (Konietzki et al. 2003). Auf Grund der Relevanz und Aussagesicherheit wurde von den massgebenden Parametern jene bestimmt, für welche eine Parametervariation durchgeführt werden soll (Tab. 4.4). Unter Relevanz wird der Einfluss, unter Aussagesicherheit die Güte bzw. Belastbarkeit eines verwendeten Parameters verstanden. Da die ersten (hydro-mechanisch) vollständig gekoppelten Berechnungen zeigten, dass die Entwicklung der Auflockerungszone und der grösste Teil der Konvergenz in der initialen Phase des Ausbruchs, d.h. vor dem Einsetzen der ausbruchsbedingten Drainage in den Stollen zu erwarten sind, wurden für die Parametervariationen nur diese elasto-plastischen Deformationen berechnet und verglichen.

Parameter	Relevanz 1: <i>niedrig</i> 5: <i>hoch</i>	Aussagesicherheit 1: <i>niedrig</i> 5: <i>hoch</i>	Berechnungen zur Variabilität der Parameter?
Primärer Porenwasserdruck	5	4	Nein
Elastische Eigenschaften	1	4	Nein
Zugfestigkeit - bedding planes - matrix	5	3	Ja
Kohäsion - bedding planes - matrix	5	2	Ja
Reibungswinkel - bedding planes - matrix	5	4	Nein
Primäres Spannungsfeld	5	2	Ja
Winkel bedding planes und Spannungsfeld	4	3	Nein
Permeabilität	4	4	Nein

Tab. 4.4 Relevanz und Aussagesicherheit felsmechanischer Parameter zur Ermittlung der zu variierenden Eingabegrössen

Ausgehend von der in Tabelle 4.4 gezeigten Bewertung wurden in der Parameterstudie die Zugfestigkeiten, die Kohäsionswerte sowie das primäre Spannungsfeld variiert. Dabei wurden die in Tabelle 4.5 aufgelisteten Rechenfälle abgearbeitet. Als Referenzdatensatz dienten die Parameter in Tab. 2.1. Kohäsion und Zugfestigkeiten wurden jeweils korreliert um 30 % erhöht oder reduziert. Unkorreliert dazu wurde die in der Modellebene liegende Horizontalspannungskomponente um den Faktor 1.3 erhöht bzw. reduziert. Damit ergibt sich eine Spannungsanisotropie in der Modellebene von 1.30 bzw. 0.73 bezüglich der vertikalen Spannungskomponente.

Rechenfall	Beschreibung (Unterschiede zum Referenzdatensatz)
RF_1	▪ Erniedrigung der Kohäsionswerte um 30 % ▪ Erniedrigung der Zugfestigkeiten um 30 %
RF_2	▪ Erniedrigung der Kohäsionswerte um 30 % ▪ Erniedrigung der Zugfestigkeiten um 30 % ▪ Erhöhung der Horizontalspannung von 15.1 MPa auf 20.7 MPa
RF_3	▪ Erhöhung der Horizontalspannung von 15.1 MPa auf 20.7 MPa
RF_4	▪ Erniedrigung der Horizontalspannung von 15.1 MPa auf 11.6 MPa
RF_5	▪ Erhöhung der Kohäsionswerte um 30 % ▪ Erhöhung der Zugfestigkeiten um 30 %
RF_6	▪ Erhöhung der Kohäsionswerte um 30 % ▪ Erhöhung der Zugfestigkeiten um 30 % ▪ Erhöhung der Horizontalspannung von 15.1 MPa auf 20.7 MPa
RF_7	▪ Erhöhung der Kohäsionswerte um 30 % ▪ Erhöhung der Zugfestigkeiten um 30 % ▪ Erniedrigung der Horizontalspannung von 15.1 MPa auf 11.6 MPa

Tab. 4.5 Beschreibung der Rechenfälle

Rechenfall	Veränderung der horizontalen Konvergenz [%]	Veränderung der vertikalen Konvergenz [%]	Änderung der Ausdehnung der EDZ [%]
RF_1	20	20	60
RF_2	125	200	75
RF_3	60	40	20
RF_4	-25	-20	5
RF_5	-5	-25	-20
RF_6	45	-5	15
RF_7	-25	-55	-20

Tab. 4.6 Berechnungsergebnisse zur Auflockerungszone im Vergleich zum Basisfall

Aus den Ergebnissen der Parameterstudie lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Bei einer Streubreite der relevantesten Eingabeparameter wie Zugfestigkeit, Kohäsion und primäres Spannungsfeld von ca. 30 % bezogen auf den Referenzdatensatz ergibt sich keinerlei lokale oder gar globale Instabilität. Alle hydro-mechanischen Parameter (z.B. Verschiebungen, Ausdehnung der EDZ etc.) bleiben in der gleichen Grössenordnung (Tab. 4.6, Konietzki et al. 2003).

- Die grössten Konvergenzen liefert der Rechenfall RF_2, in dem sowohl die Spannungen erhöht als auch die Festigkeiten massiv reduziert werden. Selbst dieser sehr konservative Fall ist ohne Einbauten und Sicherungsmassnahmen beherrschbar.
- Verglichen mit den numerischen Werten der Berechnungen zum Standsicherheitsnachweis Kap. 4.2.1 resultieren für den Referenzfall erwartungsgemäss geringere Verformungen, was wiederum bestätigt, dass die in Tab. 4.1 errechneten Deformationen und Schnittkräfte konservativ sind und somit für den Standsicherheitsnachweis auf der sicheren Seite liegen.

4.6.2 Geologische Störungen in der Lagerzone

Auslegungsbestimmende Störzonen wie z.B. die Neuhauser Störung (Fig. 3.17) können in der Lagerzone mit Bestimmtheit ausgeschlossen werden. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass kleinere, lokale, nicht auslegungsbestimmende geologische Störungen angetroffen werden.

Werden solche Störungen mit den *Haupttunneln* oder den *Lagertunneln LMA* angefahren, werden lokal entsprechend mehr Anker gesetzt und/oder die Spritzbetonstärke des Traggewölbes verstärkt. Der Einbau kräftigerer Felssicherungsmassnahmen wie z.B. Einbaubogen, wird nicht erwartet, wäre technisch aber machbar. Bei den Lagertunneln LMA wäre eine Neuplatzierung in der Lagerzone denkbar (und auch machbar).

Werden mit den *Lagerstollen BE/HAA* kleinere Störzonen angefahren, stehen, je nach Situation, verschiedenste Möglichkeiten, die auch kombiniert angewendet werden können, zu deren Überwindung zur Verfügung. Es sind dies beispielsweise

- längere Anker, evtl. zusätzlich dichter gesetzt,
- feinmaschigere Netze,
- Injektionen zur Verfestigung aufgelockerter Bereiche,
- Spritzbeton, evtl. nach Spezialrezeptur unter Verwendung spezieller Bindemittel wie etwa von Polymeren.

Ob in solchen Abschnitten noch Abfälle eingelagert oder diese Stollenstrecken mit Bentonitgranulat verfüllt werden, ist im Einzelfall zu entscheiden.

Sollte sich infolge der dünnsschichtigen Lagerung des Opalinustons und dem schichtparallelen Ausbruch bei den Tests und Untersuchungen im Testlager (Felslabor) doch unerwarteter Weise die Notwendigkeit einer dünnen über den ganzen Umfang geschlossenen Spritzbetonschicht erweisen, wäre auch diese Massnahme aus bautechnischer Sicht realisierbar. Die Rezeptur bzw. Zusammensetzung dieser Tragschicht wäre auf die Anforderungen der Langzeitsicherheit abzustimmen.

5 Betrieb des geologischen Tiefenlagers

In diesem Kapitel wird der Betrieb des geologischen Tiefenlagers und damit die Funktion der einzelnen Anlagenteile erläutert. Der Einsatz der wichtigsten dazu vorgesehenen Handhabungseinrichtungen wird beschrieben, und die Transportgeräte werden vorgestellt.

5.1 Betriebliche Auslegung

5.1.1 Betriebs- und Einlagerungskonzept

Das Betriebs- und Einlagerungskonzept ist durch die nachstehenden Punkte charakterisiert:

Anlieferung und Handhabung

- Die radioaktiven Abfälle werden vom Absender nur in Absprache mit dem Betreiber des Tiefenlagers angeliefert. Nach ihrem Eintreffen werden sie umgehend in das Betriebsgebäude der Empfangsanlage gebracht.
- Die Anlieferung der Abfälle und Lagercontainer sowie Verfüllmaterialien erfolgt primär über die Schiene. Eine Anlieferung über die Strasse ist jedoch möglich. Transporte für Verschlussmaterialien erfolgen primär über die Strasse.
- Werden bei der Eingangskontrolle Unstimmigkeiten bzw. nicht behebbare Schäden an den angelieferten Abfällen festgestellt, werden die betroffenen Abfälle vorschriftsgemäss verpackt dem Absender bzw. einer geeigneten Konditionieranlage zurückgesandt.
- Die Oberflächendosisleistung der Transportgebinde für interne Transporte von der Empfangsanlage zu den Einlagerungsorten wird auf 2 mSv/h begrenzt. Dieser Richtwert ist in Anlehnung an die internationalen Vorschriften für den Transport radioaktiver Güter auf öffentlichen Verkehrswegen festgelegt worden (z.B. RID/RSD 1999) und erlaubt die direkte Intervention bei Störfällen.
- Hubhöhen für Abfallgebinde werden so klein wie möglich gehalten.
- BE-Behälter und WA-COG-4 werden in lagerinternen Transportabschirmungen, HAA-Behälter in ebenfalls nur anlagenintern verwendeten Transportcontainern gehandhabt, welche auch gegen mechanisch/thermische Einwirkungen ausgelegt sind. Die Einlagerung erfolgt jedoch ohne diese Transportgeräte.
- LMA, exkl. WA-COG-4 werden sowohl zur internen Handhabung und Transport wie zur Einlagerung in Betoncontainer eingebracht und die Resthohlräume zementvergossen.

Einlagerungsbetrieb und Lagererweiterung

- Der Einlagerungsbetrieb wird aufgenommen, wenn die gesamte Infrastruktur, das Pilotlager und das LMA-Lager bereit sind.
- Während der Einlagerung im Pilotlager und den Lagertunneln LMA erfolgt gleichzeitig der Bau der ersten Lagerstollen BE/HAA im Hauptlager. Die beiden Bereiche sind durch Abschlüsse im Bau- und Betriebstunnel klar von einander getrennt und via Rampe für den Betrieb und via Bau- bzw. Lüftungsschacht für den Bau zugänglich. Die Abschlüsse sind gesichert. Sie können jedoch im Notfall sowohl von der Betriebs- wie Bauseite her geöffnet werden.
- Lagerstollen BE/HAA werden den betrieblichen Bedürfnissen entsprechend erstellt. Es werden keine Stollen auf Vorrat gebaut. Die Offenhaltungszeit der Stollen wird dadurch

kurz gehalten, ebenso die Anzahl Stollen, welche einem potenziellen Wassereintruchrisiko ausgesetzt sind.

- BE/HAA werden in den Lagerstollen – auch im Pilotlager – von Auflagern aus kompaktierten Bentonitblöcken getragen und der verbleibende Hohlraum im Stollen mit Bentonitgranulat verfüllt. Die Lagerstollen werden nach ihrer Beschickung verschlossen und gegen potenzielle Wasserzuflüsse gesichert.
- Die Einlagerung der BE/HAA erfolgt kontinuierlich und wird nur wenige Monate, evtl. gegen ein Jahr nach dem Auffahren des letzten Lagerstollens abgeschlossen sein.
- Alle LMA werden in Lagertunneln eingelagert und der Resthohlraum der Lagertunnel mit einem porösen Mörtel vergossen. Der Umladebereich wird jeweils mit Beton verfüllt.
- Die Einlagerung steht nicht unter Zeitdruck. Aus verschiedenen Gründen wird eine eher länger dauernde Einlagerungsphase angestrebt, was mit einer kleineren Betriebsmannschaft und einschichtigem Betrieb erreicht werden kann.
- Die Überwachung und Bedienung aller wichtigen Handhabungseinrichtungen und Geräte inkl. Transportmittel sowie die Steuerung technischer Einrichtungen und Anlagen ist vom zentralen Kommandoraum über Tage aus möglich. Krane und Manipulatoren im Betriebsgebäude der Empfangsanlage sowie der Betrieb der Zahnradbahn im Bereich über Tag und in der Zugangsrampe erfolgen in der Regel von dort aus, wo auch alle Operationen registriert werden.
- Rangiermanöver im Zentralen Bereich sowie die weiteren Aktivitäten unter Tag werden hauptsächlich von örtlichen, z.T. mobilen Leitständen aus geleitet. Arbeiten, bei welchen keine signifikante Strahlenexposition erfolgt, können bzw. werden durch die Betriebsmannschaft manuell ausgeführt.

Überwachung und Verschluss

- Nach Abschluss der Einlagerung sind die Zugänge und Haupttunnel offen und die Lagertunnel LMA und Lagerstollen BE/HAA beschickt und verschlossen. Dieser Zustand kann über mehrere Jahre beibehalten werden bis die Haupttunnel und der Lüftungsschacht verschlossen werden; siehe Verschluss Hauptlager (Kap. 8).
- Die Überwachung des Pilotlagers beginnt nach seiner Erstellung und wird fortgesetzt, bis der Verschluss der Gesamtanlage beschlossen und behördlich bewilligt ist. In dieser Zeit muss die Lüftung, wenn auch reduziert, so doch weiterbetrieben werden. Die Drainage muss weiter im Betrieb bleiben und ebenso sind die Wartungsarbeiten weiterhin auszuführen. Die Erfassung des Ist-Zustandes (Nullmessung) beim Pilotlager erfolgt, sobald dies die Bauarbeiten in der Lagerzone zulassen.
- Das Testlager (Felslabor) kann ebenfalls bis zum Verschluss der Gesamtanlage benutzt werden.

5.1.2 Einzulagernde Abfallmengen, Betriebsdauer

Die in ein geologisches Tiefenlager BE/HAA/LMA einzulagernden Abfälle mit Mengenangaben sind in Tabelle 2.2 gegeben. Um die ungefähre Betriebsdauer abzuschätzen, wird im vorliegenden Referenzprojekt davon ausgegangen, dass mit der Beschickung des Pilotlagers und der Belegung der Lagertunnel LMA begonnen und diese abgeschlossen werden, bevor die Einlagerung in den Lagerstollen BE/HAA des Hauptlagers aufgenommen wird (Abweichungen siehe Kap. 5.7). Die Abschätzung der Betriebsdauer erfolgt somit in zwei Schritten:

- Einlagerung der LMA und Beschickung des Pilotlagers,
- Einlagerungsbetrieb in den BE/HAA-Lagerstollen im Hauptlager.

Bei der Einlagerung der LMA und Beschickung des Pilotlagers müssen somit alle LMA im LMA-Lagerteil und ein repräsentativer Teil der BE/HAA im Pilotlager eingelagert werden. Bei 2 Pilotlagerstollen von je 300 m Länge (Fig. 3.1 und Beilage 3-1), entfallen ca. 2.5 % der BE- und HAA-Behälter auf das Pilotlager, die übrigen auf die BE/HAA-Lagerstollen des Hauptlagers (Kapitel 3.3.4). Es sind somit die nachstehend in Tabelle 5.1 zusammengestellten Abfälle in einem ersten Schritt einzulagern. Weil der Fall "Cemented waste option" in Tab. 2.2 leicht ungünstigere Verhältnisse ergibt und mit den WA-COG-4 ein speziell zu handhabendes Gebinde enthält (siehe 5.2.2.2 und 5.2.4.2), wird nur dieser zur Abschätzung der Einlagerungszeit weiterbearbeitet.

	Gebinde		Einlagerungseinheiten (EE)		
	Typ	Anzahl	Typ	Gebinde/EE	Anz EE
BE	BE-1	23	-	1	23
	BE-2	10	-	1	10
	BE-3	17	-	1	17
	<i>Total BE</i>	<i>50</i>			50
HAA	WA-1	20	-	1	20
	<i>Total HAA</i>	<i>20</i>			20
LMA	WA-BNF-2	30	LC2-MA-20	4	8
	WA-BNF-4	270	LC2-MA-25	4	68
	WA-BNF-7	170	LC2-MA-20	4	43
	WA-COG-2	380	LC2-MA-25	18	21
	WA-COG-4	320	Stapelement	4	80
	WA-COG-6	510	LC2-MA-20	4	128
	<i>Total LMA</i>	<i>1'680</i>			346
	Gesamttotal	1'750			416

Tab. 5.1 Im Pilotlager und LMA-Lager einzulagernde Abfälle ("Cemented waste option")
Abgeleitete Einlagerungseinheiten (EE): Der Begriff Einlagerungseinheit steht für BE- und HAA-Behälter, Lagercontainer LC2 und Stapelemente.

Werden pro einschichtigem Arbeitstag im Durchschnitt eine Lagereinheit eingebracht, ergibt sich zur Einlagerung von 416 Einheiten bei 220 Arbeitstagen pro Jahr ein Zeitbedarf von *ca. 2 Jahren*. Bei dieser Abschätzung wird in erster Näherung davon ausgegangen, dass der Zeitbedarf zur Einlagerung für alle Einlagerungseinheiten gleich ist: Das Einbringen von BE/HAA-Behältern erfordert eine kurze Vorbereitungszeit aber einen grösseren Aufwand bei der Verfüllung, und bei den LMA ist es umgekehrt.

Nachdem bereits ca. 50 BE- und ca. 20 HAA-Behälter im Pilotlager eingelagert sind, verbleiben für die BE/HAA-Lagerstollen des Hauptlagers noch ca. 2'015 BE- und ca. 710 HAA-Behälter,

total ca. 2'725 Einlagerungseinheiten. Bei ebenfalls 220 Arbeitstagen pro Jahr und der durchschnittlichen Verarbeitung einer Einlagerungseinheit pro Tag werden zur Beschickung der Lagerstollen BE/HAA im Hauptlager *ca. 12.4 Jahre* benötigt. Wird eine Reserve von *ca. 2.6 Jahren* für die Erstellung von Stollenabschlüssen und Unvorhergesehenem berücksichtigt, resultiert für das Referenzprojekt mit 192 GW_e eine Gesamtbetriebsdauer von *ca. 17 Jahren* zur Einlagerung aller BE/HAA und LMA.

5.2 Betriebsablauf

Der Lagerbetrieb kann eingeteilt werden in

- Anlieferung,
- Kontrolle und Bereitstellung zur Einlagerung,
- Interner Weitertransport sowie
- Einlagerung und Verfüllung.

Diese einzelnen Schritte werden nachstehend näher beschrieben und erläutert. Sollte die Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA mit den Aussenanlagen des Portalbereichs realisiert werden, wie dies in Fig. 3.3 zur Abschätzung des maximalen Platzbedarfs dargestellt wurde, würden die BE/HAA dort zur Einlagerung bereit gestellt. Im nachstehenden Beschrieb wird jedoch *nicht* davon ausgegangen, sondern es wird eine Anlieferung der BE/HAA-Behälter gemäss Fig. 2.5 angenommen.

5.2.1 Anlieferung einlagerungsfähiger Abfälle und Materiallieferungen

Transporte mit radioaktiven Abfällen und zur Einlagerung benötigten Materialien wie leere Betonlagercontainer oder Bentonitauflager etc. werden in die Empfangshalle des Betriebsgebäudes geleitet, wo sie bei Bedarf von Schnee, Eis oder grobem Schmutz gereinigt werden. Mörtel- und Betonzuschlagstoffe und Schotterkies sowie Zement werden direkt in die entsprechenden Silos verbracht.

5.2.2 Kontrolle und Bereitstellungsarbeiten zur Einlagerung

5.2.2.1 Bereitstellung von Abfällen

In der Empfangshalle erfolgt die Überprüfung der Transportdokumente, eine Kontrolle der Ladung und des Transportwagens sowie die Registrierung der Ladung bevor diese für den Abład freigegeben wird. Über eine Schleuse, wo verschiedene physikalische Parameter gemessen werden, gelangen die Transportbehälter in die weiteren Räume des Betriebsgebäudes.

Die nächsten Arbeitsschritte sind:

- Der Deckel der Transportbehälter wird abgenommen. Die einzelnen Abfallgebinde werden registriert und elektronisch mit der Transportdeklaration verglichen. Beim Entladen erfolgen weitere Kontrollen.
- Leicht kontaminierte Abfälle werden dekontaminiert und anschliessend der weiteren Vorbereitung zur Einlagerung zugeführt. Bei Unstimmigkeiten oder Schäden an den Abfällen werden diese zurückgewiesen.

- Leere Transportbehälter werden vor dem Ausschleusen freigemessen und, falls erforderlich, dekontaminiert. Alle Transporteinheiten werden erfasst und registriert.
- *BE- und HAA-Behälter* werden in eine betriebsintern verwendete Transportabschirmung bzw. einen Transportcontainer verladen und so intern weitertransportiert.
- *LMA*, exkl. *WA-COG-4*, werden in der Empfangsanlage in Lagercontainer aus Beton eingebracht und die verbleibenden Hohlräume mit einem porösen Zementmörtel verfüllt (Fig. 5.1). Der Grundriss der beiden Container ist gleich und erlaubt die Verwendung des gleichen Hebezeugs. Sie entsprechen auch dem Stilllegungscontainer aus dem Lagerprojekt SMA. Aus Abschirmgründen sind die Wandstärke und die Containerhöhen unterschiedlich (McGinnes 2002).

Die *WA-COG-4* werden in eine betriebsinterne Abschirmung verladen und so weiter gehandhabt.

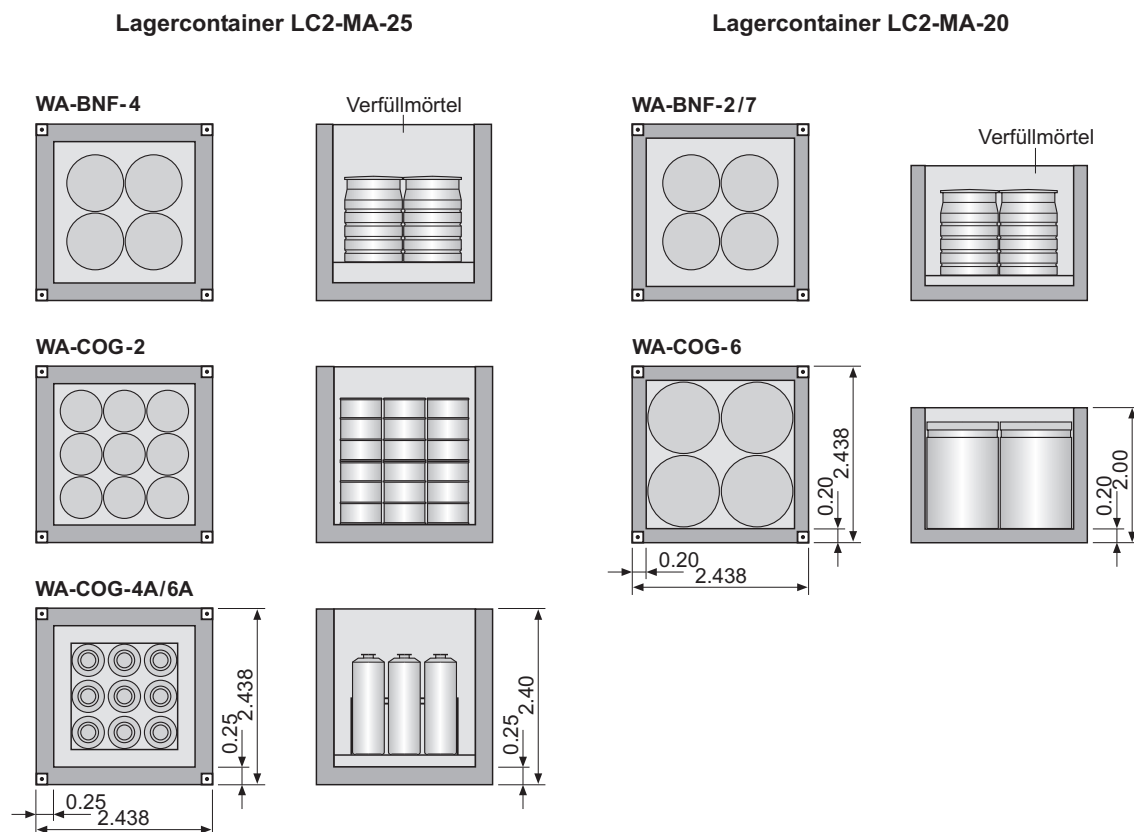


Fig. 5.1 LMA-Lagercontainer LC2-MA-20 und LC2-MA-25 mit Abfällen gemäss Tab. 2.2
Abmessungen in m

5.2.2.2 Andere Vorbereitungen

Neben den Abfällen sind diverse andere Vorbereitungen zu treffen, welche jedoch nicht mehr fernbedient auszuführen sind:

- Für die Einlagerung der BE/HAA sind die *Bentonitauflager* und *Auflagerträger* bereitzustellen (Fig. 5.2). Diese werden extern routinemässig hergestellt und einsatzbereit angeliefert. Die Auflager bestehen aus kompaktierten, gegenseitig verzahnten Bentonitblöcken und werden auf einer Bodenschale aus abkantetem Lochblech zusammengestellt. Vor der letzten Schicht wird ein weiteres, an den Rändern auf- bzw. abgebogenes Lochblech eingelegt und mit dem unteren an vier Stellen verschraubt. Zusammen mit der Vakuumverpackung entsteht dadurch eine stabile Transporteinheit. Die Auflagerträger bestehen aus Stahl.

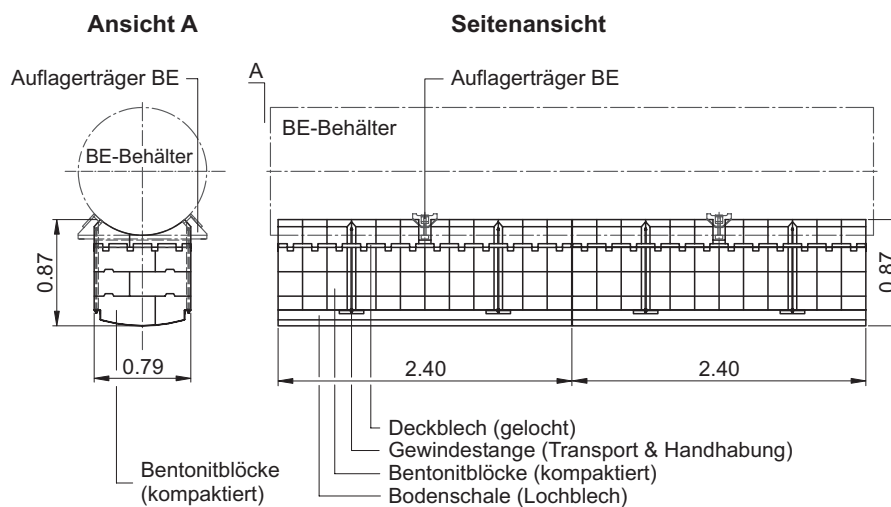


Fig. 5.2 Bentonitauflager mit Auflagerträger für einen BE-Behälter – Abmessungen in m

- Zur Einlagerung eines BE-Behälters sind, wie in Fig. 5.2 dargestellt, zwei Auflager zu je 2.4 m Länge, für einen HAA-Behälter ein Bentonitauflager von 1.6 m Länge bereitzustellen. Sowohl BE- wie HAA-Behälter benötigen je zwei Auflagerträger.
- Zur Einlagerung von WA-COG-4 sind *Stapelelemente* gemäss Fig. 5.3 bereitzustellen. Soll ein eigener Stapel erstellt werden, sind das Bodenelement sowie zwei Zwischenelemente erforderlich. Sollen vier WA-COG-4 auf einen LC2-MA-Container platziert werden, wird ein Containerelement benötigt (Kap. 5.2.4.2). Die Stapelelemente sind aus Beton hergestellt und werden gebrauchsfertig angeliefert und können, weil die Grundrisse gleich sind, mit dem gleichen Hebezeug wie die LC2-MA-20 bzw. 25 gehandhabt werden. Jedes Stapelelement kann vier WA-COG-4 Behälter aufnehmen und beruht auf dem Harassprinzip.
- Bentonitgranulat* wird in Silos angeliefert, welche in einem ISO-Stahlrahmen montiert sind und dadurch ein einfaches Umsetzen auf Plattformwagen der Meterspur erlauben. Das Granulat ist nicht direkt zur Einlagerung, jedoch zur unmittelbar folgenden Verfüllung bereitzustellen.
- Mörtel* zur Verfüllung der Lagertunnel LMA ist erst nach beendeter Beschickung der Tunnel in grösseren Mengen herzustellen. Ebenso wird *Beton*, *Schotterkies* und *Bentonit/Quarzsand-Gemisch* zur Erstellung der Tunnel- und Stollenabschlüsse nach Beschickung und Verfüllung der Lagertunnel LMA und Lagerstollen BE/HAA benötigt.

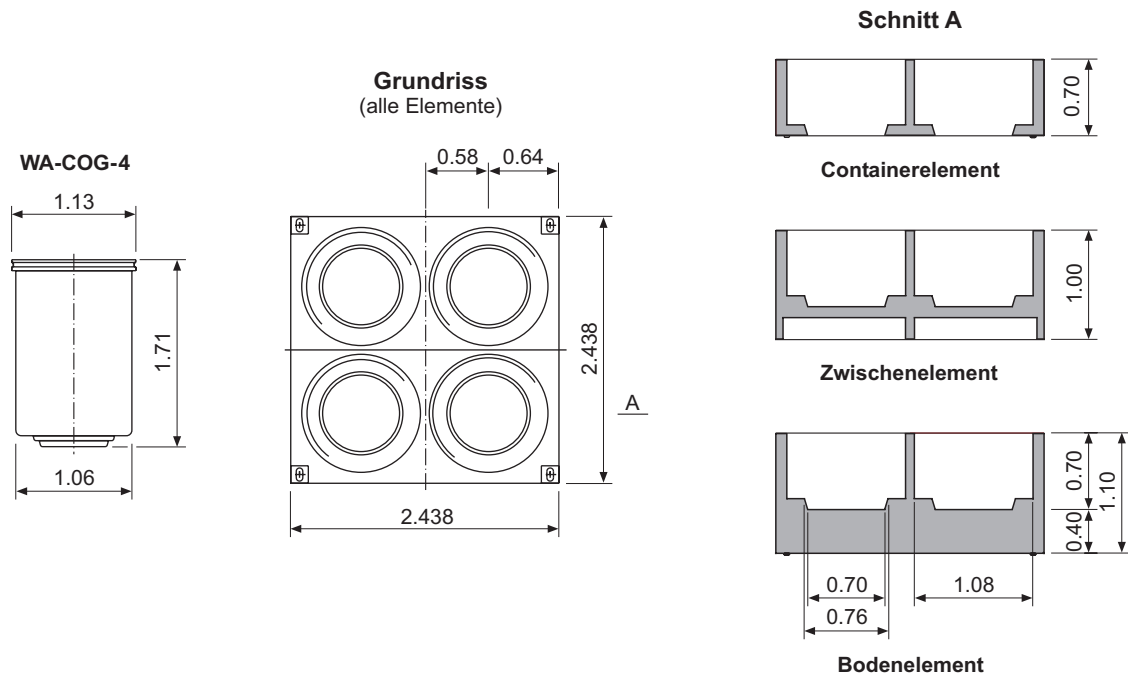


Fig. 5.3 Stapelelemente zur Einlagerung von WA-COG-4 – Abmessungen in m

5.2.2.3 Zusammenstellen der Züge

Das Bereitstellen von Zügen und die Beladung der Wagen erfolgen in der Versandhalle des Betriebsgebäudes. Die Arbeiten werden manuell ausgeführt bis auf den Verlad von abgeschirmten Abfallgebinden, was fernbedient erfolgt.

Alle abgehenden Transporte werden erfasst und registriert.

5.2.3 Interner Weitertransport

5.2.3.1 Transportkonzept für betriebsinterne Transporte

Der Transport von Abfallgebinden erfolgt grundsätzlich fernbedient. Materialtransporte können ebenfalls fernbedient, jedoch auch bemannt durchgeführt werden, wogegen Personentransporte immer manuell durch einen Lokführer erfolgen. Die Lokomotive (n) auf der Rampe ist (sind) aus Sicherheitsgründen immer talseitig (unten) angehängt.

Die Transportstrecke von der Versandhalle bis zu den Einlagerungsorten setzt sich zusammen aus der um 12.5 % geneigten Rampe, mit welcher die ca. 620 m Höhendifferenz überwunden werden und die von zwei Zahnradlokomotiven (Fig. 5.4) bedient wird und dem beinahe horizontal verlaufenden Betriebszugang und Betriebstunnel, die durch eine Stollenlokomotive (Fig. 5.5) im Adhäsionsbetrieb befahren werden. Der Wechsel des Zugfahrzeugs erfolgt fernbedient im Zentralen Bereich.

Sowohl Zahnrad- wie Stollenlokomotive arbeiten im Verbundbetrieb, d.h. sowohl durch Strom-einspeisung via Stromschiene wie via eingebautem Akkumulator, der bei Abwärtsfahrten durch Energierückgewinnung weitgehend wieder aufgeladen wird. Auf der Rampe, im Betriebszugang und im Betriebstunnel erfolgt die Energieversorgung durch eine Stromschiene, im Zentralen

Bereich, Abzweiger und Schleuse BE/HAA sowie Abzweiger und Umladestation LMA wird mit Akku gefahren.

Alle Transporte werden bis in die Schleuse BE/HAA bzw. die Umladestation LMA geführt, mit Ausnahme des Bentonitgranulates bei der Einlagerung von BE/HAA, wo das Granulat aus betrieblichen und anlagetechnischen Gründen im Zentralen Bereich vom Silowagen in den Verfüllwagen (Fig. 3.7) umgeschlagen und so bis in die Lagerstollen gebracht wird (Tab. 5.2).

Für Rangierarbeiten im Bereich der Abzweiger und Schleuse wird eine manuell gefahrene Akkulok (Fig. 5.6) eingesetzt, welche die verschiedenen Abstell- bzw. Parkpositionen bedient (Tab. 5.2).

Die beiden Zahnradlokomotiven können auch in Einzeltraktion eingesetzt werden, wie z.B. für den Transport leichterer Güter auf der Rampe oder für Transporte im Betriebszugang und Betriebstunnel bei Revision der Stollenlokomotive. Dadurch wird eine sehr hohe Flexibilität und Betriebsbereitschaft erreicht.



Fig. 5.4 Beispiel einer Zahnradlokomotive – Lokkonfiguration HGea 2/2 in Doppeltraktion



Fig. 5.5 Beispiel einer im Verbund arbeitenden Stollenlokomotive wie sie z.B. beim Bau des Eurotunnels (Ärmelkanal) im Einsatz war



Fig. 5.6 Beispiel einer Akku-Lokomotive wie sie sehr häufig im Untertag- und Bergbau anzutreffen sind

5.2.3.2 Einsatzbereich der Lokomotiven und Bentonitgranulatwagen

Der Einsatzbereich der Lokomotiven und der Bentonitgranulatwagen ist in Tabelle 5.2 im Überblick dargestellt. Unter Bentonitgranulatwagen wird verstanden: Der Silowagen mit entsprechenden Bremsmechanismen zum Transport auf der 12.5 % steilen Rampe und der Verfüllwagen (Fig. 3.7) zum Transport im horizontalen Betriebstunnel, ausgerüstet mit Geräten zum Einbringen des Bentonitgranulats im Lagerstollen BE/HAA von 2.5 m Durchmesser.

	Zugangsbereich				BE/HAA				LMA				
	Empfangsanlage	Zugangstunnel	Zentraler Bereich	Betriebszugang	Betriebstunnel	Abzweiger	Schleuse	Lagerstollen	Betriebstunnel	Abzweiger	Umladestation	Lagertunnel LMA-1	Lagertunnel LMA-2
Lokomotiven													
Zahnradlokomotiven	x	x	x	(x)	(x)				(x)	(x)	(x)		(x)
Stollenlokomotive			x	x	x	x	x		x	x	x		(x)
Akkulokomotive			(x)	(x)	x	x	x		(x)	(x)	(x)		(x)
Bentonitgranulatwagen													
Silowagen	x	x	x										
Verfüllwagen			x	x	x	x	x	x					

Tab. 5.2 Einsatzbereich der Lokomotiven und Bentonitgranulatwagen
(x) im Rangierbetrieb bzw. Sekundäreinsatz

5.2.3.3 Transportwagen

Für den Betrieb des geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA sind neben den bereits beschriebenen Lokomotiven und Bentonitgranulatwagen weitere Transportwagen notwendig. Sie werden nachstehend aufgeführt:

- Transportwagen für BE-Behälter in Transportabschirmungen,
- Transportwagen für HAA-Behälter in Transportcontainern,
- Plattformwagen mit hydraulischem Ladekran für den Transport von Bentonitauflagern,
- Containerwagen für den Transport von LMA-Lagercontainern und Transportabschirmungen WA-COG-4,
- Beton- und Mörteltransportwagen für den Transport von Beton und Mörtel oder Schotterkies,
- Personentransportwagen für ca. 10 bis 25 Personen,
- Plattformwagen zum Transport diverser Kleingeräte etc.

Die Wagen müssen die Anforderungen der Eisenbahnverordnung (EBV 1983) für den Einsatz auf der 12.5 % geneigten, im Zahnradbetrieb befahrenen Zufahrtsrampe erfüllen, wobei insbesondere sicher zu stellen ist, dass diese sich bei einer Betriebsstörung selbsttätig z.B. durch Notbremsung in eine sichere Position bringen, was heute bekannte und bewährte Technik ist. Unter Verwendung bewährter Komponenten werden diese Wagen gebaut oder bereits vorhandenes Rollmaterial eingesetzt bzw. angepasst.

5.2.3.4 Transporttechnische Auslegung der Zufahrtsrampe

Die Zahnradstrecke wird für folgende Anhängelasten ausgelegt:

- | | | | | |
|-------------------|----------|-------|-----------------|------------|
| • Normalbetrieb | abwärts | 84 t, | Geschwindigkeit | 18 km/h, |
| | aufwärts | 45 t, | | 22 km/h, |
| • Ausnahmebetrieb | aufwärts | 60 t, | Geschwindigkeit | reduziert. |

Die Anhängelasten sind aufgrund der in Tabelle 5.3 zusammengestellten Zugkombinationen festgelegt worden. Damit ist der äussere Rahmen abgesteckt, innerhalb welchem sich beliebige weitere (Zugs)Kombinationen bilden lassen. Die so definierten Anhängelasten sind ferner bei der Festlegung der Rampenneigung und der Evaluation möglicher Lokomotiven eingeflossen.

Unter Ausnahmebetrieb wird der Rücktransport einlagerungsbereiter Abfallgebinde verstanden (siehe Tab. 5.3).

	Gewicht		Normalbetrieb						Ausnahme	
		t	abwärts			aufwärts			aufwärts	
Zugskombination K			K 1	K 2	K 3	K 4	K 5	K 6	K 7	K 8
Einlagerung BE										
Lagerbehälter BE	ca.	28.6	x		x				x	
Transportabschirmung	max.	20.0	x		x	x		x	x	
Transportwagen	ca.	10.0	x		x	x		x	x	
Bentonitauflager	4 Stk	10.0		x	x					x
Wagen mit Kran	ca.	13.0		x	x		x	x		x
<i>Total BE</i>	<i>ca.</i>		<i>59 t</i>	<i>23 t</i>	<i>82 t</i>	<i>30 t</i>	<i>13 t</i>	<i>43 t</i>	<i>59 t</i>	<i>23 t</i>
Einlagerung HAA										
Lagerbehälter HAA	2 Stk	17.9	x		x				x	
Transportcontainer	ca.	5.0	x		x	x		x	x	
Transportwagen	ca.	10.0	x		x	x		x	x	
Bentonitauflager	4 Stk	8.0		x	x					x
Wagen mit Kran	ca.	13.0		x	x		x	x		x
<i>Total HAA</i>	<i>ca.</i>		<i>33 t</i>	<i>21 t</i>	<i>54 t</i>	<i>15 t</i>	<i>13 t</i>	<i>28 t</i>	<i>33 t</i>	<i>21 t</i>
Einlagerung LMA										
(ohne COG-4)										
Lagercontainer LC2	max.	40.0	x						x	
Transportwagen	ca.	10.0	x			x			x	
<i>Total LMA</i>	<i>ca.</i>		<i>50 t</i>			<i>10 t</i>			<i>50 t</i>	
Einlagerung COG-4										
Abfallgebinde	2 Stk	8.8	x						x	
Transportabschirmung	ca.	23.0	x			x			x	
Transportwagen	ca.	10.0	x			x			x	
<i>Total WA-COG-4</i>	<i>ca.</i>		<i>42 t</i>			<i>33 t</i>			<i>42 t</i>	
Auslegungsgrössen			84 t			45 t			60 t	

Tab. 5.3 Anhängelasten und Auslegungsgrössen für den Zahnradbetrieb auf der Zufahrtsrampe zwischen Empfangsanlage und Zentralem Bereich

5.2.4 Einlagerung der Abfälle

5.2.4.1 Einlagerung von BE- und HAA-Behältern

BE- und HAA-Behälter werden auf Bentonitauflagern in die geneigten Lagerstollen eingebracht und der Resthohlraum mit Bentonitgranulat verfüllt (Fig. 5.7). Der Einlagerungsvorgang erfolgt bei beiden Abfalltypen prinzipiell gleich:

- Die Abfallbehälter werden eingebracht und der betreffende Abschnitt des Lagerstollens unmittelbar anschliessend verfüllt. Dieser Vorgang wiederholt sich bis ein Lagerstollen gefüllt ist.

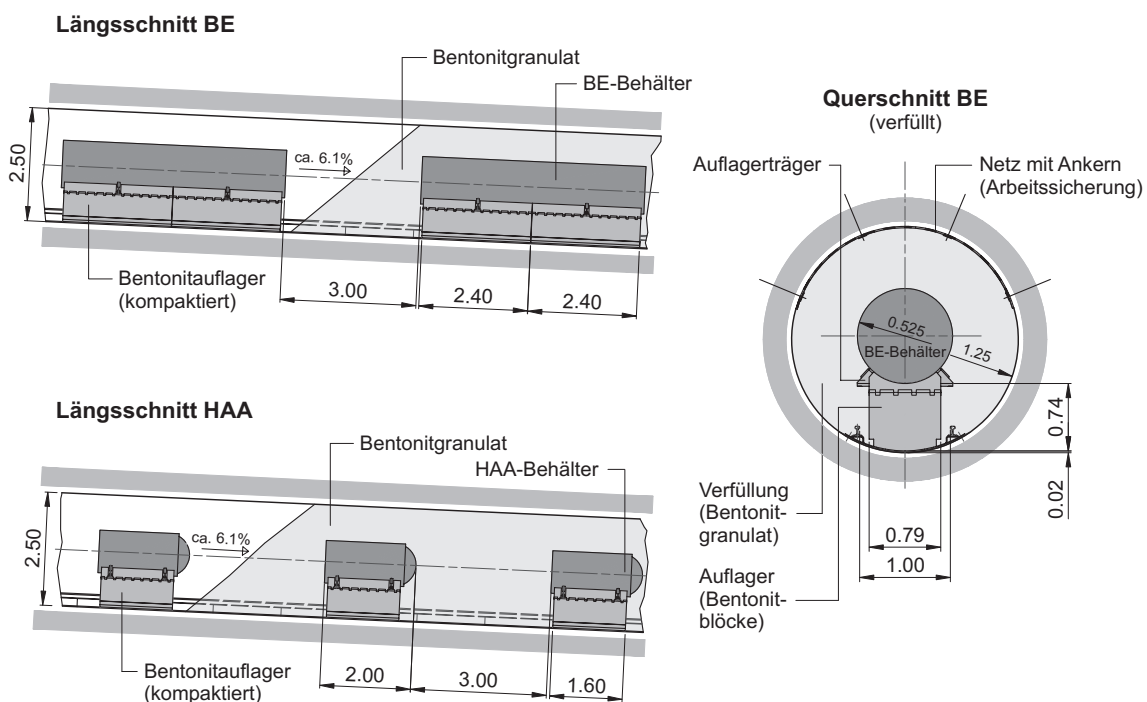


Fig. 5.7 Einlagerung von BE/HAA in Lagerstollen des Pilot- und Hauptlagers
Abmessungen in m

Weil die BE-Behälter grösser und schwerer sind und stärker abgeschirmt sein müssen, wird im folgenden nur noch die Einlagerung der BE-Behälter beschrieben.

Diese verläuft wie folgt:

- Abzweiger und Schleuse sind doppelgleisig ausgerüstet. Auf dem Gleis Ansicht B der Fig. 5.8 – im folgenden Gleis B genannt – befinden sich zu diesem Zeitpunkt der Hydraulikwagen 2 und das Umsetzgerät. Beide sind im Boden temporär verankert. Auf dem Gleis Ansicht A – künftig als Gleis A bezeichnet – wird der Einlagerungstrolley mit der Windenlokomotive bis auf die Höhe des Umsetzgerätes in die Schleuse eingefahren. Die Halterungen für die Bentonitauflager werden eingehängt und manuell befestigt.
- Der Plattformwagen mit den Bentonitauflagern und Auflagerträgern wird mit der Akku-lokomotive auf Gleis B ebenfalls bis zum Umsetzgerät gebracht. Hier wird die Vakuumverpackung der Bentonitauflager manuell entfernt und die Auflager mit dem am Plattform-

wagen montierten Ladekran in den Einlagerungstrolley gehoben. Die Auflagerträger werden von Hand gesetzt und ebenso die Transport- und Handhabungsschrauben (Gewindestangen Fig. 5.2) der Auflagerpakete entfernt. Der Plattformwagen wird aus der Schleuse herausgefahren und die Windenlok schiebt den Einlagerungstrolley in die Beladeposition neben dem Umsetzgerät. Die Windenlok wird verankert.

- Mit der Stollenlokomotive wird ein Wagen mit einem BE-Behälter vom Zentralen Bereich herangefahren und vor dem Einbiegen in den Abzweiger der Hydraulikwagen 1 zwischenhängt. Diese Komposition wird auf Gleis B in die Schleuse gebracht und mit dem Umsetzgerät verbunden. Die Stollenlok wird abgekoppelt und aus der Schleuse gefahren. Sämtliche Strom- und Hydraulikverbindungen werden hergestellt und auf ihre Funktion hin überprüft. Die Sicherungsbolzen vom Verschluss der Transportabschirmung werden entfernt. Damit sind alle Vorbereitungen getroffen, sodass als nächstes die Transportabschirmung geöffnet werden kann.

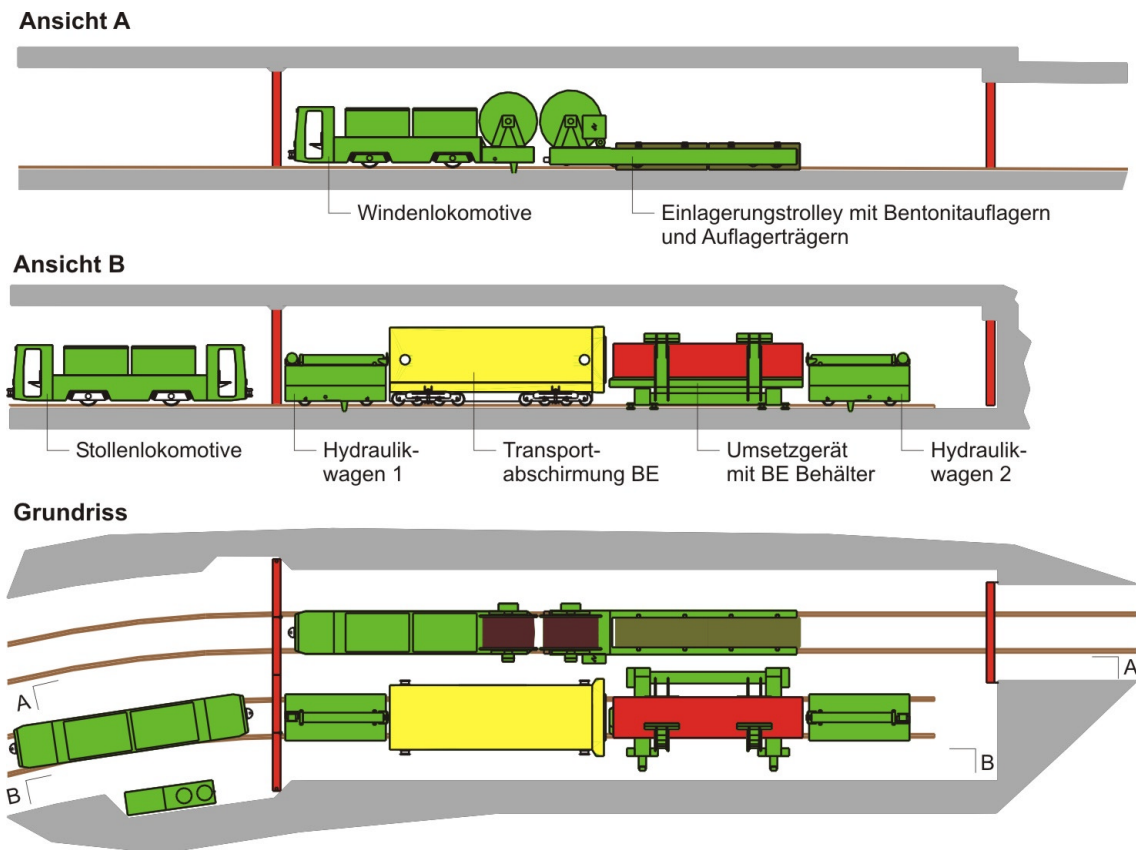


Fig. 5.8 Einlagerung von BE-Behältern – Situation in der Schleuse BE/HAA (schematisch)

- Nachdem alle Betriebspersonen die Schleuse verlassen haben, werden die nächsten Schritte fernbedient ausgeführt:
 - Öffnen der Transportabschirmung, Registratur des Behälters,
 - Herausschieben des BE-Behälters mit dem Hydraulikzylinder des Wagens 1 auf das Umsetzgerät,
 - Transfer des BE-Behälters mit dem hydraulischen Umsetzgerät auf die Auflagerträger des Einlagerungstrolleys.

- Abfahrt des Einlagerungstrolleys in den Lagerstollen. Im horizontalen Teil erfolgt die Fortbewegung über einen eigenen Elektroantrieb, im geneigten Lagerstollen gravitativ, gesichert durch die Winde in der Schleuse. Das Elektrokabel mit integrierter Steuerfaser wird abgerollt und auf die Flachstahlschwellen zwischen den Schienen gelegt.
- Nach Erreichen der Lagerposition wird durch Absenken des Einlagerungstrolleys der BE-Behälter auf dem Bentonitauflager – die Beanspruchung ist sehr gering – im Lagerstollen abgesetzt (Fig. 5.9) und der Trolley mit der Winde aus dem Stollen gezogen. Dabei wird das Elektro- und Steuerkabel wieder aufgerollt. Die Lagerposition wird registriert.

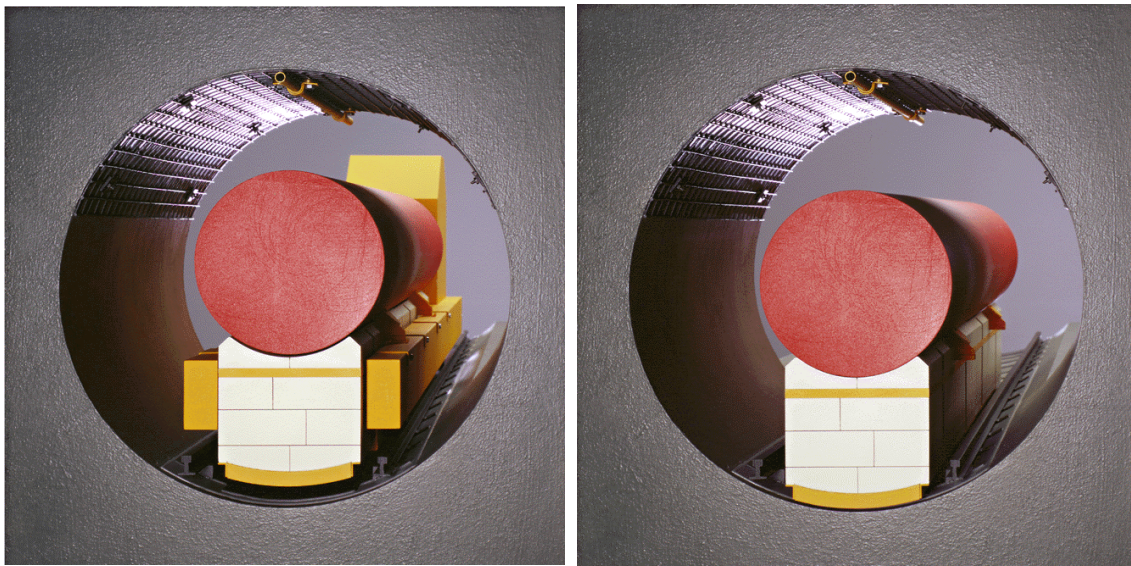


Fig. 5.9 Einfahren eines BE-Behälters mit Bentonitauflager
Einfahren im Bild links; bereit zum Einbringen der Verfüllung (Bentonitgranulat) im Bild rechts; (Modellfoto)

- Nach Ankunft des Trolleys in der Schleuse werden die Halterungen der Bentonitauflager wieder manuell entfernt und der Trolley mit der Windenlokomotive aus der Schleuse in eine Abstellposition im Betriebstunnel gefahren.
- Anschliessend übernimmt die Windenlok den bereitgestellten Verfüllwagen und fährt ihn auf Gleis A in die Schleuse ein. Die Winde wird arretiert, die Kabelverbindungen hergestellt und der Wagen in den Lagerstollen eingefahren. Im horizontalen Teil ebenfalls durch Eigenantrieb und im geneigten Stollen gravitativ wie der Einlagerungstrolley.
- Nach Erreichen der Verfüllposition werden die beiden seitlichen Förderbänder und die beiden Spiralförderer in Funktion gebracht und, unter kontinuierlichem Zurückziehen des Wagens, das Bentonitgranulat eingebracht (Fig. 5.10). Der Verfüllfortschritt wird mit TV-Kamera und Lasermessgerät überwacht, bzw. gesteuert. Eine Verstaubung der Geräte wird einerseits durch Einpressen des Granulats in die bereits eingebrachte Verfüllung, andererseits durch Absaugen der Luft durch das Lüftungsrohr vermieden. Ist der Wagen leer, wird er mit der Winde in die Schleuse zurückgezogen und in den Zentralen Bereich zurückgeschoben.

- Ein weiterer Verfüllwagen wird auf Gleis A eingeschleust und in den Lagerstollen weitergeleitet. Dieser Vorgang wiederholt sich für BE-Behälter ein drittes Mal bis der nächste Abfallbehälter eingebracht werden kann.
- Die leere Transportabschirmung kann bereits kurze Zeit nach dem Einfahren des Lager-trolleys in den Lagerstollen aus der Schleuse ausgefahren und zum Zentralen Bereich zurückgeschoben werden, wo sie für den Rücktransport zur Empfangsanlage bereitgestellt wird.

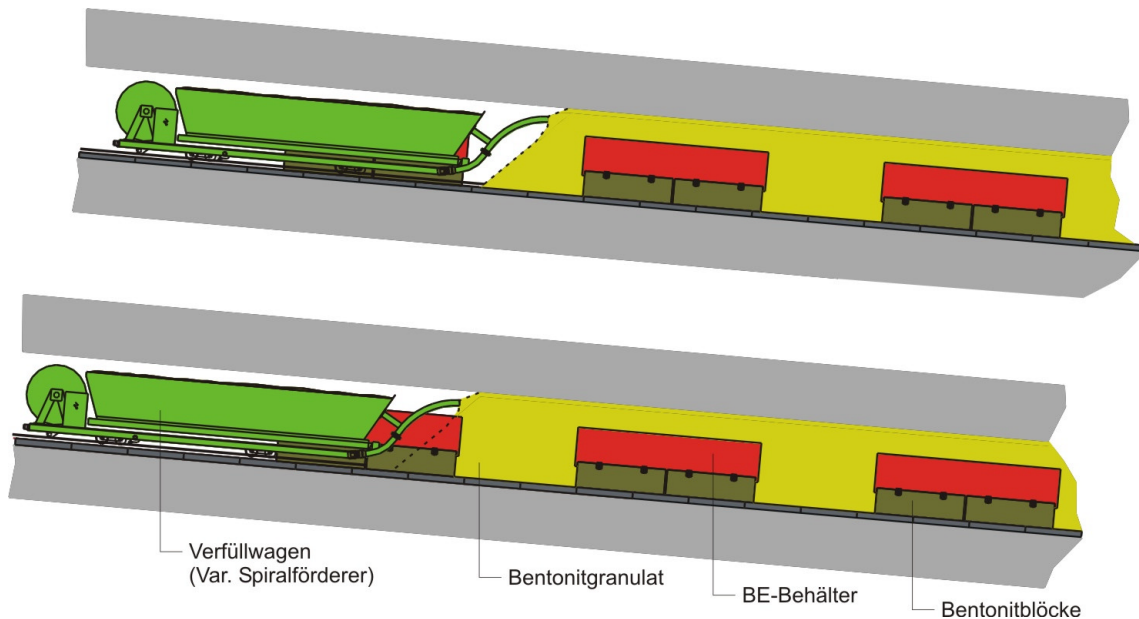


Fig. 5.10 Einbringen der Granulatverfüllung nach dem Positionieren des BE-Behälters (schematisch)

Ist ein Lagerstollen beschickt und verfüllt, wird dieser verschlossen (Kap. 8). Die Gleise, Schleusentore und alle weiteren Installationen werden demontiert und in den Abzweiger und Schleuse des nächsten Lagerstollens gebracht.

Versuche mit Bentonitgranulat

Bereits 1992 wurden erfolgreich Versuche zur Herstellung von Bentonitgranulat mit hoher Schüttdichte ausgeführt (Naundorf & Wollenberg 1992). Im weiteren hat ein Grossversuch im Massstab 1:1 gezeigt, dass mit entsprechend am Verfüllwagen angeordneten Spiralförderern eine normgerechte, d.h. weitgehend homogene Verfüllung mit einer Dichte von ca. 1.4–1.5 g/cm³ über den gesamten Stollenquerschnitt in einem Arbeitsgang erreicht werden kann (Fig. 5.11, Bild links und Mitte; Dokumentation in Bearbeitung).

Wenn die Spiralförderer im Verfüllgut verbleiben, und dies ist aus Qualitätssicherungsmaßnahmen notwendig, so hat sich die erwartete geringe Staubproduktion bestätigt.

Ein in situ Versuch im Felslabor Mt Terri, in welchem das Systemverhalten Bentonitblockauflager – Bentonitgranulatverfüllung – Heizelement – Wassereinwirkung untersucht werden soll, ist ebenfalls erfolgreich installiert worden (Fig. 5.11, Bild rechts). Die Datenregistrierung ist angelaufen.



Fig. 5.11 Grossversuche im Massstab 1:1
 Links: Spiralförderer; Mitte: Stollen beim Verfüllen mit Bentonitgranulat;
 Rechts: Versuchsanordnung Mt. Terri mit Bentonitauflagerblöcken, Heizkörper
 und perforierten Bewässerungsrohren vor dem Einbringen der Granulatverfüllung.

5.2.4.2 Einlagerung von LMA-1 und LMA-2

Die Einlagerung der LMA-1 und LMA-2 erfolgt in der Regel fernbedient über Monitore. Bei Lagercontainern ist die Bedienung auch über mobile Schaltpulte mit direkter Sichtverbindung möglich.

LMA-1

LMA-1, exkl. WA-COG-4, werden in Betoncontainern (Fig. 5.1) mit der Stollenlokomotive via Betriebszugang, Betriebstunnel LMA und Abzweiger auf die Entladebrücke der Umladestation gebracht (Fig. 5.12 und Beilage 3-7) und dort mit dem Umladekran unmittelbar neben der Entladebrücke auf Auflagerkonsolen in der Tunnelsohle abgestellt und gestapelt. LC2-MA-20 können dreifach, LC2-MA-25 zweifach gestapelt werden. Das Luftkissenfahrzeug unterfährt den Stapel, hebt ihn um wenige Zentimeter an und verschiebt ihn zur Lagerposition. Im Querschnitt des Lagertunnels (Fig. 5.13, linkes Bild) werden zwei Stapel eingebracht. Sowohl Stapelzusammensetzung wie Stapelposition werden registriert.

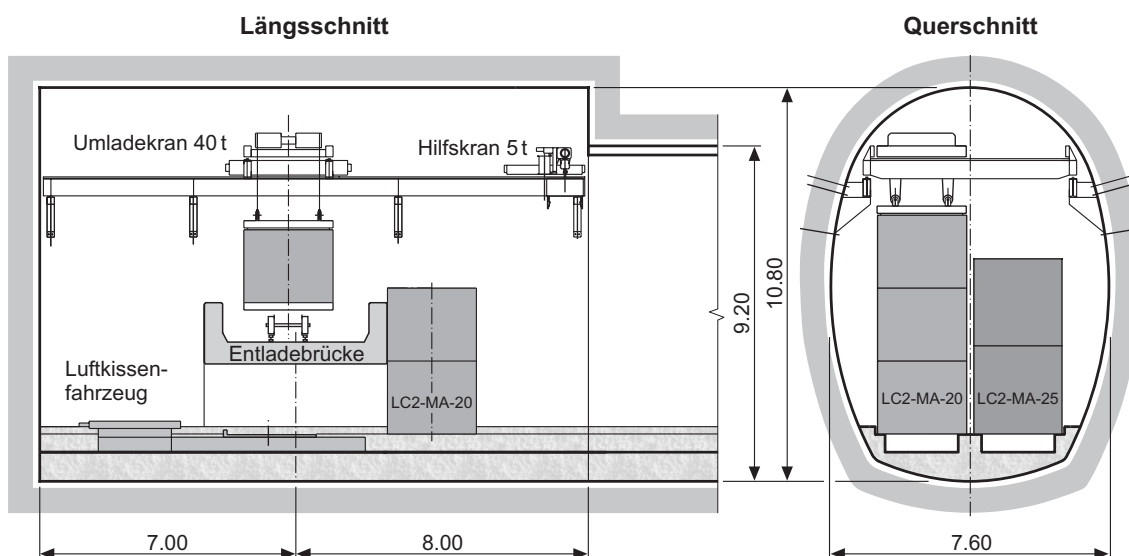


Fig. 5.12 Umladestation LMA-1 – Längsschnitt; Querschnitt mit LC2-Stapeln
 Abmessungen in m

WA-COG-4 können als Einzelstapel oder in Kombination mit LC2-MA-20 eingelagert werden (Fig. 5.13, rechtes Bild). Bei der Einzelstapellagerung wird als erstes ein Bodenelement (Fig. 5.3) zur Entladeposition auf der Brücke der Umladestation gebracht und mit dem Umladekran auf die Auflagerkonsolen in der Tunnelsohle gestellt. Abmessungen und Anhängenvorrichtung sind gleich wie bei den Lagercontainern. Als nächstes werden zwei WA-COG-4 angeliefert und von der Entladebrücke mit dem Hilfskran in das bereitgestellte Bodenelement gebracht. Zwei weitere WA-COG-4 werden benötigt um das Bodenelement zu füllen.

Als nächstes wird ein weiteres Stapелеlement – das Zwischenelement – zur Umladestation angeliefert und mit dem Hauptkran auf den begonnenen Stapel gesetzt. Zwei mal zwei weitere WA-COG-4 komplettieren diese Zwischenlage. Mit einem weiteren Stapелеlement und vier weiteren WA-COG-4 wird der Stapel abgeschlossen und mit dem Luftkissentransporter in die Lagerposition verfahren (Fig. 5.13). Stapelzusammensetzung und Stapelposition werden registriert.

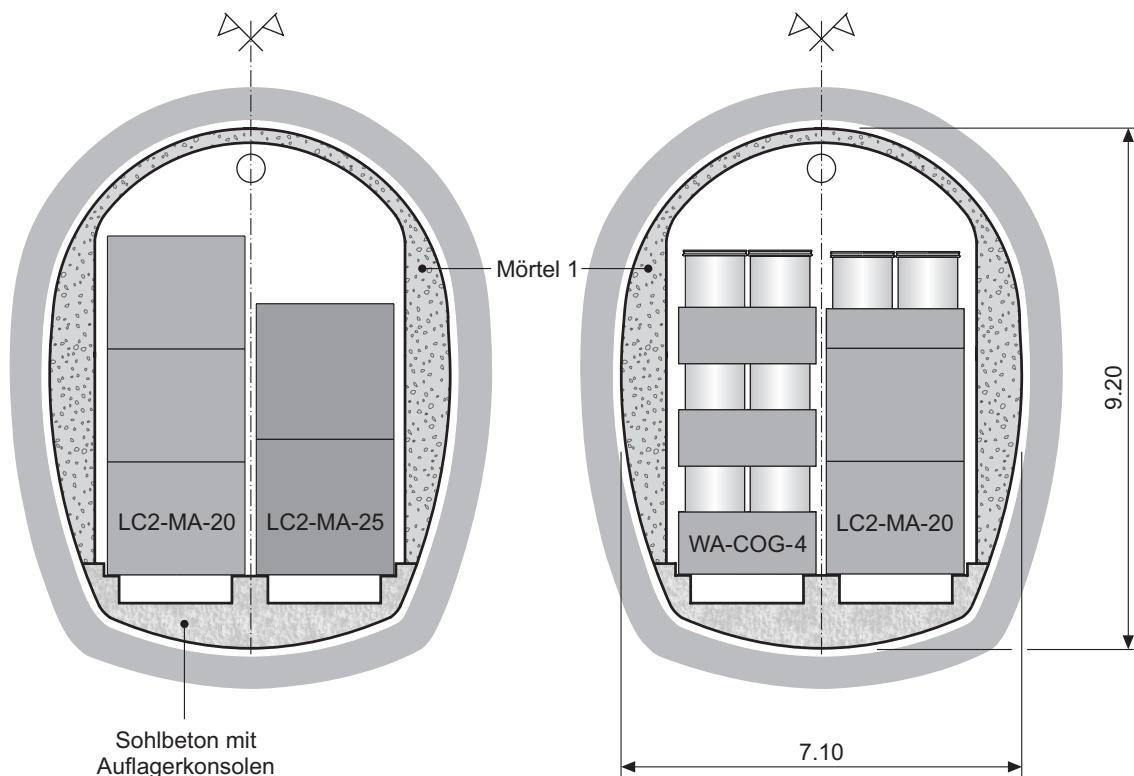


Fig. 5.13 Lagertunnel LMA-1 – Querschnitt mit verschiedenen Belegungsmöglichkeiten
Abmessungen in m

Zur Einlagerung mit Lagercontainern wird z.B. auf zwei LC2-MA-20 das Containerelement (Fig. 5.3) als Stapелеlement gesetzt und darin vier WA-COG-4 eingebracht (Fig. 5.13). Auch hier werden Stapelzusammensetzung wie Stapelposition registriert.

Sind die Lagertunnel belegt, wird als Abschirmung je ein Stapel betongefüllter LC2-MA-20 (ohne Abfälle) eingebracht und ein Tunnelabschluss erstellt, der als verlorene Schalung für den nun einzubringenden porösen Verfüllmörtel dient. Die Installationen in der Umladestation werden demontiert und die Station anschliessend mit Beton gefüllt. Das Verfüllen der Lagertunnel bereitet keine Schwierigkeiten, weil der Verfüllmörtel dünnflüssig ist und über die

gesamte Tunnellänge problemlos in alle zu füllenden Hohlräume eindringt (Mayer & Wittmann 1996). Wegen der dabei entstehenden Hydratationswärme mag es angezeigt sein, die Verfüllung eines Lagertunnels in 2 oder 3 Stufen auszuführen, ebenso den Verschluss der Umladestation mit Beton.

LMA-2

LMA-2 werden in LC2-MA-25 auf Plattformwagen in die Verlängerung des Betriebstunnels LMA gebracht (Beilage 3-7) und dort vom selbstfahrenden hydraulischen Einlagerungsgerät (Fig. 3.14) übernommen und von diesem in die Lagerposition verfahren und dort abgesetzt. Die Lagerpositionen werden registriert. Die Einlagerung erfolgt in Tunnellängsachse. Auch hier wird nach Abschluss der Einlagerung ein mit Beton gefüllter Lagercontainer als Abschirmung eingebracht und ein Tunnelverschluss erstellt, um den porösen Verfüllmörtel einzubringen. Als Sicherung wird auch hier ein Betonpfropfen erstellt.

5.3 Verkehrskonzept

5.3.1 Verkehrsaufkommen

5.3.1.1 An- und Abtransporte über Tag

Während des Einlagerungsbetriebs ergibt sich das Verkehrsaufkommen zu den Aussenanlagen der Portalzone aus dem Antransport von radioaktiven Abfällen, dem Transport von Verfüllmaterialien, Hilfs- und Zuschlagstoffen, dem Transport von leeren Containern sowie aus Personentransporten für Personal und Besucher. Dementsprechend gibt es auch Verkehrsbewegungen vom Lager weg.

Transporte für den gleichzeitig zur Einlagerung erfolgenden Bau der Lagerstollen BE/HAA im Hauptlager werden via Schachtkopfbereich abgewickelt und sind beim Bau des Tiefenlagers (Kap. 4.4.3) behandelt.

Unter dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Betriebskonzept und den dort getroffenen Annahmen und gemachten Ausführungen zur Betriebsdauer werden die in Tab. 5.4 zusammengestellten Abfall- und Materialmengen anzutransportieren sein.

		Pilotlager und LMA – ca. 2 Jahre		Hauptlager – ca. 15 Jahre	
Transportgut		Total ca.	pro Woche ca.	Total ca.	pro Woche ca.
Bahntransport	BE-Behälter	50 Stk	0.6 Stk	2'015 Stk	3.1 Stk
	HAA-Behälter	20 Stk	0.2 Stk	710 Stk	1.1 Stk
	LMA-Gebinde	1'680 Stk	19 Stk	0	0
	Bentonitauflager	120 Stk	1.4 Stk	4'750 Stk	7.2 Stk
	Bentonitgranulat	2'000 m ³	23 m ³	77'500 m ³	117 m ³
	Lagercontainer (leer)	270 Stk	3.1 Stk	0	0
	Stapelelemente	80 Stk	1 Stk	0	0
Strassentransport	Verfüllmörtel für Lagercontainer und Lagertunnel	4'700 m ³	55 m ³	0	0
	Beton und anderes Verschlussmaterial für Lagertunnel und Lagerstollen	1'750 m ³	20 m ³	5'250 m ³	8 m ³

Tab. 5.4 In ein Lager BE/HAA/LMA während des Einlagerungsbetriebs insgesamt anzutransportierende Güter (gerundet)

Zur Bestimmung der Transportfrequenzen wird bei der Anlieferung von folgenden Wagenkapazitäten ausgegangen:

- Bahnwagen:
(pro Wagen) 1 BE-Behälter, oder
 4 HAA-Behälter, oder
 8 LMA-Gebinde, oder
 10 Bentonitauflager, oder
 2x11 m³ Bentonitgranulat, oder
 3 Lagercontainer LC2 (leer), oder
 6 Stapелеlemente.
- Lastwagen 12 m³ Kies/ Sand/ Verschlussmaterial.

Mit diesen Kapazitätsangaben berechnen sich die nachstehenden Verkehrsbewegungen:

Zum Einlagern und Verfüllen der LMA-Lagertunnel und des Pilotlagers BE/HAA werden pro Woche im Durchschnitt 5 bis 6 Eisenbahnwagen an Abfällen und Materialien und 6 bis 7 Lastwagen für Kies/Sandtransporte benötigt. Bei der Einlagerung der BE/HAA in den Lagerstollen des Hauptlagers sind es im Durchschnitt ca. 9 Eisenbahnwagen pro Woche und ca. 1 Lastwagentransport in 2 Wochen. Dazu kommt noch die An- und Wegfahrt der ca. 30 Personen zählenden Betriebsmannschaft sowie der Besucher, welche im Mittel auf ca. 20 bis 25 Personen pro Tag geschätzt werden. Das Verkehrsaufkommen im Einlagerungsbetrieb kann somit als gering eingestuft werden.

Mit den leeren Wagen sind ca. eine Transportabschirmung BE/HAA oder LMA pro Tag sowie leere Paletten der Bentonitauflager zurückzuschieben.

5.3.1.2 Transporte im Zugangstunnel

Die Transportfrequenz im Zugangstunnel wird im allgemeinen gering sein. Jedoch sind Spitzenwerte bei der Mörtelverfüllung der Lagertunnel nach erfolgter Beschickung und nachfolgenden Betonverfüllung der Umladestationen zu erwarten. Dies wird voraussichtlich als konzentrierte Einzelaktion(en) durchgeführt.

Ansonsten dürften die Frequenzen etwa der Haupttätigkeit, dem Einlagern von BE-Behältern entsprechen. Zur Einlagerung eines Behälters sind zwei Fahrten notwendig, nämlich:

- Fahrt 1 Betriebsmannschaft und 3 Silowagen à 11 m³ Bentonitgranulat,
- Fahrt 2 BE-Behälter in Transportabschirmung sowie Plattformwagen mit Bentonitauflagern und Auflagerträgern.

Wird ein BE-Behälter pro Tag eingelagert, wie dies vorgesehen ist, entspricht dies der Tagesfrequenz. Etwas höhere Frequenzen sind über kurze Zeit beim Verschluss der Lagerstollen BE/HAA zu erwarten.

Bei Rückfahrten werden jeweils leere Transportabschirmungen und leere Silowagen zurück zur Empfangsanlage gebracht, ebenso die Betriebsmannschaft.

5.3.2 Verkehrsabwicklung

Zur Gewährleistung eines reibungslosen und sicheren Verkehrsablaufes wird das gesamte Verkehrsaufkommen sowohl über wie unter Tage vom zentralen Kommandoraum in der

Empfangsanlage geleitet und überwacht sowie fernbediente Transporte bis in den Zentralen Bereich und ausnahmsweise auch im Lagerbereich von hier aus ausgeführt. Dazu werden entsprechende Fernleit-, Signalanlagen und an Schlüsselstellen Videokameras installiert.

Zur Verkehrsabwicklung werden neben den bereits in Kap. 5.2.3.1 erwähnten Grundsätzen nachstehende Punkte beachtet:

- Die gesamte Betriebsmannschaft wird mit dem Konzept zur Verkehrsabwicklung vertraut gemacht und bei Änderung desselben entsprechend instruiert.
- Der Bereich der Anlieferung im Betriebsgebäude ist klar von jenem der Weiterleitung von Transporten in die Lageranlage getrennt. Bei den Schienen erfolgt zudem ein Wechsel von Normal- auf Schmalspur (Meterspur). Die Verwendung von externem Rollmaterial im Lagerbereich ist ausgeschlossen.
- Transporte auf der Zugangsrampe werden mit elektrisch betriebenen Zahnradlokomotiven im Verbundbetrieb ausgeführt, wobei die Lok (s) immer talseitig angekuppelt sind. Ein Befahren des Tunnels mit Personenwagen, leichteren Transportern und Kleinbussen sowie Spezialfahrzeugen ist möglich, aber nur für Ausnahme- und Notfälle vorgesehen und nur wenn keine Abfalltransporte im Tunnel unterwegs sind. Ein Kreuzen in den periodisch angeordneten Ausstellbuchten ist nur z.B. mit leeren Transportabschirmungen, nicht aber mit Abfalltransporten statthaft.
- Im Zugangs- und Betriebstunnel sowie im Betriebszugang ist kein Fussgängerverkehr vorgesehen. Je nach Betriebserfahrung kann er, mit entsprechenden Auflagen, jedoch zugelassen werden.

5.4 Dokumentation der Abfälle und Qualitätssicherung

5.4.1 Dokumentation der Abfälle

Durch die Dokumentation soll die Rückverfolgung der Abfälle bis zur Lagerposition in einem bestimmten Lagerstollen bzw. Lagertunnel sichergestellt werden. Zur Erreichung dieses Ziels sind die nachstehenden Massnahmen vorgesehen:

- Ein Datendokumentationssystem ermöglicht die zentrale Übersicht über alle zur Lagerung vorgesehenen Abfallgebände, unabhängig von ihrem Herkunftsort.
- Die Anlieferung der Abfälle erfolgt in Absprache mit dem Lagerbetreiber.
- In der Empfangshalle wird die Ankunft jedes Transportes registriert und elektronisch mit der Transportdeklaration verglichen.
- Beim Öffnen der Transportbehälter im Betriebsgebäude der Empfangsanlage wird der Inhalt identifiziert und auf Transportschäden kontrolliert. Sämtliche Daten werden erfasst und gespeichert und mit den vorhandenen Gebindedaten verglichen. Rücktransporte von Abfallgebänden sind die Ausnahme und beschränken sich auf nicht behebbare Unstimmigkeiten in der Deklaration oder auf Gebinde mit grösseren Transportschäden.
- Alle von der Empfangsanlage abgehenden Transporte ins Tiefenlager wie auch die Rücktransporte werden registriert.
- Bei der Einlagerung wird die Position jedes einzelnen BE- und HAA-Behälters im Lagerstollen festgehalten und registriert. Ebenso bei der Einlagerung der WA-COG-4 in den Lagertunneln. Bei den übrigen LMA wird die Zuladung in Lagercontainer und der Lagertunnel sowie die Position des Lagercontainers im Lagertunnel dokumentiert.

5.4.2 Qualitätssicherung im Betrieb

Das geologische Tiefenlager stellt eine Atomanlage im Sinne des Bundesgesetzes über die friedliche Verwendung der Atomenergie dar. Somit muss gewährleistet sein, dass bei dessen Betrieb der vom Gesetz verlangte Schutz von Mensch und Umwelt vor unzulässiger Strahlung stets besteht. Im weiteren ist sicher zu stellen, dass die zur Gewährleistung der radiologischen Sicherheit in der Nachbetriebsphase notwendigen Massnahmen während des Einlagerbetriebs qualitätskonform umgesetzt werden.

Um diese Ziele zu erreichen sind, der jeweiligen Planungs- bzw. Bewilligungsphase entsprechend, projektspezifische Vorgaben für die Qualitätsplanung und die Qualitätsprüfung auszuarbeiten. Für die Handhabung und den internen Transport radioaktiver Abfälle sind solche Prozeduren aus dem Kernkraftwerkbetrieb und der Zwischenlagerung bestens bekannt; inkl. radiologischer Betriebsüberwachung. Zur Kontrolle der Einhaltung der Schutzziele für die Bevölkerung wird die Abluft und das Abwasser radiologisch überwacht und alle Materialien aus der kontrollierten Zone werden freigemessen. Obgleich im Normalbetrieb keine radioaktiven Abwässer erwartet werden, ist vorgesehen, alle Abwässer aus der kontrollierten Zone in einem Prüfbehälter zu sammeln und nur nach erfolgter Analyse und Freigabe weiterzuleiten.

Im vorliegenden Anlagen- und Betriebskonzept ist insbesondere im Hinblick auf einen robusten und wenig störanfälligen Betrieb darauf geachtet worden, möglichst einfache Arbeits- bzw. Handhabungsabläufe zu erreichen. Dies wird sich zu einem späteren Zeitpunkt auch entsprechend vereinfachend auf die Qualitätssicherung auswirken:

- Soweit möglich wurde auf vorhandene, betriebsbewährte Geräte und Komponenten abgestellt wie z.B. Krane, Zahnradlokomotive, Luftkissenfahrzeug etc.
- Wo dies nicht möglich war, sind die benötigten Geräte soweit planerisch bearbeitet worden, dass eine Realisierung derselben bei Weiterführung des Projektes gewährleistet werden kann, wie z.B. Umsetzgerät, Einlagerungstrolley, Verfüllwagen.
- Soweit verfügbar, wurde auf Labortests oder in situ Tests zurückgegriffen:
 - Bei den Auflagern aus kompaktierten Bentonitblöcken für BE/HAA auf den FEBEX-Versuch im Felslabor Grimsel (Enresa 1998),
 - beim Bentonitgranulat zur Verfüllung der verbleibenden Hohlräume BE/HAA auf diverse Untersuchungen und Anwendungen wie z.B. (Naundorf & Wollenberg 1992 sowie aktuelle Versuche im Felslabor Mt. Terri).

Ein weiteres Mittel der Qualitätssicherung stellen die Betriebshandbücher der diversen Anlagen und Geräte dar, welche auch Angaben zum Betriebsunterhalt und zur Wartung derselben enthalten.

5.5 Betriebspersonal und Besucherkonzept

5.5.1 Betriebspersonal

Die in Abschnitt 5.1.2 bei einschichtigem Betrieb geschätzte Betriebsdauer von ca. 17 Jahren zur Einlagerung der BE/HAA und LMA beruht auf der Annahme einer kleinen, über mehrere Jahre voll beschäftigten Betriebsmannschaft. Diese könnte sich etwa gemäss Tabelle 5.5 zusammensetzen.

Für den Betrieb eines Tiefenlagers BE/HAA/LMA wird eine Belegschaft von ca. 28 Personen, mit 2 Personen Reserve somit ca. 30 Personen benötigt. In diesem Personalbestand sind 10 Personen für Eingangskontrollen und Überwachungsaufgaben enthalten. Weitergehende Bewachungsaufgaben, wie sie bei einer Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA benötigt würden, sind in diesen Zahlen nicht enthalten.

Zeitgleich zum Einlagerungsbetrieb werden die Lagerstollen BE/HAA des Hauptlagers aufgeföhren und die entsprechenden Stollenabschlüsse auf der Bauseite erstellt. Diese Bauarbeiten werden durch einen externen Unternehmer ausgeführt. Die dort eingesetzten Personen gehören deshalb nicht zur Betriebsmannschaft des Lagers. Ebenfalls nicht zur Betriebsmannschaft gehören Personen, welche mit wissenschaftlichen Arbeiten im Testlager (Felslabor) oder mit der Überwachung des Pilotlagers beschäftigt sind.

Die ermittelte Belegschaft von ca. 30 Personen bezieht sich auf den Einlagerungsbetrieb. Für die im Rahmen des KGL-Konzepts vorzusehende langjährige Überwachungsphase wird dieser Bestand den anfallenden Aufgaben entsprechend angepasst.

Betriebsleitung 1			
Leitung Administration (durch BL)		Leitung Technik	
			1
Empfang	0.5	Lagerbetrieb, Unterhalt	8
Sekretariat	0.5	Strahlenschutz	1
Rechnungswesen	1	Bau, QS	1
Eingangskontrolle und Überwachung	10	Abwart, Umgebung	1
Öffentlichkeitsarbeit	1.5		
Kantine	1.5		

Tab. 5.5 Betriebsmannschaft eines geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA

Durch das Ziel, die Einzel- und Kollektivdosis zu begrenzen, ergeben sich Anforderungen an die Auslegung und Überwachung der Arbeitsplätze und des Personals. Die Gestaltung der Arbeitsabläufe ist im vorliegenden Anlagen- und Betriebskonzept unter dieser Prämisse erfolgt.

Neben der Personendosimetrie ist auch eine präventive, raum- und gegenstandsbezogene Strahlenschutzüberwachung der Arbeitsplätze, Aufenthaltsbereiche und Strahlenquellen vorgesehen. Dafür werden sowohl fest installierte wie auch mobile Überwachungseinrichtungen verwendet, die Ortsdosisleistung, Oberflächenkontamination sowie Luftkontamination erfassen können. An häufig begangenen Orten, wo potenziell ionisierende Strahlung (oder evtl. Luftkontamination) auftreten könnte, wird der Zustand mit fest installierten Geräten kontinuierlich überwacht und angezeigt. Die Messgeräte werden auf entsprechende Alarmschwellen eingestellt und Anzeigen und Alarme in den Kommandoraum übertragen.

Alle Personen, die sich in der kontrollierten Zone aufhalten (Kap. 3.6), werden in die Strahlenschutzüberwachung einbezogen. Die Personendosimetrie richtet sich nach der HSK Richtlinie R-12 (HSK 1997).

5.5.2 Besucherkonzept

Transparenz, Dialogbereitschaft und Informationsangebot seitens des Lagerbetreibers bzw. Lagerstellers sind Voraussetzungen für eine öffentliche Akzeptanz der Anlage. Die Betreiber der Lageranlage sind somit an einer offenen Informationspolitik interessiert. Diese umfasst auch die Möglichkeit, sich mit einem Besuch umfassend zu informieren.

Es ist deshalb geplant, auch für unangemeldete Gäste einen Informationsraum mit verschiedensten Exponaten, Tafeln, Dia- und Videoshows etc. bereitzustellen, der jeweils zu bestimmten Zeiten geöffnet ist. Ferner soll ein für ca. 80 Personen ausgelegtes Auditorium die Begrüssung und Information von angemeldeten Besuchergruppen ermöglichen und die Durchführung kleinerer Tagungen zulassen.

Betriebsbesichtigungen sind in geführten Gruppen ebenfalls möglich. Dazu notwendige Garderoben etc. werden bei der weiteren Planung in den Anlagen über Tag einbezogen. Die zu besichtigenden Räume und Anlagen richten sich nach den aktuellen betrieblichen Arbeiten und werden jeweils von der Betriebsleitung festgelegt und via Kontrollraum gesteuert und überwacht. Es wird angestrebt, allen Interessenten einen Einblick in die Arbeiten in der Empfangsanlage zu gewähren und die Anlagen unter Tag zugänglich zu machen.

Besuchergruppen erhalten bei Bedarf spezielle Besucherdosimeter, die nach jedem Besuch ausgewertet werden.

5.6 Unterhalts- und Wartungskonzept

Die Lageranlage und der Betriebsablauf sind so ausgelegt, dass Wartungs- und insbesondere Revisionsarbeiten ausgeführt werden können, ohne dass das Betriebspersonal unnötigerweise radiologischer Strahlung ausgesetzt wird. Dies trifft natürlich auch auf die vorzusehenden langjährigen Überwachungsphasen des KGL-Konzepts zu, wo alle Abfälle eingelagert und die Lagerstollen BE/HAA und Lagertunnel LMA verfüllt und verschlossen sind, bzw. das Hauptlager verschlossen ist (Kap. 8).

Das Tiefenlager BE/HAA/LMA kann bezüglich Unterhalt und Wartung im wesentlichen in bauliche Anlagen und maschinentechnische Einrichtungen unterteilt werden.

5.6.1 Bauliche Anlagen

Von zentraler Bedeutung ist die Einwirkung des Bergwassers auf die Tunneleinbauten. Ist diese gering, wie dies bei allen Anlagen im Opalinuston der Fall ist und in den nicht wasserführenden Schichten der Zugänge erwartet werden kann, werden in Kombination mit den zu erwartenden geringen übrigen Einwirkungen und den vorgesehenen Qualitätssicherungsmassnahmen bei der Projektierung, der Ausführung der Bauwerke sowie ihrem Betrieb kaum grössere Unterhalts- und Wartungsarbeiten anfallen.

In wasserführenden und angrenzenden Zonen kann das Wasser aber zu Schäden führen. Es muss deshalb das anfallende (Rest)Wasser sauber gefasst und abgeleitet werden. Einer sorgfältigen Pflege der Drainageleitungen kommt deshalb eine sehr hohe Bedeutung zu. Die anfallende Wassermenge im Zugangstunnel und im Lüftungsschacht muss kontinuierlich überwacht und die Drainageleitungen periodisch durchgespült und, falls notwendig, in Stand gestellt werden. Diese Instandstellungsarbeiten können, je nach Situation und Alter der Anlage, recht aufwendig ausfallen, sind ausführungstechnisch aber absolut machbar.

5.6.2 Maschinentechnische Einrichtungen

Maschinentechnische Einrichtungen inkl. Pumpanlagen werden gemäss den Vorgaben in den Betriebsvorschriften gewartet. Mit dieser Aufgabe werden ausgebildete, betriebseigene Fachleute betreut, welche bei Bedarf externe Spezialisten beiziehen. Für kleinere Reparaturen steht eine Mechanik- und Elektrowerkstatt in der Empfangsanlage zur Verfügung; grössere Arbeiten werden extern vergeben.

5.7 Optionen – Betrieb des geologischen Tiefenlagers

5.7.1 Änderungen am Abfallmengengerüst

Die wesentlichsten Änderungen am Abfallmengengerüst können sein:

- Weniger Abfälle,
- mehr Abfälle oder
- neue Abfallsorten (LMA).

Eine Änderung der Abfallmenge wirkt sich bei Beibehaltung der im Kap. 5.5.1 vorgestellten Betriebsmannschaft primär auf die Betriebsdauer des Lagers aus. Zusätzliche LMA wie sie in Variante 1 im Kap. 2.4.4 vorgegeben sind, wirken sich mit ca. 0.5 bis max. 1 zusätzlichen Betriebsjahr nur unwesentlich auf die für das Referenzprojekt ermittelte Gesamtbetriebsdauer von 17 Jahren aus. Bei der als Extremvariante definierten Abfallmenge Variante 2, Kap. 2.4.4 wäre mit einer Gesamtbetriebsdauer von ca. 25 Jahren zu rechnen. Eine Verkürzung derselben wäre z.B. durch einen 2-schichtigen Einlagerungsbetrieb oder durch eine gleichzeitige Einlagerung in 2 Lagerstollen BE/HAA realisierbar. Der Personalbestand und die technische Ausrüstung bzw. Geräte müssten dann entsprechend aufgestockt werden. Bei Variante 2 würden sich als Sekundäreffekt die Bauzeit bis zur Betriebsaufnahme und der Aufwand zum Verschluss der Haupttunnel entsprechend erhöhen; bei Variante 1 fällt dieser Aspekt kaum ins Gewicht.

Sollten neue LMA-Abfallsorten zur Einlagerung berücksichtigt werden, wäre als erstes zu prüfen, ob diese in den vorgesehenen Lagercontainern LC2-MA-20/25 eingelagert werden können. Ist dies nicht möglich, wäre dafür eine neue Lösung zu finden.

5.7.2 Betriebs- und Einlagerungskonzept LMA

Im Kap. 5.1 wird davon ausgegangen, dass bei Einlagerungsbeginn zuerst das Pilotlager beschickt und alle LMA eingelagert und die Lagerstollen des Pilotlagers und Lagertunnel LMA verfüllt und verschlossen werden bevor mit der Einlagerung der BE/HAA im Hauptlager begonnen wird. Dieses Konzept beruht auf der Projektvorgabe, wonach die Menge der einzulagernden Abfälle bekannt ist und diese entsprechend den Bedürfnissen des Lagerbetriebs abgerufen werden können.

Ist ein Teil der LMA erst zu einem späteren Zeitpunkt zur Einlagerung verfügbar, der insgesamt benötigte Raumbedarf jedoch bekannt, wird der entsprechende Raum in den Lagertunneln freigehalten und die Abfälle später eingebracht. Die Lagertunnel LMA bleiben offen bis alle LMA eingelagert sind. Dies ist machbar, weil die Lagertunnel LMA-1 und LMA-2 durch Anker und Betoneinbauten gesichert sind.

Ist ein Teil der LMA erst zu einem späteren Zeitpunkt zur Einlagerung verfügbar und der insgesamt benötigte Raumbedarf *nicht* bekannt, sind die nachstehenden zwei Lösungen denkbar:

- Der Raumbedarf wird mit entsprechenden Reserven abgeschätzt und die entsprechenden Lagertunnel LMA werden vor Einlagerungsbeginn erstellt. Die Einlagerung der Abfälle erfolgt ihrer Verfügbarkeit entsprechend. Der letztlich verbleibende und nicht mehr nutzbare Einlagerungsraum wird verfüllt.
- Bau und Einlagerung der LMA werden etappiert. Dies erlaubt, in der zweiten Bauetappe den effektiv benötigten Lagerraum für die restlichen LMA bereitzustellen. Denkbar wäre, diese zweite Etappe im Anschluss an die Einlagerung der BE/HAA zu realisieren, weil zur Erweiterung des Lagerteils LMA – bedingt durch die Zugänglichkeit – der Einlagerungsbetrieb eingestellt werden muss. Die Einlagerung der LMA-2 müsste aus Layoutgründen zurückgestellt und in die zweite Einlagerungsphase LMA verschoben werden. Je nach Umfang der zweiten Einlagerungsetappe müsste mit einem zeitlichen Mehraufwand von ca. 1 bis 3 Jahren gerechnet werden.

5.7.3 Abfalltransporte im Zugangstunnel (Rampe)

Zur Überwindung der Höhendifferenz von ca. 620 m zwischen der Empfangsanlage und dem Zentralen Bereich ist der Einsatz von Zahnradlokomotiven und entsprechendem Rollmaterial vorgesehen. Die Zahnradtechnik ist in der Schweiz weit verbreitet und hat einen sehr hohen Sicherheitsstandard erreicht. Neben vielen Bergbahnen wie beispielsweise auf den Pilatus (Alpnacherseite, Steigung 48 %) oder auf das Jungfraujoch (Berner Oberland) werden auch "konventionelle" Bahnen wie etwa die Brännigbahn oder die Furka-Oberalpbahn streckenweise mit Zahnradantrieb betrieben.

Ein unkontrolliertes in die Tiefe Fahren kann aufgrund der verfügbaren technischen Systeme ausgeschlossen werden. Aus Sicherheitsgründen wird zudem, z.B. zur Vermeidung eines Kuppungsbruchs, die Lokomotive immer talseitig (unten) angehängt. Um einen Achsenbruch eines Transportwagens aufzufangen könnten z.B. seitliche Abstützungen vorgesehen werden, wie sie im schwedischen SFR-Lager bei den Transportcontainern integriert sind.

5.7.4 Einlagerung BE/HAA

Bei der Einlagerung der BE/HAA gibt es die verschiedensten "was, wenn"-Fragen. Die offensichtlichsten werden nachstehend angesprochen:

Sind die *Lagerstollen steiler* anzulegen als erwartet, hat dies im Bereich der zu erwartenden Abweichungen von einigen wenigen Graden keinen Einfluss auf den Bau- und Einlagerungsvorgang. Sind die *Lagerstollen* dagegen *flacher* anzulegen, sind für die Einlagerung 2 Lösungen vorgesehen:

- Der Selbstantrieb des Einlagerungstrolleys wird nicht nur im Anfahrbereich der Schleuse sondern auch im Lagerstollen benutzt. Diese Lösung ist auch vorgesehen, wenn die gravitativ erzeugte Antriebskraft des beladenen Einlagerungstrolleys nicht ausreichen sollte, das Windenseil in den Lagerstollen zu ziehen.
- Der beladene Einlagerungstrolley wird mit einer Stollenlokomotive zur Lagerposition gefahren. Das Elektro- und Steuerkabel wird auf der Lok montiert und versorgt von dort aus den Trolley mit elektrischer Energie. Die Energieversorgung der Stollenlok erfolgt ebenfalls

so, kann jedoch auch vom Akku als redundanter Stromquelle erfolgen. Das Windenseil entfällt.

Werden durch den auf dem Lagertrolley montierten Monitor im Lagerstollen *Gesteinsbrocken* festgestellt, wird der Einlagerungsvorgang abgebrochen. Der Trolley wird aus dem Stollen gezogen und der Abfallbehälter in der Schleuse mit dem Hydraulikwagen 2 (Fig. 5.8) wieder in die Transportabschirmung zurückgeschoben. Der oder die Gesteinsbrocken werden entfernt und die Firste entsprechend in Stand gestellt.

Beim *Reissen des Windenseils* (trotz sorgfältiger periodischer Kontrollen) ist der Einlagerungstrolley noch am Elektro- und Steuerkabel befestigt und kann mit diesem aus dem Stollen gezogen werden. Versagt auch dieses und zudem noch die Bremsen, würde der beladene Trolley auf die Bentonitverfüllung des zuletzt eingelagerten Behälters auffahren. Die Dämpfung des Aufpralls durch das Bentonitgranulat ist so stark, dass eine Behälterbeschädigung mit Aktivitätsfreisetzung mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann (vgl. z.B. Kiesstrecke auf der Autobahn Fribourg – Lausanne als Verzögerungsstrecke für Lastwagen bei Bremsversagen). Die weitere Handhabung eines solchen Ereignisses hängt von der konkreten Situation vor Ort ab.

Sollte die *Einfahrt des Einlagerungstrolleys im Stollen plötzlich blockiert* sein, wird der Grund ermittelt und die Ursache behoben. Ist eine Behebung nicht möglich und kann der Trolley auch nicht aus dem Stollen gezogen werden, wäre der Einsatz eines Schubgerätes denkbar, mit welchem – auch unter Anwendung grösserer Kräfte – das gesamte Einlagerungspaket inkl. Trolley in die vorgesehene Lagerposition geschoben und dann mit Bentonitgranulat verfüllt würde.

Versagt die Elektrosteuerung am Einlagerungstrolley, wird dieser mit der Winde aus dem Stollen gezogen, der Abfallbehälter in die Transportabschirmung zurückgeschoben und der Defekt an der Steuerung behoben.

Fällt das Hydraulikgerät während des Ausschiebens des Abfallbehälters auf das Umsetzgerät *aus*, wird der Behälter mit dem Hydraulikwagen 2 in die Abschirmung zurückgeschoben und der Schaden behoben.

Die Behebung von *Störungen am Umsetzgerät* wird fallweise geplant und durchgeführt, weil das Gerät mit Sicherungen und Redundanzen ausgestattet ist, welche eine Fehlfunktion praktisch ausschliessen.

Allgemein ist zu vermerken, dass das *Befahren von Lagerstollen durch Personen* z.B. für Inspektionen jeglicher Art möglich ist. Soll bis zu einem Behälter vorgedrungen werden, dessen zugehörige Granulatverfüllung noch nicht eingebracht ist, ist am Inspektions- oder Interventionswagen ein entsprechend ausgelegter Abschirmschild anzubringen.

Als *letzte Massnahme* sei noch erwähnt, dass ein Lagerstollen BE/HAA teilweise oder im Extremfall sogar ganz aufgegeben und ohne weitere Abfalleinlagerung verfüllt und verschlossen werden kann. Dies kann auch unter Aufgabe entsprechender Gerätschaften wie etwa des Lagertrolleys, geschehen.

Ein *Versagen von Bentonitauflagern* ist nicht zu erwarten, weil bei einer denkbaren lokalen Überbeanspruchung eines Auflagers die angrenzenden Bentonitblöcke zum Tragen kommen. Die mechanische Beanspruchung der Auflagerblöcke ist sehr gering und eine Entfestigung durch Feuchtigkeitsaufnahme wird durch die Belüftung der Lagerstollen einerseits und die unmittelbar nach dem Positionieren eines BE/HAA-Behälters eingebrachte Granulatverfüllung

andererseits vermieden. Die Bentonitauflager werden zudem erst beim Abstellen des Einlagerungspakets im Lagerstollen belastet, weil die Behälter erst dort auf die Auflager abgestellt werden.

5.7.5 Einlagerung LMA

5.7.5.1 LMA-1

Die maximale Fallhöhe bei einem *Gebindeabsturz in der Umladestation LMA-1* beträgt ca. 4 m. Untersuchungen im Projekt SMA haben gezeigt, dass für Betoncontainer auch bei grösseren Fallhöhen nicht mit radioaktiver Freisetzung zu rechnen ist. Bei *Blockierung der Krane* wird die Intervention fallweise festgelegt.

Die Führung des *Luftkissenfahrzeugs* in den Transportgassen der Lagertunnels wird durch die Auflagerkonsolen gebildet (Fig. 5.12). Die engen Platzverhältnisse sichern einerseits eine einwandfreie Vorwärtsbewegung des Fahrzeugs ohne *Verklemmen* desselben, andererseits dienen die Konsolen in jeder Transportposition als Auflager für den Containerstapel bei *Druckluftverlust*.

Versagt der Horizontalantrieb des Luftkissenfahrzeugs, wird der Containerstapel durch Reduktion der Druckluftzufuhr auf die Auflagerkonsolen abgesetzt und das Luftkissenfahrzeug am Sicherungskabel in die Umladestation zurückgezogen und repariert.

5.7.5.2 LMA-2

Eine Intervention wird fallweise festgelegt.

5.7.6 Einsatzbereich der Lokomotiven im Betriebstunnel

Die Zahnradlokomotiven sind zur Überwindung der Höhendifferenz zwischen der oberirdischen Empfangsanlage und dem ca. 620 m tiefer liegenden Zentralen Bereich vorgesehen. Sie können aber auch bei Ausfall der Stollenlokomotive im Betriebstunnel BE/HAA und LMA eingesetzt werden (siehe Kap. 5.2.3). Dies bedingt, dass das Normalprofil dieser Tunnel entsprechend ausgelegt wird (Beilage 3-6). Wird auf diese Option verzichtet, kann die Höhe des Betriebstunnels BE/HAA geringfügig vermindert werden, weil die Stollenlokomotive ein kleineres Lichtmass verlangt. Im Betriebstunnel LMA ist diese Verminderung nicht möglich, weil die Lagercontainer LC2 das Normalprofil bestimmen.

Ein Verzicht auf die Stollen- und evtl. auch auf die Akkulokomotive mit Bedienung der Einlagerungsstellen durch eine Zahnradlok wird trotz geringer Auslastung der Lokomotiven nicht empfohlen, weil dann auch alle Abzweiger und Schleusen BE/HAA auf das grössere Lichtraumprofil der Zahnradlokomotive ausgelegt werden müssten und die Flexibilität des Lagerbetriebs leiden würde.

Die im vorliegenden Referenzprojekt vorgeschlagene Lösung ist bautechnisch konservativ und favorisiert die Flexibilität und Sicherheit des Lagerbetriebs. Sie kann in der weiteren Projektbearbeitung problemlos angepasst werden.

6 Betriebssicherheit und Strahlenschutz

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird die Sicherheit der Lageranlage während der Betriebsphase diskutiert. Diese Diskussion umfasst neben dem anlageninternen Transport und den untertägigen Anlagen auch die Empfangsanlage mit ihren Umschlagszellen und dem Pufferlager. Es wird gezeigt, dass sowohl während der Einlagerung als auch in Phasen ohne Einlagerung eine genügende Sicherheit erwartet werden kann. Dem frühen Projektstand entsprechend wird auf eine detaillierte quantitative Analyse verzichtet; es wird vielmehr auf eine qualitative Diskussion und auf Quervergleiche mit bestehenden Anlagen mit ähnlichen Eigenschaften abgestützt.

Dieses Kapitel ist in vier Abschnitte gegliedert:

- Im ersten Abschnitt wird die Zielsetzung und das grundsätzliche Vorgehen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit dargelegt.
- Im zweiten Abschnitt wird die radiologische Sicherheit in der Betriebsphase während Normalbetrieb und bei Betriebsstörungen, Zwischenfällen und Unfällen diskutiert. In Anlehnung an Betriebssicherheitsanalysen von ausländischen geologischen Lagern werden die Anforderungen an die Anlage aufgezeigt und die zu treffenden Massnahmen für die Sicherheit bei Normalbetrieb und zur Vermeidung bzw. zur Reduktion der radiologischen Auswirkungen spezifischer Störfälle aufgelistet. Dazu wird auch ein vereinfachter Störfallkatalog entwickelt, und es werden Hinweise auf die Umsetzung der notwendigen Massnahmen gemacht. Die systematische Auflistung der notwendigen Massnahmen ergänzt die in Kapitel 2 gemachten Vorgaben. Die Diskussion der getroffenen Massnahmen erfolgt dann im dritten Abschnitt.
- Im dritten Abschnitt werden die für den Betrieb vorgesehenen Sicherheitsmassnahmen des vorliegenden Referenzprojektes dargestellt. Bei sicherheitsrelevanten Aspekten, welche bereits an anderen Stellen dieses Berichtes erwähnt sind, werden Querverweise angegeben.
- Der letzte Abschnitt beinhaltet eine Bewertung der Betriebssicherheit.

6.2 Zielsetzung und grundsätzliches Vorgehen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit

6.2.1 Zielsetzung

Das Ziel aller sicherheitsorientierten technischen, betrieblich-administrativen und überwachten Massnahmen bei einem geologischen Tiefenlagers BE/HAA/LMA ist

- die Vermeidung von Betriebsstörungen, Zwischenfällen und Unfällen sowie
- die Vermeidung unzulässiger Strahlenexposition des Betriebspersonals und Besuchern sowie der Bevölkerung in der Umgebung der Lageranlage.

Für den Normalbetrieb ist das ALARA-Prinzip zu berücksichtigen.

Weil für geologische Tiefenlager noch keine behördlichen Richtlinien bezüglich Betriebssicherheit und Strahlenschutz vorliegen, wird beim vorliegenden Referenzprojekt von den Vorgaben in der HSK Richtlinie R-14 (HSK 1988) für Zwischenlager ausgegangen. In Zwischenlagern werden während der Betriebsphase dieselben Abfälle in vergleichbarer Weise gehandhabt.

Weiter werden die Vorgaben in der Strahlenschutzverordnung (StSV 1994), insbesondere Art. 94, Störfallvorsorge, berücksichtigt.

6.2.2 Grundsätzliches Vorgehen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit

Die Betriebssicherheit eines Lagers BE/HAA/LMA wird sichergestellt durch:

- Festlegung von Anforderungen an die einzulagernden Abfälle (Verfestigung, Verpackung),
- Technische Massnahmen (Gestaltung des Bauwerkes und Auslegung der technischen Einrichtungen und Geräte),
- Betrieblich-administrative Massnahmen (Festlegung der Arbeitsabläufe und des Personalverhaltens),
- Überwachende Massnahmen (Zugangskontrolle, Strahlenüberwachung an kritischen Punkten, Personendosimetrie, kritische Betriebsparameter).

Im nachfolgenden Abschnitt werden die aus diesen Grundsätzen abgeleiteten Anforderungen an die Anlage sowie die zu treffenden Massnahmen diskutiert.

6.3 Radiologische Sicherheit in der Betriebsphase

6.3.1 Einleitung

Die Vermeidung unzulässiger Strahlenexposition des Betriebspersonals und von Besuchern sowie der Bevölkerung in der Umgebung der Lageranlage geschieht durch eine genügende Abschirmung der Abfälle und Verhinderung der Freisetzung von Radionukliden, durch Vermeidung von Fehlmanipulationen bzw. von fehlerhaften Abläufen, welche potenziell zu radiologischen Konsequenzen führen könnten sowie durch die Verhinderung des unbefugten Zutritts von Personen in kritische Bereiche.

Durch Überwachungsmassnahmen wird sichergestellt, dass die Vorgaben eingehalten und Abweichungen frühzeitig festgestellt und Korrekturmassnahmen umgehend eingeleitet werden können.

Falls es trotzdem zu einer Betriebsstörung oder einem Zwischen- bzw. Unfall kommen sollte, sind Vorkehrungen (Auslegung, administrative Massnahmen) zu treffen, um die Anlage in einen stabilen sicheren Zustand zu bringen, und es ist sicherzustellen, dass die Radioaktivität eingeschlossen bleibt bzw. weitgehend zurückgehalten wird (Einschluss der Abfälle in Transport- bzw. Lagerbehälter, Verwendung von geschlossenen Zellen für kritische Handhabungsschritte bzw. Verwendung von Abluftfiltern).

Entsprechend der HSK Richtlinie R-14 (HSK 1988) und in Übereinstimmung mit der Strahlenschutzverordnung (StSV 1994) wird die Sicherheit für die beiden Betriebszustände "Normalbetrieb" und "Störfälle" (Betriebsstörungen, Zwischen- und Unfälle) getrennt diskutiert. "Normalbetrieb" wird definiert als alle Arbeiten, die für einen reibungslosen Betrieb aller Anlagen des geologischen Tiefenlagers notwendig sind. "Betriebsstörungen, Zwischen- und Unfälle" stellen Abweichungen vom Normalbetrieb dar und unterscheiden sich in ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit und der entsprechend zulässigen Dosisbelastung für die verschiedenen Personengruppen.

Im Bezug auf die Sicherheit bei der Handhabung von Gebinden mit radioaktiven Behältern besteht sehr viel Erfahrung, auf welche die Analyse der Betriebssicherheit für ein geologisches Tiefenlager abgestützt werden kann. Deshalb kann im gegenwärtigen Projektstand auf eine quantitative Analyse verzichtet werden, da bezüglich der relevanten Handhabungsschritte Analogien bestehen, welche die entsprechenden Rückschlüsse erlauben.

Der Schwerpunkt wird deshalb in den nachfolgenden Abschnitten auf die qualitative Diskussion des Normalbetriebs und möglicher Störfälle gelegt, und es wird aufgezeigt, dass diese durch die Anlagenauslegung und andere Massnahmen beherrscht werden können bzw. dass damit eine unzulässige Radionuklidfreisetzung verhindert werden kann.

6.3.2 Normalbetrieb

Im Normalbetrieb ist die radiologische Sicherheit bezüglich Direktstrahlung sowie Inkorporation/Inhalation von radioaktiven Stoffen sicherzustellen. Dies wird mit einem geeigneten Betriebs- und Strahlenschutzkonzept erreicht, wo definiert wird, wann und wo welche Personengruppen (Personal, Besucher) Zugang haben müssen bzw. Zutritt haben dürfen und die entsprechend zulässige Aufenthaltsdauer spezifiziert ist. Im weiteren wird festgelegt, welche Anforderungen die verschiedenen Bereiche bezüglich Direktstrahlung bzw. Kontamination zu erfüllen haben und wie die Einhaltung der Vorgaben überwacht wird. Dazu wird wiederum auf die entsprechenden Richtlinien der HSK und auf die Vorgaben in der Strahlenschutzverordnung abgestützt.

Bei der Diskussion der Sicherheit des vorgeschlagenen Tiefenlagers ist es zweckmässig, zwischen der Empfangsanlage mit Umschlag und Verpackung der Abfälle sowie dem anlagen-internen Transport und den untertägigen Anlagen (insbesondere Lagerstollen und Lagertunnel) zu unterscheiden und eine kurze Betrachtung der Gesamtanlage vorzunehmen.

6.3.2.1 Empfang und Umschlag

Der Antransport der Abfälle geschieht in Transportbehältern, welche eine ausreichende Abschirmung und auch eine genügende Dichtheit aufweisen. Die Handhabung der Transportbehälter erfolgt so weit wie möglich fernbedient. Der Umschlag bzw. die Verpackung der Abfälle erfolgt weitgehend durch Fernhantierung in geschlossenen Zellen mit genügender Abschirmung. Die beschränkten Kontaktzeiten bei der Beladung bzw. Entladung der Transportmittel sowie die Abschirmung und die geeignete Auslegung der Lüftung sorgen dafür, dass die Dosen für das Personal und auch für die Bevölkerung klein sein werden.

Die Lüftung ist so ausgelegt, dass ein ausreichender Unterdruck zur Atmosphäre besteht und dass eine gerichtete Luftströmung von Räumen mit geringen zu Räumen höheren Kontaminationspotentials aufrecht erhalten bleibt. Weiter wird sichergestellt, dass die Umschlag- und Verpackungszellen eine genügend kleine Leckrate aufweisen. Bei Bedarf besteht die Möglichkeit, die Abluft zu filtern. Wo notwendig, wird die Lüftungsanlage redundant ausgelegt.

6.3.2.2 Interne Transporte und Anlagen unter Tag

Es wird zwischen Einlagerungs- und Ruhebetrieb unterschieden: Im Einlagerungsbetrieb werden Gebinde gehandhabt, im Ruhebetrieb sind die Abfälle entweder in ihrer Einlagerungsposition (BE- bzw. HAA-Behälter in den teilverfüllten Lagerstollen, LMA in Betoncontainern in den offenen LMA Lagertunneln) oder im Pufferlager in der oberirdischen Empfangsanlage.

Für das Personal sind beide Zustände zu betrachten, während für Besucher nur der Ruhebetrieb zu untersuchen ist. Für die Umgebung sind wiederum beide Betriebszustände zu diskutieren.

Da die BE/HAA in dichten Lagerbehältern verpackt sind, können diese Gebinde nur über Direkt- bzw. Streustrahlung zu einer Dosisbelastung führen. Der anlageninterne Transport erfolgt fernbedient und wird deshalb im Normalbetrieb nicht zu relevanten Dosisbelastungen führen. Zusätzlich werden für die BE/HAA Transportcontainer mit einer Abschirmung verwendet, damit der direkte Zugang für Interventionen im Falle von Betriebsstörungen möglich ist. Auch die Einlagerung der BE-/HAA-Behälter (Ausladen der Abfallbehälter aus den Transportbehältern und Lagerung in definitive Position im Lagerstollen) erfolgt ferngesteuert, so dass die Direktstrahlung durch die unabgeschirmten Lagerbehälter keine Anforderungen stellt. Sobald die Lagerbehälter in ihrer definitiven Position sind, wird durch die Verfüllung der entsprechenden Stollenabschnitte sowie allfällige weitere bauliche bzw. temporäre Massnahmen sichergestellt, dass in den zugänglichen Räumen keine unzulässige Strahlung besteht. Damit sind Personal und Besucher geschützt.

Bei den LMA ist potenziell die Freisetzung volatiler Nuklide von Bedeutung. Bezüglich der effektiv zu erwartenden Freisetzungsraten kann in einem späteren Projektstadium auf die konkrete Erfahrung in Zwischenlagern zurückgegriffen werden. Für die LMA wird die Luft in den Lagertunneln bis zu deren Verschluss überwacht. Falls sich unerwarteterweise eine signifikante Kontamination zeigen sollte, würde die Abluft in einem By-Pass System gefiltert.

6.3.2.3 Gesamtanlage

Die luft- und wassergetragenen Abgaben an die Umwelt werden überwacht. Die durch Personal bzw. Besucher zugänglichen Räume werden durch geeignete Messeinrichtungen bzgl. Strahlung und Kontamination überwacht; die Messwerte werden im Kommandoraum angezeigt und registriert. Personal und Besucher werden je nach Aufenthaltsorten mit Dosimetern ausgerüstet. Ebenso wird die Strahlung "am Zaun" der Aussenanlagen überwacht. Damit ist sichergestellt, dass allfällige Abweichungen sofort erkannt und behoben werden.

6.3.3 Sicherheit bei Störfällen

6.3.3.1 Allgemeines

Um die radiologische Sicherheit der in diesem Bericht vorgestellten Referenzanlage im Bezug auf Störfälle abzuschätzen, wird in einem ersten Schritt ein genereller Störfallkatalog zusammengestellt, entsprechend dem Stand des Projektes. Dazu werden Ereignisabläufe untersucht, die während der Betriebszeit der Anlage zu einer Freisetzung von Radioaktivität führen könnten. Dabei wird zwischen Störfällen unterschieden, die durch besondere Massnahmen vermieden werden und solchen, die in ihren radiologischen Auswirkungen durch spezifische Massnahmen so zu begrenzen sind, dass die Schutzziele für die verschiedenen Personengruppen eingehalten werden können.

6.3.3.2 Störfallkatalog

Im internationalen Rahmen besteht einige Erfahrung mit der Analyse der Betriebssicherheit von geologischen Lagern, wie z.B. in Kanada (Grondin et al. 1994), den USA (Kappes 1998) und Deutschland (BFS 1990), auf welche hier zurückgegriffen wird. Im weiteren sind hier die Nagra-Arbeiten zum Projekt Gewähr (Nagra 1985) sowie für das SMA-Lager zu nennen.

Störfälle können zu

- einer mechanischen Belastung,
- einer thermischen Belastung,
- einer Kombination von mechanischer und thermischer Belastung

führen. Als auslösende Ereignisse werden äussere Einwirkungen und interne Störungen betrachtet. Bei den äusseren Einwirkungen sind dies:

- Erdbeben,
- Störungen des elektrischen Systems,
- Überflutung,
- Grundwasseraufstieg,
- Flugzeugabsturz,
- Auswirkungen allfälliger Störfälle wie Brand und Explosion in Anlagen in der Umgebung der Aussenanlagen und des Schachtkopfbereichs.

Zusätzlich sind unter den äusseren Einwirkungen auch Fragen zur Sicherung (Sabotageschutz) zu betrachten, und die diesbezüglich notwendigen Vorkehrungen sind zu treffen.

Als interne Störungen sind grundsätzlich zu prüfen:

- Kollision von Transportmitteln,
- Brand,
- Explosion,
- Steinfall / Wassereinbruch / Überflutung.

Von diesen grundsätzlichen auslösenden Ereignissen können voraussichtlich im Verlaufe der Konkretisierung des Projektes verschiedene Ereignisse wegen der lokalen Bedingungen bzw. wegen der Anlagenauslegung ausgeschlossen werden.

Unter Berücksichtigung der auslösenden Ereignisse kann ein Störfallkatalog erstellt werden, der entsprechend dem heutigen Projektstand von beschränktem Detaillierungsgrad ist. In diesem Katalog werden ähnliche Störfälle zu Störfallgruppen zusammengefasst, wobei die jeweils kritischen Störfälle beschrieben und für die Anlagenauslegung als sogenannte Auslegungsstörfälle unterstellt werden. Dabei wird unterschieden zwischen

- Störfällen, deren Eintritt durch entsprechende Massnahmen *vermieden* werden (Tabelle 6.1) und
- Störfällen, deren radiologische Auswirkungen beim Störfalleintritt durch entsprechende Massnahmen so *begrenzt* werden, dass die Schutzziele eingehalten werden können (Tabelle 6.2).

Störfallgruppe	Störfalldefinition/Ereignis	Bemerkungen
1 Übertägige Anlage		
1.1 Kollision von Transportmitteln mit Brand	Mechanische und thermische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge Kollision mit Brand des Transportmittels	Diese Störfälle bzw. eine Freisetzung radioaktiver Stoffe werden durch Massnahmen der Verkehrsführung sowie des aktiven und passiven Brandschutzes sowie durch Auslegung der Transportcontainer vermieden.
1.2 Brand Transportmittel	Thermische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge Fahrzeugbrand	siehe 1.1
1.3 Absturz von Transportcontainern bei Handhabung	Absturz von Transportcontainern von Transportmitteln oder Umschlagseinrichtungen (z. B. Kran) auf den Boden	Keine radiologischen Konsequenzen wegen der kleinen Fallhöhen und der Barrierenwirkung der Transportcontainer.
1.4 Anlageninterner Brand	Thermische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge anlageninternen Brand (z. B. Brand in der elektrischen Anlage)	siehe 1.1
1.5 Anlageninterne Explosion	Mechanische und thermische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge Explosion (z. B. Explosion von Chemikalien)	Diese Störfälle bzw. eine Freisetzung radioaktiver Stoffe werden durch Massnahmen des aktiven und passiven Brandschutzes sowie durch Explosionsschutzmassnahmen vermieden.
1.6 Hochwasser, Blitzschlag, Wind, Eis, Schnee, Explosion und äussere Brände	Äusserer Brand/Explosion	Eine Freisetzung radioaktiver Stoffe wird durch Massnahmen des aktiven und passiven Brand- bzw. Explosionsschutzes vermieden.
	Naturbedingte Einwirkungen	Eine Freisetzung radioaktiver Stoffe wird durch geeignete standortabhängige Massnahmen (z. B. Hochwasserschutz, Blitzschutzanlagen) vermieden.
1.7 Erdbeben	Erdbebenauswirkungen auf Abfallgebinde bei Umschlag bzw. Umlad	Eine Freisetzung radioaktiver Stoffe wird durch die erdbebensichere Auslegung der Bauten sowie der technischen Komponenten vermieden.
2 Interner Transport		
2.1 Absturz von Abfallgebinden beim internen Transport	Mechanische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge Versagen der Transportmittel	Durch Auslegung vermeiden, siehe 2.2.
2.2 Absturz von Lasten auf Abfallgebinde beim internen Transport	Mechanische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge Lastabsturzes, Versagen technischer Einrichtungen, Steinschlag, etc.	Diese Störfälle bzw. eine Freisetzung radioaktiver Stoffe wird durch Auslegung und Betrieb der Transportmittel und Auslegung der Anlage, inkl. Unterhalt, vermieden.
2.3 Anlageninterner Brand	Thermische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge anlageninternen Brand	Diese Störfälle bzw. eine Freisetzung radioaktiver Stoffe werden durch Massnahmen des aktiven und passiven Brandschutzes vermieden.
2.4 Erdbeben	Erdbebenauswirkungen auf interne Transportmittel	Eine Freisetzung radioaktiver Stoffe wird durch die erdbebensichere Auslegung der Transportmittel vermieden.
3 Untertägige Anlage		
3.1 Steinfall	Absturz von Gestein auf Abfallgebinde	Durch technische Vorkehrungen wird Steinfall vermieden und dadurch auch eine diesbezügliche Freisetzung radioaktiver Stoffe.
3.2 Kollision von Transportmitteln mit und ohne Brand	Mechanische und thermische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge Kollision des Transportmittels	Diese Störfälle bzw. eine Freisetzung radioaktiver Stoffe werden durch Massnahmen der Verkehrsführung (Schiene) und den Brandschutz sowie durch Auslegung der Transportcontainer vermieden.
3.3 Anlageninterne Explosion	Mechanische und thermische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge Explosion	Diese Störfälle bzw. eine Freisetzung radioaktiver Stoffe werden durch technische und administrative Massnahmen vermieden.

Tab. 6.1 Auslegungsstörfälle, welche durch Auslegung der Anlage bzw. Abfallgebinde *vermieden* werden

Störfallgruppe	Ereignis	Lastannahme	Bemerkungen
1 Uebertätige Anlage Absturz von Abfällen bei der Handhabung in den Umschlagszellen	Absturz von Abfallgebinden (z.B. inkl. Kran) auf den Boden	Prall*	radiologische Auswirkungen wegen Zellenauslegung (Dichtheit, Lüftung) und wegen beschränkter Fallhöhe klein
2 Anlageninterner Transport	Absturz von Transportbehältern während des internen Transportes	Prall*	radiologische Auswirkungen wegen beschränkter Fallhöhe und wegen Barrierenwirkung der Transportbehälter klein
3 Untertägige Anlage Absturz von Abfallgebinden bei der Handhabung	Absturz von Transportbehältern oder Lagerbehälter von Transportmitteln oder Umschlagseinrichtungen	Prall*	radiologische Auswirkungen wegen beschränkter Fallhöhe und wegen Barrierenwirkung der Behälter klein

* Unter Prall wird ein Stoss oder eine stossartige Belastung der Abfallgebände verstanden

Tab. 6.2 Auslegungsstörfälle, die in ihren radiologischen Auswirkungen auf die Umgebung durch die Auslegung der Anlage bzw. der Abfallgebände *begrenzt* werden

Basierend auf der Zusammenstellung der Auslegungsstörfälle in den Tabellen 6.1 und 6.2 können die Systeme, Ausrüstungs- und Bauteile sowie die organisatorischen Massnahmen identifiziert werden, die für die Gewährleistung des sicheren Betriebes bzw. den sicheren Einschluss der Radioaktivität wichtig sind. Es sind dies

- die übertägigen Umschlags- bzw. Verpackungszellen,
- die Handhabungsvorgänge und -geräte,
- der Ausbau der untertägigen Bauten, inkl. mechanischer Sicherung der technischen Installationen,
- die Transportmittel und die Verkehrsführung,
- der Brand- und Explosionsschutz.

Um die Funktion obiger Elemente sicherzustellen sowie für die zugehörige Überwachung und allfällige Evakuationen und Interventionen sind zusätzlich folgende Elemente wichtig:

- Überwachung,
- Lüftung,
- elektrische Systeme,
- Flucht- und Interventionswege.

6.3.3.3 Massnahmen zur Vermeidung von Störfällen

Für die am Ende von Abschnitt 6.3.3.2 identifizierten Systeme, Ausrüstungs- und Bauteile sowie die organisatorischen Massnahmen werden nachfolgend die sicherheitsrelevanten Aspekte und die speziellen Massnahmen unter dem Gesichtspunkt der Vermeidung von Störfällen diskutiert. Dazu gehören auch Massnahmen, welche die Auswirkungen konventioneller Störungen soweit eingrenzen, dass es zu keiner Freisetzung von Radioaktivität kommt.

Oberflächenanlagen: Die Oberflächenanlagen sind gegen äussere Einwirkungen (Hochwasser, Grundwasseraufstieg, Blitzschlag, etc.) zu sichern.

Umschlags- bzw. Verpackungszellen: Zusätzlich zu den für alle Oberflächenanlagen vorgesehenen Massnahmen sind die Umschlags- bzw. Verpackungszellen gegen Erdbeben und äussere Belastung (z.B. Flugzeugabsturz) auszulegen.

Transportabschirmung, Transport- und Lagercontainer: Diese sind so auszulegen, dass es bei konventionellen Betriebsstörungen (z.B. kleine Prallbelastungen) zu keiner Beschädigung der Abfallbehälter bzw. Freisetzung von Radioaktivität kommt. Damit werden Behälterabsturz bei der über- und untertägigen Handhabung sowie die Entgleisung von Transportmitteln abgedeckt.

Handhabungsvorgänge und -einrichtungen: Die Handhabungseinrichtungen sind nach den Regeln der Technik auszulegen. Dazu gehört z.B. auch die Verhinderung von Kranabsturz (z.B. bei einem Erdbeben) durch geeignete konstruktive Massnahmen.

Transporteinrichtungen: Die Verkehrsführung ist durch technische Massnahmen (Schienenbetrieb, Steuerung) und organisatorische Massnahmen so zu regeln, dass eine Kollision ausgeschlossen werden kann.

Kritische Handhabungs- und Transporteinrichtungen sind so auszulegen, dass sich die Anlage bei Betriebsstörungen (Stromausfall, Versagen einer Antriebskomponente, etc.) selbsttätig in einen sicheren Zustand bringt ("fail-safe"). Bei den schienengebundenen Transporteinrichtungen kann dies z.B. durch eine auf die Schiene wirkende Notbremse geschehen.

Die Sicherheit bei Entgleisungen mit nachfolgender mechanischer Belastung der Transportbehälter ist durch entsprechende Auslegung der Transportbehälter zu gewährleisten.

Ausbau der untertägigen Bauten zur Verhinderung von Einsturz, Steinfall, Wassereinbruch und Absturz mechanischer Einrichtungen: Durch die geologische Charakterisierung sind die in-situ Bedingungen sehr gut bekannt. Bei der Auslegung der Anlage und allfälligen Unterhaltsmassnahmen sind die standortspezifischen Bedingungen adäquat zu berücksichtigen, so dass diese Ereignisse ausgeschlossen bzw. durch ingenieurmässige Massnahmen, inkl. Unterhalt, beherrscht werden können (z.B. redundante Pumpen und genügend grosse Auffangbecken für evtl. Wasserzutritte). Die technischen Anlagen unter Tag sind gegen Erdbeben auszulegen, wobei die baulichen Anlagen insbesondere im Portalbereich diesbezüglich zu überprüfen sind.

Brandschutz: Zur Brandbegrenzung ist die Anlage in Brandzonen aufzuteilen (baulicher Brandschutz). Dazu sind Bauelemente mit definiertem Feuerwiderstand zu verwenden und die Lüftung entsprechend auszulegen (z.B. Brandschutzklappen). Die Brandgefahr ist durch Verwendung nicht brennbarer oder schwer entflammbarer Baustoffe klein zu halten. Weiter sind die Brandlasten bei Handhabungs- und Transportgeräten möglichst klein zu halten.

An kritischen Stellen ist eine Überwachung mit Brandmeldeanlagen vorzusehen und in den Oberflächenanlagen sind bei Bedarf (insbesondere bei Bestehen grösserer Brandlasten) Brandbekämpfungsanlagen (Sprinkler- oder Sprühflutanlagen) zu installieren (technischer Brandschutz). Zusätzlich sind Massnahmen zur Brandverhütung sowie vorbereitende Massnahmen zur Brandbekämpfung vorzusehen (organisatorischer Brandschutz).

Explosionsschutz: Der Explosionsschutz ist in den Brandschutz zu integrieren und muss die Vermeidung bzw. Reduktion von explosiven Materialien auf unkritische Werte sowie bei

Bedarf die bauliche Abgrenzung kritischer Bereiche (z.B. für die Lagerung explosiver Stoffe) beinhalten.

Überwachung: Der Betriebsablauf und die kritischen Anlagenparameter (z.B. Temperatur, Gaskonzentration, Rauch, Strahlung, etc.) sind an relevanten Orten laufend zu überwachen, damit Abweichungen frühzeitig erkannt und behoben werden können.

Flucht- und Interventionswege: Für den Fall von Betriebsstörungen sind Flucht- und Interventionswege vorzusehen. Dies ist für übertägige Anlagen einfach zu realisieren. Die untertägigen Anlagen sind neben der Rampe auch mit einem Schacht zu erschliessen.

Lüftung: Die Lüftung ist so auszulegen, dass konventionelle Betriebsstörungen (insbesondere Brandfälle) beherrscht werden. Dazu gehören Brandklappen und die Möglichkeit zur Entqualmung. Weiter ist auf das Funktionieren des "fail-safe" Prinzips der Lüftung bei Betriebsstörungen zu achten (z.B. sicheres und automatisches Schliessen sämtlicher Klappen bei Ausfall der Lüftung). Bei Ausfall der Lüftung muss in kritischen Bereichen genügend Luftvolumen zur Verdünnung bzw. genügend Wärmesenken zur Wärmeabfuhr zur Verfügung stehen, sodass für genügend lange Zeiträume die Bildung kritischer Gaskonzentrationen bzw. unzulässiger Temperaturen ausgeschlossen werden kann.

Elektrisches System: Die unterbrechungslose Stromversorgung für Teile der Oberflächenanlagen ist durch redundante Systeme mit automatischer Zuschaltung sicher zu stellen. Ob dies auch für die Anlagen unter Tag zutrifft, ist im Rahmen der weiteren Planung zu überprüfen.

6.3.3.4 Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen

Für die am Ende von Abschnitt 6.3.3.2 identifizierten Systeme, Ausrüstungs- und Bauteile sowie die organisatorischen Massnahmen werden nachfolgend die sicherheitsrelevanten Aspekte und die speziellen Massnahmen unter dem Gesichtspunkt der Reduktion der Auswirkungen von Störfällen diskutiert.

Umschlag bzw. Verpackung der Abfälle in geschlossenen Zellen mit Lüftung und Filteranlage: Durch Umschlag und Verpackung der Abfälle in geschlossenen Zellen ist sicherzustellen, dass es bei allfälligen Störungen, welche zu einer Beschädigung der Abfälle führen könnten, zu keiner signifikanten Freisetzung von Radioaktivität kommt (Lüftung im Umluft- bzw. Filterbetrieb).

Handhabungsvorgänge und -einrichtungen: Die Handhabungseinrichtungen sind so auszulegen, dass nur minimale Hubhöhen bestehen, sodass der Energieeintrag bei Absturz klein ist.

Transporteinrichtungen: Durch ein schienengebundenes internes Transportmittel wird die Wahrscheinlichkeit einer Entgleisung mit nachfolgender Kollision und die Prallbelastung klein gehalten.

Transportabschirmung, Transport- und Lagercontainer: Diese sind so auszulegen, dass es bei Betriebsstörungen (z.B. Prallbelastung) zu keiner bzw. nur kleiner Freisetzung von Radioaktivität kommt. Damit werden Störfälle mit Behälterabsturz bei der über- und untertägigen Handhabung sowie die Entgleisung von Transportmittel abgedeckt. Die Behälter sind so auszulegen, dass sie einen genügenden Wärmewiderstand für kleinere Wärmelasten aufweisen.

Brandschutz: Durch den baulichen, technischen und organisatorischen Brandschutz ist sicherzustellen, dass die Abfallbehälter keinen signifikanten thermischen Lasten ausgesetzt werden.

Lüftung: Für Störfälle mit möglichen radiologischen Konsequenzen (insbesondere Störungen in den Umschlags- und Verpackungszellen) sind spezifische Massnahmen zu treffen (z.B. automatisches Schliessen von Klappen, Rezirkulation (Umluftbetrieb), Ableitung über Filteranlagen).

Überwachung: Der Betriebsablauf und die kritischen Anlagenparameter (z.B. Temperatur, Gaskonzentration, Rauch, Strahlung, etc.) sind an relevanten Orten laufend zu überwachen, damit Abweichungen frühzeitig erkannt und Massnahmen getroffen und damit die Auswirkungen auf Personal, Bevölkerung und Umgebung klein gehalten werden können.

Flucht- und Interventionswege: Für den Fall von Betriebsstörungen sind Flucht- und Interventionswege vorzusehen. Dies ist für übertägige Anlagen einfach zu realisieren. Die untertägigen Anlagen sind neben der Rampe auch mit einem Schacht zu erschliessen.

6.4 Sicherheitsmassnahmen in der Betriebsphase

Im vorliegenden Referenzprojekt sind zur Gewährleistung des sicheren Einlagerungsbetriebs die nachstehend beschriebenen Massnahmen vorgesehen. Diese decken die im vorhergehenden Abschnitt 6.3 identifizierten notwendigen Massnahmen vollumfänglich ab.

6.4.1 Schulung des Betriebspersonals

Für den Lagerbetrieb wird qualifiziertes Personal eingesetzt, welches eine fundierte Grundausbildung bezüglich Organisation, Betrieb, Arbeitssicherheit und Strahlenschutz erhalten hat. Es wird periodisch weitergeschult.

6.4.2 Lagerbetrieb: Steuerung und Überwachung

Zur Gewährleistung eines reibungslosen und sicheren Verkehrsablaufes wird das gesamte Verkehrsaufkommen sowohl über wie unter Tage vom zentralen Kommandoraum in der Empfangsanlage geleitet und überwacht sowie fernbediente Transporte bis in den Zentralen Bereich und ausnahmsweise auch im Lagerbereich von hier aus ausgeführt. Dazu werden entsprechende Signalanlagen und an Schlüsselstellen Videokameras installiert (Kap. 5.3.2).

Die Überwachung und Bedienung der wichtigsten Handhabungseinrichtungen und Geräte sowie die Steuerung technischer Einrichtungen und Anlagen ist ebenfalls vom zentralen Kommandoraum über Tage aus möglich. Die Steuerung der Krane und Manipulatoren in der Empfangsanlage erfolgen in der Regel von dort aus. Rangiermanöver im Zentralen Bereich sowie die weiteren Aktivitäten unter Tag werden aber hauptsächlich von örtlichen, z.T. mobilen Leitständen aus geleitet. Arbeiten, bei welchen keine bzw. nur eine unbedeutende Strahlenexposition erfolgt, werden durch die Betriebsmannschaft manuell ausgeführt.

6.4.3 Abfälle

BE und HAA-Behälter werden in verschweissten und damit dichten Gebinden (Fig. 2.5) einlagerungsbereit in den Aussenanlagen angeliefert oder, im Falle einer Integration der Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA in die Aussenanlagen der Portalzone, in dieser Anlage zur Endlagerung bereitgestellt (Kap. 3.2.2.3 und 5.2). Es ist deshalb nur die Direkt- und Streustrahlung während ihrer Handhabung im geologischen Tiefenlager von Bedeutung.

Die LMA sind in Stahl- und Betongebinden konditioniert (Fig. 2.6). Sie werden in entsprechenden, wieder verwendbaren Transportbehältern angeliefert. Mit Ausnahme der WA-COG-4

werden sie in Betoncontainer umgepackt und die Resthohlräume zementvergossen (Fig. 5.1). Auch für ihre Handhabung zur Einlagerung ist nur die Direkt- und Streustrahlung massgebend.

Dasselbe gilt auch für die in Transportabschirmungen anlagenintern zu transportierenden WA-COG-4.

6.4.4 Umschlag und Verpackung

Der Umschlag und die Verpackung der Abfälle im Betriebsgebäude der Empfangsanlage erfolgt weitgehend durch Fernbedienung in geschlossenen Zellen, womit eine genügende Abschirmung und der Einschluss allfälliger freier Kontamination sichergestellt ist. Die Handhabung der Abfälle erfolgt mit Geräten und in einer Art und Weise, welche auch bei Störungen und unerwünschten Ereignissen nur zu minimaler Beschädigung der Abfälle führen kann und keine Freisetzung von Radioaktivität zur Folge hat. Alle Anlagen werden so ausgelegt, dass nur geringe Hubhöhen zu realisieren sind.

6.4.5 Transportmittel

Der Transport von Abfallgebinden unter Tage wird mit der Zahnrad- und Stollenbahn abgewickelt. Die Auslegung dieser Transportmittel erfolgt nach den entsprechenden Normen und Richtlinien, wobei der Unfallverhütung speziell Rechnung getragen wird (Kap. 5.2.3 und 5.7.3).

Insbesondere das auf der Zugangsrampe eingesetzte Rollmaterial wird nach dem "fail-safe"-Prinzip ausgelegt, sodass sich Lokomotive(n) und Wagen bei Betriebsstörungen selbsttätig z.B. durch Notbremsung in eine sichere Position bringen und dadurch keine signifikante Beanspruchung der Transportabschirmungen und der Transport- und Lagercontainer erwartet werden muss.

Der schienengebundene horizontale Weitertransport von Abfällen und übrigen Materialien in der Lagerzone bietet optimale Voraussetzungen für einen unfallfreien und reibungslosen Betriebsablauf.

6.4.6 Einlagerung BE/HAA-Behälter

BE/HAA-Behälter werden fernbedient aus ihrer Abschirmung bzw. ihrem Transportcontainer herausgeschoben und vom Umsetzgerät auf den Einlagerungstrolley gebracht, welcher den Behälter samt Bentonitauflager in den Lagerstollen einfährt und in der vorgesehenen Lagerposition absetzt. Das hydraulische Umsetzgerät ist mehrfach gesichert und erlaubt zudem diverse Interventionsmöglichkeiten. Der Einlagerungstrolley ist einfach und robust gebaut und kaum störanfällig (Kap 5.2.4.1 und 5.7.4).

6.4.7 Einlagerung LMA

Die höchste Fallhöhe eines Lagercontainers in der Umladestation beträgt ca. 4 m. Untersuchungen haben gezeigt, dass solche Lagercontainer auch grössere Fallhöhen überstehen, ohne dass radioaktive Stoffe freigesetzt werden (Kap. 5.2.4.2 und 5.7.5).

Beim Verschieben des Containerstapels mit dem Luftkissenfahrzeug wird der Stapel um wenige Zentimeter angehoben. Bei einem Druckluftverlust würden sich die Luftkammern des Fahrzeugs entleeren und der Stapel würde auf die Auflagerkonsolen abgestellt. Durch die enge

Führung des Fahrzeugs ist ein Verklemmen desselben in der Transportgasse ausgeschlossen (Kap. 5.7.5).

6.4.8 Lüftungsanlage

Die Lüftungsanlage hat die Zufuhr von Frischluft in die Lageranlage sicherzustellen, wobei die Luft jeweils an den Lagerstollen- und Lagertunnelenden gefasst und über Rohre zurück und bis an die Erdoberfläche geführt wird (Kap. 3.4.1). Die Luft aus dem LMA-Lagerbereich wird kontinuierlich radiologisch überwacht und, falls volatile Nuklide festgestellt würden, der gesamte Abluftstrom über einen im By-Pass vorgesehenen Filter geführt. Dies könnte evtl. bei langjährigem Offenhalten der Lagertunnel – was im Referenzfall nicht vorgesehen ist – notwendig werden. Von den BE/HAA-Behältern kann keine Radioaktivität austreten.

Der Lüftung unter Tage kommt bezüglich Brandschutz eine grosse Bedeutung zu (Kap. 3.4.8).

6.4.9 Elektroversorgung

Die benötigte Leistung wird aus dem öffentlichen 16 kV-Hochspannungsnetz bezogen und redundant bei den Aussenanlagen der Portalzone bzw. den Anlagen im Schachtkopfbereich in die als Ringleitung konzipierte Versorgungsleitung unter Tage eingespiesen (Kap. 4.3.2).

Bei Stromunterbrüchen sind Notstromgeräte zum Betrieb sicherheitsrelevanter Anlagen vorgesehen. Ihre konkrete Auslegung erfolgt im Rahmen der weiteren Projektbearbeitung.

Im vorliegenden Referenzprojekt sind beide Zahnradlokomotiven und die Stollenlokomotive im Verbundbetrieb eingesetzt, d.h. dass bei Ausfall der externen Energiezufuhr automatisch die mitgeführten Akkumulatoren aktiviert werden. Die beiden übrigen Lokomotiven, die Winden- und Akkulok werden durch Akkumulatoren betrieben (Fig. 3.11 und Kap. 5.2.3.1).

6.4.10 Brandschutz

Trotz des geringen Brandpotentials wird ein umfassender Brandschutz der Lageranlage durch präventive, passive und aktive Brandschutzmassnahmen angestrebt. Insbesondere kommt der Vermeidung unnötiger Brandlasten und Zündquellen vorrangige Bedeutung zu (Kap. 3.4.8).

6.4.11 Überflutung der unterirdischen Anlagen

Der Wasserhaltung kommt sowohl beim Bau der untertägigen Anlage, wo im fallenden Vortrieb gearbeitet wird, wie im Einlagerungsbetrieb, wo ein Einfliessen von Wasser in die Lagerstollen BE/HAA vermieden werden muss, eine besondere Bedeutung zu. Auf die während des Baus geplanten Massnahmen ist in Kap. 4.2.2 und 4.3 näher eingegangen worden und die Aspekte der Wasserhaltung während des Einlagerungsbetriebs sind in Kap. 3.4.3 detaillierter beschrieben.

Es sei an dieser Stelle nochmals vermerkt, dass alle belegten BE/HAA-Lagerstollen an ihren beiden Enden mit Abschlüssen gesichert sind (Kap. 5.2.4). Effektiv offen und durch Einlagerungsarbeiten belegt sind in der Regel zwei, ausnahmsweise drei Lagerstollen, welche notfalls z.B. im Bereich der Abzweiger kurzfristig und temporär geschlossen werden könnten.

Die Versorgung der Pumpanlagen mit elektrischer Energie erfolgt über die redundant eingespiessene Ringleitung und bei Ausfall der externen Stromzufuhr über Notstromaggregate.

6.4.12 Strahlenschutzzone

Zur Vermeidung einer unzulässigen Strahlenexposition des Betriebspersonals, von Besuchern und der Bevölkerung in der Umgebung einer Kernanlage wird für das geologische Tiefenlager eine Strahlenschutzzone festgelegt. Die Grundlagen dazu sind die Strahlenschutzverordnung (StSV 1994) und die HSK Richtlinie R-07 (HSK/KSA 1995), welche einen überwachten Bereich vorsehen, der seinerseits wieder unterteilt wird in eine kontrollierte und eine nicht kontrollierte Zone. Weitere Angaben dazu finden sich in Kap. 3.6, wo auch die Aufteilung und Zuordnung in Zonentypen und Gebiete umschrieben ist.

6.4.13 Strahlenschutzüberwachung

Die Strahlenschutzüberwachung umfasst neben der Personendosimetrie für Betriebspersonal und Besucher auch die präventive raum- und gegenstandsbezogene Strahlenschutzüberwachung der Arbeitsplätze, Aufenthaltsbereiche und der Strahlenquellen, wie sie in Kap. 5.5 kurz erläutert sind. Im weiteren kann auch die Emissionsüberwachung dazu genommen werden, wie sie in Kap. 3.4.1, 3.4.4 und 5.4 erwähnt ist.

6.4.14 Sicherung gegen Einwirkungen Dritter

Ziel der Sicherung ist, die durch unbefugte Einwirkung verursachte Beeinträchtigung der nuklearen Sicherheit, die gezielte Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt und die Entwendung von Kernmaterialien zu verhindern (BFE 2001). Dieses Ziel soll neben der zweckmässigen Auslegung der Anlage durch diverse weitere Massnahmen erreicht werden, die im Zuge der weiteren Projektierung in Absprache mit den zuständigen Behörden festzulegen sind.

6.5 Bewertung der Betriebssicherheit

6.5.1 Auslegung der Anlage und Betriebsabläufe

Im Vergleich zu anderen Kernanlagen handelt es sich bei einem geologischen Tiefenlager um eine einfache Anlage, wo nur kleine Energiedichten vorhanden sind. Auch wenn weltweit noch keine BE/HAA/LMA Lager im Betrieb sind, so sind die während der Betriebsphase vorgesehenen Abläufe und die zur Anwendung gelangenden Geräte und Installationen vergleichbar mit heute im Betrieb stehenden Kernanlagen wie z.B. Zwischenlagern.

Die in der Empfangsanlage vorgesehenen Abläufe werden in Zwischenlagern routinemässig durchgeführt, und es besteht diesbezüglich viel Erfahrung.

Für den internen Transport wird auf bewährte konventionelle Technik abgestützt (Schiene, teilweise spezifisch für Untertagbau), wo viel Erfahrung besteht für "fail-safe" Systeme (z.B. schienengebundene Notbremssysteme). Für die untertägige Handhabung wird wiederum auf bewährte Technik abgestützt.

6.5.2 Bewertung des Normalbetriebs

Die guten Möglichkeiten zur Abschirmung (Transportbehälter, Zellen) verbunden mit weitgehender Fernbedienung ergeben, dass Direkt- und Streustrahlung problemlos beherrschbar sind. Bezüglich Kontamination könnten evtl. einzelne LMA bei längerdauerndem Offenhalten der Lagertunnel geringe Mengen an volatilen Nukliden freisetzen. Dieser Eventualität ist mit dem vorgesehenen Lüftungskonzept, wo die Abluft am Lagertunnelende abgesogen und überwacht

wird und bei Bedarf über Filter geführt werden kann, bereits Rechnung getragen (Kap. 3.4.1 und 3.6.3).

Die Machbarkeit dieser Massnahmen wird untermauert durch die Erfahrungen in den zahlreichen heute bestehenden Anlagen, wo ähnliche Handhabungsschritte routinemässig mit sehr kleiner Dosisbelastung durchgeführt werden. Das Anlagenkonzept bietet genügend Flexibilität, um bei Fortführung des Projektes in späteren Phasen spezifische Massnahmen zu definieren, um die Anlage bezüglich Normalbetrieb weiter zu optimieren.

6.5.3 Bewertung bezüglich Störfällen

Die Anlage wird so ausgelegt und die operationellen Massnahmen so definiert, dass das Eintreten von Störfällen mit radiologischen Konsequenzen sehr unwahrscheinlich ist. Bei Eintreten von (konventionellen) Betriebsstörungen wird durch Verwendung von Transportcontainern und die fernbediente Durchführung kritischer Handhabungsschritte in geschlossenen Zellen sichergestellt, dass keine signifikanten Mengen an radioaktiven Stoffen freigesetzt werden können und die Sicherheit von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. Diese Aussagen werden untermauert durch die Erfahrungen in den zahlreichen heute bestehenden Anlagen, wo ähnliche Handhabungsschritte routinemässig sicher durchgeführt werden.

Das Anlagenkonzept bietet genügend Flexibilität, um bei Fortführung des Projektes in späteren Phasen spezifische Massnahmen zu definieren, um bei Bedarf die Anlage an neue Erkenntnisse anzupassen.

7 Kontrolle und Überwachung, Physischer Schutz von Kernmaterialien (Safeguards)

7.1 Kontrolle und Überwachung

7.1.1 Einleitung

Kontrolle und Überwachung werden eine wichtige Rolle bei der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers einnehmen und einen entscheidenden Beitrag für den Abschluss bzw. die Weiterführung der verschiedenen Phasen der Lagerrealisierung leisten und letztlich auch das Vertrauen in die Langzeitsicherheit stärken.

Generell lässt sich Kontrolle und Überwachung exkl. Safeguards gemäss IAEA (IAEA 1998) definieren als

"kontinuierliche oder periodische Beobachtungen und Messungen von Ingenieurparametern, der Umgebung und radiologischer Werte, welche dazu beitragen, das Verhalten spezifischer Komponenten des Lagersystems oder die Auswirkungen des Lagers und seines Betriebes auf die Umgebung zu überprüfen".

Das Verfahren, welches zu einem betriebsbereiten Tiefenlager für hochaktive Abfälle führt, ist voraussichtlich relativ lang. Ebenfalls längere Zeit könnte vergehen bis der Entscheid zum Lagerverschluss getroffen sein wird. Dies wird erlauben, auch umfangreiche, mehrjährige Messreihen zu erheben. Nach dem Lagerverschluss muss die Langzeitsicherheit jedoch ohne Überwachungsmassnahmen gewährleistet sein. Trotzdem ist zu erwarten, dass geeignete Überwachungsmassnahmen auch über den Lagerverschluss hinaus fortgesetzt werden.

Im vorliegenden Kap. 7.1 wird das grundsätzliche Vorgehen zu Kontrolle und Überwachung und in Kap. 7.2 bzgl. Safeguards umschrieben. Kontrolle und Überwachung ziehen sich von den ersten Standortuntersuchungen bis zum Lagerverschluss hin. Mit den Massnahmen bzgl. Safeguards ist im Rahmen dieses Projektes der Betrieb des Lagers betroffen. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf das Prinzipielle, obwohl mit der sehr umfangreichen und detaillierten Dokumentation der ausgeführten Untersuchungen im Zürcher Weinland (Kap. 2.3.2; Müller et al. 2002, Nagra 2001 und Birkhäuser et al. 2001) eine breite Ausgangsdatenbasis geschaffen wurde. Die Beschaffung noch zu erhebender Daten und die Überprüfung von Daten, insbesondere aus Untertageanlagen sind Gegenstand zukünftiger Planung. Auf Labor- und weitere Untersuchungen und Messungen wird hingewiesen.

7.1.2 Phasen der Lagerrealisierung und zu erhebende Basisdaten

Die Realisierung eines Lagers lässt sich, ergänzend zu Kap. 4.4.1 in die folgenden Phasen oder Schritte gliedern:

- Erkundung auf und von der Erdoberfläche,
- Exploration unter Tage (inkl. Bau und Betrieb Testlager (Felslabor)) – Bauetappe 1,
- Bau der Lageranlage – Bauetappe 2,
- Einlagerungsbetrieb und Lagererweiterung – Lagerbetrieb und Bauetappe 3,
- Überwachung und Verschluss des Hauptlagers,
- Überwachung des Pilotlagers,

- Verschluss der Gesamtanlage sowie
- Nachverschluss Phase.

Basisdaten werden während der Erkundung auf und von der Erdoberfläche aus erhoben, weitere Daten bei der baubegleitenden Charakterisierung (Rampe, Tunnel und Stollen), beim Bau des Testlagers (Felslabor) und im Felslaborbetrieb ermittelt. Der Übergang von der Datenerhebung zu Kontrolle und Überprüfung erfolgt je nach zu erhebendem Parameter fließend und ist nicht an eine spezifische Phase gebunden.

Bei den zu ermittelnden Daten handelt es sich im wesentlichen um Parameter zur baulichen Machbarkeit, zum Nachweis des ordnungsgemässen Betriebs sowie der Langzeitsicherheit, also im wesentlichen um die nachstehenden Informationen:

- Geologische Verhältnisse, im wesentlichen charakterisiert durch den stratigrafischen Aufbau, die mineralogische Zusammensetzung und die tektonische Situation,
- Geotechnisch/felsmechanische Parameter des Wirtgesteins und der überliegenden Schichten,
- Hydrogeologische und geochemische Charakterisierung des Porenwassers im Wirtgestein und in den angrenzenden Schichten,
- Hydrologische Unterlagen der Oberflächengewässer,
- Meteorologische und klimatische Verhältnisse sowie allgemeine Umweltverhältnisse.

Neben diesen den Standort charakterisierenden Daten sind entsprechend verlässliche Angaben zu den Abfällen und den technischen Barrieren erforderlich. Weil diese, von Einzelfällen abgesehen, nicht standortgebunden sind, werden sie in entsprechenden Laborprogrammen ermittelt und, soweit zweckmässig, in Grossversuchen überprüft.

7.1.3 Kontrolle und Überwachung in der Bau-, Betriebs- und Überwachungsphase eines BE/HAA/LMA Lagers

Die in frühen Phasen erhobenen Basisdaten fließen einerseits in Langzeitsicherheitsbetrachtungen, andererseits in die Anlagenauslegung ein. Für den Nachweis des sicheren Betriebes bilden sie die Bezugsbasis. Es ist deshalb nötig, diese Daten in jeder Phase der Lagerrealisierung zu überprüfen und, wo notwendig, zu ergänzen und zu korrigieren. So werden voraussichtlich während des Baus z.B. die geologischen und hydrogeologischen Basisparameter kontrolliert und während des Baus, des Betriebs und der Überwachungsphase die hydrogeologischen Verhältnisse überwacht, um phasengerecht die Grundlagen der Sicherheitsanalyse zu überprüfen. Ein entsprechendes Kontroll- und Überwachungsprogramm wird nach der Standortfestlegung aufzustellen und später zu ergänzen sein.

Demgegenüber liegen die für den Bau der Anlage notwendigen Parameter spätestens nach Abschluss der Ausbrucharbeiten des Testlagers (Felslabor) in belastbarer Form vor. Die korrekte Anwendung in felsmechanischen Modellen und die Umsetzung in entsprechende Baumaßnahmen kann bei der Ausführung vor Ort unmittelbar überprüft oder durch gezielte Langzeitmessungen verfolgt werden. Im weiteren ist während des Baus der Lageranlage den Aspekten der konventionellen Sicherheit gebührende Aufmerksamkeit zu schenken: Die Arbeitssicherheit ist zu gewährleisten. Obwohl das Arbeiten unter Tag heutzutage Routine ist, sind die für den Bau eines Lagers im Opalinuston der Nordschweiz speziell zu beachtenden Punkte im Kap. 4.5, Bautechnische Sicherheitsaspekte, aufgeführt.

Die Überwachung des geologischen Tiefenlagers sowie der Umgebung auf Radioaktivität zum Nachweis des sicheren Betriebs der Anlage sind heute Routinearbeiten und sollen, wie bei anderen Kernanlagen, routinemässig durchgeführt werden. Die für ein Lager BE/HAA/LMA vorgesehenen Massnahmen sind in Kap. 5.4, 5.5 und 3.6 kurz beschrieben.

Nach dem Einlagern und Verfüllen werden die verschlossenen Lagertunnel LMA und insbesondere die Lagerstollen BE/HAA des Pilotlagers zur Überprüfung ihres Verhaltens intensiv kontrolliert. Die Lagerstollen können z.B. vom Kontrollstollen BE/HAA her mit Bohrungen erschlossen und so mit verschiedensten Sensoren überwacht werden. Für einen Lagertunnel LMA ist dies vom Kontrollstollen LMA aus möglich. Beim Verschluss der Gesamtanlage werden auch die Bohrungen und die Kontrollstollen verfüllt, sodass jede Art von hydraulischem Kurzschluss ausgeschlossen werden kann.

Das Pilotlager und der Lagerteil LMA werden im vorliegenden Referenzprojekt als erstes beschickt, verfüllt und verschlossen; Abweichungen siehe Kap. 5.7.2. Dadurch ergibt sich im Hinblick auf den Lagerverschluss eine möglichst lange Beobachtungszeit. Techniken zur Ausführung von Kontrollmessungen sind aus dem Untersuchungsprogramm der Nordschweiz und den beiden Felslabors Grimsel und Mont Terri sowie aus Anlagen im Ausland bekannt. Die Erfahrung zeigt, dass die Haltbarkeit und damit die Funktionstüchtigkeit der Messsysteme zeitlich begrenzt ist. Das bedeutet, dass die eingebaute Instrumentierung falls möglich gewartet, sonst aber periodisch ersetzt oder neu installiert werden muss. Ein entsprechendes Programm wird bis zum Baubeginn des Lagers zu erstellen sein.

7.1.4 Kontrolle und Überwachung in der Nachverschluss Phase

Nach dem Verschluss der Gesamtanlage, also nach dem Verfüllen bzw. Versiegeln aller untertägigen Hohlräume und der Demontage und Rekultivierung der Aussenanlagen (Kap. 8), kann bei Bedarf die Überwachung der Lageranlage durch Kontrollmessungen an bzw. von der Oberfläche z.B. aus Bohrungen weitergeführt werden. Alle diese Messanordnungen sind jedoch so anzulegen, dass sie die Langzeitsicherheit der Anlage in keiner Weise beeinträchtigen. Sie haben keine aktive Sicherheitsfunktion.

7.1.5 Einschränkungen der Kontroll- und Überwachungsmassnahmen

Bei der Auslegung der verschiedenen Kontroll- und Überwachungsprogramme inkl. Erhebung der Basisdaten sind die Vorteile eines Informationsgewinns gegenüber damit verbundenen möglichen negativen Auswirkungen abzuwägen, insbesondere auf Personen oder auf das geologische Tiefenlager. Solche negativen Aspekte können z.B. sein:

- Zerstörung eines potenziellen Standortes durch unsachgemässe Erkundung bzw. unsachgemässe Erhebung von Basisdaten,
- Erhöhte Strahlenexposition des Personals im Lagerbetrieb,
- Bildung potenzieller Fliesspfade entlang von Messgeräten oder Verbindungen dazu wie z.B. entlang von Kabeln oder Schläuchen und dadurch Verletzung von technischen und evtl. auch natürlicher Barrieren.
- Bei längerfristigem Offenhalten der Zugänge ergibt sich ein erhöhtes Risiko z.B. für
 - Überflutung der Lageranlage infolge Wassereintrichs,

- menschliches Eindringen, insbesondere wenn das öffentliche Interesse an einer institutionalisierten Kontrolle nicht mehr vorhanden ist (Safeguards) oder, aus dem gleichen Grund,
- das Einlagern zweckfremder Güter,
- Vernachlässigung bzw. Aufgabe des ordnungsgemässen Betriebes und Unterhalts,
- kein ordnungsgemässer Verschluss.

7.1.6 Korrekturmassnahmen

Kontroll- und Überwachungsmassnahmen können dazu führen, dass entsprechende Korrekturen vorgenommen werden müssen. Im vorliegenden Referenzprojekt sind solche sowohl während des Lagerbaus und des Einlagerungsbetriebs als auch während der anschliessenden Überwachung und sogar – allerdings mit deutlich höherem Aufwand – nach dem Lagerverschluss möglich.

Aufgrund der intensiven Vorabklärungen inkl. Bau und Betrieb eines Testlagers (Felslabor), kann davon ausgegangen werden, dass am dannzumal bereinigten Auslegungskonzept bzw. Layout der Gesamtanlage während des Lagerbaus keine Korrekturen mehr zu erwarten sind. Somit beschränken sich Korrekturmassnahmen in der Phase des Lagerbaus praktisch nur auf die Verstärkung evtl. zu gering ausgelegter Felssicherungsmassnahmen zur Sicherung der Hohlraumstabilität, was sehr einfach zu beheben ist. Eventuelle weitere im Untertagbau auftretenden Schwierigkeiten werden im Rahmen der Bauerstellung gelöst und gehören zur täglichen Arbeit im Untertagbau.

Werden im Einlagerungsbetrieb von der Norm abweichende Resultate gemessen, wird deren Ursache ermittelt und behoben. Grössere Probleme werden aufgrund der Abschätzungen im Kap. 6, Betriebssicherheit und Strahlenschutz, nicht erwartet. Diese Feststellung wird in einem späteren Stadium des Projektes durch eine quantitative Analyse der Betriebssicherheit zu überprüfen sein.

Ergibt sich nach Abschluss der Einlagerung, wenn die Lagerstollen BE/HAA und Lagertunnel LMA verfüllt und verschlossen sind, die Notwendigkeit, in den noch zugänglichen Anlagen im Rahmen von Unterhalt und Wartung evtl. Revisionsarbeiten z.B. an Betongewölben oder Drainagen auszuführen, kann dies problemlos ausgeführt werden, ohne dass sich die Reparatur-equipe radiologischer Strahlung aussetzt.

Sollte sich während des Einlagerungsbetriebes oder später eine Situation ergeben, welche die Langzeitsicherheit der Anlage ernsthaft in Zweifel ziehen würde, müssten mögliche Abhilfemassnahmen sorgfältig überprüft und im Extremfall die Abfälle rückgeholt werden. Wie dies mit heutiger Technologie geschehen könnte, ist am Beispiel der BE-Behälter in Kap. 9, Rückholbarkeit der Abfälle, gezeigt. Eine Rückholung der Abfälle infolge Nichterfüllens des Langzeitsicherheitsziels scheint aus heutiger Sicht äusserst unwahrscheinlich, denkbar wäre hingegen z.B. die Rückholung aus Ressourcegründen.

7.2 Physischer Schutz von Kernmaterialien (Safeguards)

7.2.1 Einleitung

BE-Behälter enthalten spaltbares Material. Sie sind deshalb vor, während und nach der Einlagerung vor unerlaubtem Zugriff zu schützen.

Die IAEA hat dazu im Rahmen des ("Safeguards for the final disposal of spent fuel in geological repositories") SAGOR-Programmes für Konditionieranlagen und im Betrieb stehende sowie verschlossene geologische Tiefenlager international anzuwendende Überwachungsprogramme ausgearbeitet und vorgeschlagen (IAEA 1998). Für das geologische Tiefenlager im Opalinuston der Nordschweiz sind die Ausführungen zu "Operating Repository" und "Closed Repository" von Interesse.

Weil auf diesem Gebiet in Zukunft noch weitere Fortschritte zu erwarten sind, wird nachstehend nur auf die jeweils verfolgte Grundidee kurz eingegangen.

7.2.2 Massnahmen im Lagerbetrieb

Ziel der IAEA-Safeguards ist es, sicherzustellen, dass von der Anlieferung bis zur Einlagerung und Verfüllung sowie bis zum Verschluss und nach dem Verschluss der Anlage kein spaltbares Material entwendet oder illegal verarbeitet wird.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist im wesentlichen vorgeschlagen, die bereits vom Lagerbetreiber vorgenommenen Kontrollen zu überwachen und insbesondere alle Zugänge zu den Anlagen unter Tag rigoros zu kontrollieren um sicherzustellen, dass kein undeklariertes Material in die Lagerzone bzw. von dort nach aussen gelangt. Dazu werden sowohl elektronische Mittel wie auch Inspektoren vor Ort eingesetzt. Letztere werden vor allem auch periodisch überprüfen, ob das Lager den bewilligten Plänen entsprechend erweitert wird und unter Tage keine Anlagen zur Vornahme unzulässiger Manipulationen an den Abfällen errichtet werden.

Als Gebiete für zukünftige Forschung und Entwicklung werden beispielsweise angegeben:

- Routineeinsatz von Radargeräten zur Überprüfung der Lagerumgebung,
- Unverfälschbarer, individueller Identifikator für Abfälle und Behälter,
- Umgebungsüberwachung zur Feststellung unerlaubter Verarbeitung von spaltbarem Material unter Tag.

7.2.3 Massnahmen nach Lagerverschluss

Um Abfälle aus einem verschlossenen Lager anderweitig verwenden zu können, müssen diese trivialerweise zuerst aus dem verschlossenen Lager herausgeholt werden, wobei verschlossen bedeutet, dass alle Zugänge verfüllt bzw. versiegelt und die Aussenanlagen abgebaut sind.

Eine Rückholung ist nur durch die Erstellung entsprechender Zugänge und anschliessendem Ausbau der Abfälle möglich. In den IAEA-Safeguards werden dazu drei Möglichkeiten genannt:

- Öffnen der ursprünglichen Zugänge; im vorliegenden Referenzprojekt also der Zugangsrampe und/oder des Lüftungs- bzw. Bauschachtes,
- Erstellung neuer Zugänge zur Lagerzone,

- Erschliessung der Lagerzone aus anderen Bergbauanlagen, Tunneln oder Kavernen.

Dabei wird das Öffnen der ursprünglichen Zugänge als am einfachsten feststellbar eingestuft, gefolgt vom Bau neuer Zugänge aus dem Gebiet über der Lagerzone und als letztem die Erschliessung aus bestehenden oder neu erstellten Untertagbauten.

Um solche Aktivitäten festzustellen, werden unangemeldete visuelle Kontrollen durch Inspektoren vorgeschlagen, mit der Befugnis, auch geophysikalische Kampagnen durchführen zu lassen. Als weitere Möglichkeiten werden Satelliten- oder Luftüberwachung sowie seismische Überwachung genannt.

7.2.4 Folgerung für das geologische Tiefenlager im Zürcher Weinland

Die durch die IAEA (IAEA 1998) vorgeschlagenen, international anzuwendenden Überwachungsprogramme für den physischen Schutz von Kernmaterialien (Safeguards) zeigen klar, dass eine Überwachung einfacher ist, wenn ein geologisches Tiefenlager verschlossen ist. Der Aufwand zur illegalen Entfernung von spaltbarem Material ist dann aufwendiger und leichter feststellbar. Im Sinne der Safeguards sollte ein geologisches Tiefenlager nicht unnötig lang unverfüllt oder unverschlossen bleiben. Der physische Schutz von Kernmaterial kann auch während der Betriebs- und Beobachtungsphase sichergestellt werden.

8 Lagerverschluss

8.1 Einleitung

Beim Verschluss der Anlage werden die noch offenen Zugänge, Stollen und Tunnel verfüllt und versiegelt, sodass es, entsprechend der HSK Richtlinie R-21 (HSK/KSA 1993) Schutzziel 3, möglich ist, auf weitere Sicherheits- und Überwachungsmaßnahmen zu verzichten. Ebenfalls nach Schutzziel 3, soll der Verschluss des geologischen Tiefenlagers innert einiger Jahre möglich sein.

Der Verfüllung und Versiegelung des geologischen Tiefenlagers fällt die Aufgabe zu, die durch den Bau der Anlage vor allem hinsichtlich Wasserbewegung in den durchörterten Schichten und im Wirtgestein bewirkten Änderungen soweit rückgängig zu machen, dass die Barrierenwirkung insbesondere des Wirtgesteins und der technischen Barrieren nicht unzulässig beeinträchtigt wird. Zusätzlich soll durch die Verfüllung und Versiegelung das Lager definitiv verschlossen und dadurch der Zugang von Personen in die Lagerzone wirksam und dauerhaft erschwert werden.

Die EKRA schlägt in ihrem Bericht (EKRA 2000) vor, die Verfüllung der Resthohlräume in den Lagerstollen BE/HAA und Lagertunneln LMA unmittelbar nach Einlagerung der Abfälle vorzunehmen und die Zugänge über längere Zeit offen zu halten. Sie weist ferner auf die Möglichkeit eines unkontrollierten Abbruchs der Überwachung hin und empfiehlt, neben einer möglichst langen Überwachungs- und Beobachtungszeit, eine rasche Verschlussmöglichkeit des geologischen Tiefenlagers im Krisenfall.

Die Umsetzung dieser sich z.T. widersprechenden Forderungen ist Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen.

8.2 Verschlusskonzept

Im Realisierungskonzept des geologischen Tiefenlagers ist eine stufenweise Verfüllung und Versiegelung bis zum vollständigen Verschluss der Gesamtanlage vorgesehen. Das Konzept beruht auf der Absicht, in jeder Situation bei Wahrung einer der Stufe angepassten Reversibilität, einen optimalen Schutz der Abfälle vor internen und externen Einwirkungen sowie Einwirkungen Dritter zu erreichen.

Der Verschluss des geologischen Tiefenlagers besteht aus einem System gestaffelter, passiver Sicherheitsbarrieren aus Streckenverfüllungen, Betonpfropfen und Versiegelungen, welche den Verzicht auf weitere Sicherheits- und Überwachungsmaßnahmen zulassen.

8.2.1 Verschlussmassnahmen im Einlagerungsbetrieb

Während des Einlagerungsbetriebs wird bei den BE/HAA nach jedem Behälter die zugehörige Verfüllung im Lagerstollen eingebracht (Kap. 5.2.4 und Fig. 5.10) und jeder Lagerstollen unmittelbar nach seiner Beschickung im Bereich der Schleuse verschlossen. Die LMA, exkl. WA-COG-4, welche direkt eingelagert werden, werden im Betriebsgebäude der Empfangsanlage in Lagercontainer aus Beton verpackt und die verbleibenden Hohlräume in den Containern mit Mörtel verfüllt (Fig. 5.1). Die Lagertunnel LMA werden nach ihrer Belegung mit Mörtel verfüllt und die Umladestation anschliessend mit Beton vergossen. Während des Einlagerungsbetriebs sind im Referenzkonzept somit alle mit Abfällen belegten Lagertunnel LMA und Lagerstollen BE/HAA verfüllt und verschlossen. Durch das jeweils sofortige Verfüllen der

verfüllt und gemäss Fig. 8.2 an Schlüsselzonen versiegelt. Beim Schacht ist ein Siegel im Opalinuston und in den überliegenden Schichten beim Übergang zum Wedelsandstein vorgesehen. Offen bleiben die in Fig. 8.2 grün unterlegten Anlagenteile. Zur Belüftung der offenen Anlagenteile wird im Zugangstunnel eine Lüftungsleitung zur Frischluftzufuhr installiert und die Abluft durch den offenen Querschnitt des Zugangstunnels abgeführt.

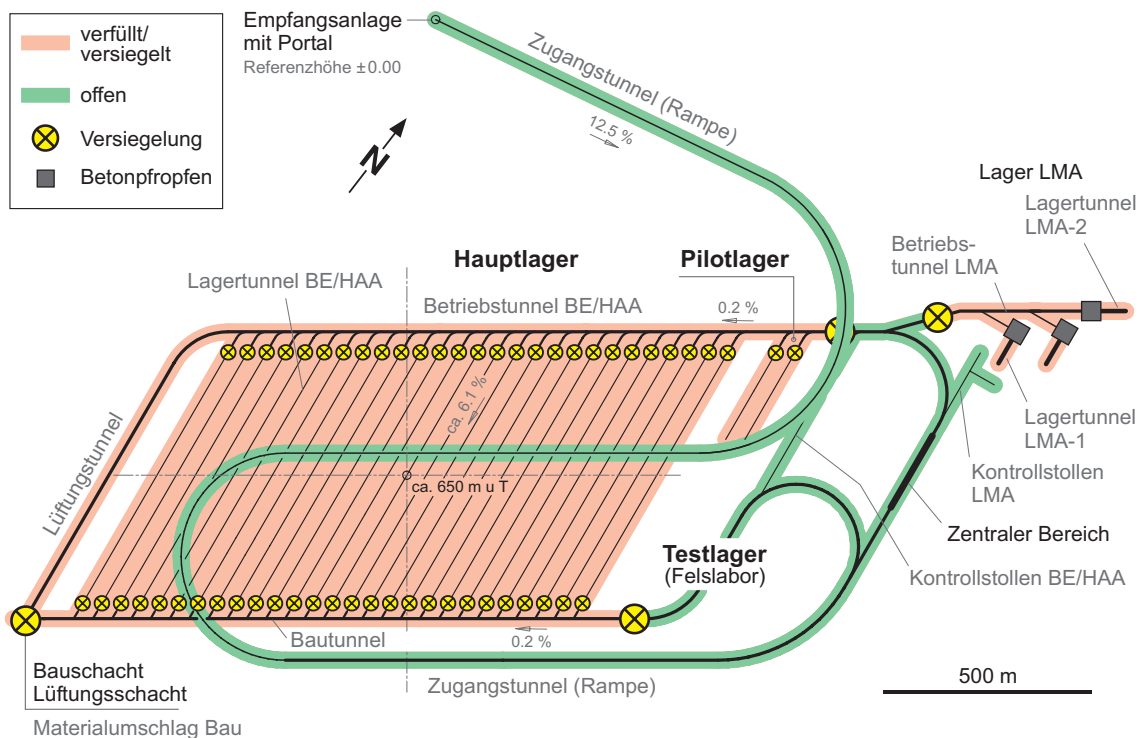


Fig. 8.2 Situation nach dem Verschluss des Hauptlagers
Der verschlossene Teil des Lagers ist durch Versiegelungen gesichert. Die grün unterlegten Anlagenteile sind weiterhin zugänglich.

8.2.3 Überwachung des Pilotlagers

Die Situation gemäss Fig. 8.2 soll über einen langen, nicht näher definierten Zeitraum zur Überwachung des Pilotlagers dienen, bis der Entscheid zum Verschluss der Gesamtanlage getroffen und durch die Behörden genehmigt worden ist.

8.2.4 Verschluss der Gesamtanlage

Beim Verschluss der Gesamtanlage werden alle noch offenen Bohrungen, Nischen, Stollen und Tunnel verschlossen und der Zugangstunnel am Übergang zum Opalinuston (Murchisonae-Schichten) und in den überliegenden Schichten, wie beim Schacht, am Übergang zum Wedelsandstein mit einem als Schlüsselzone ausgebildeten Siegel verschlossen (Fig. 8.3).

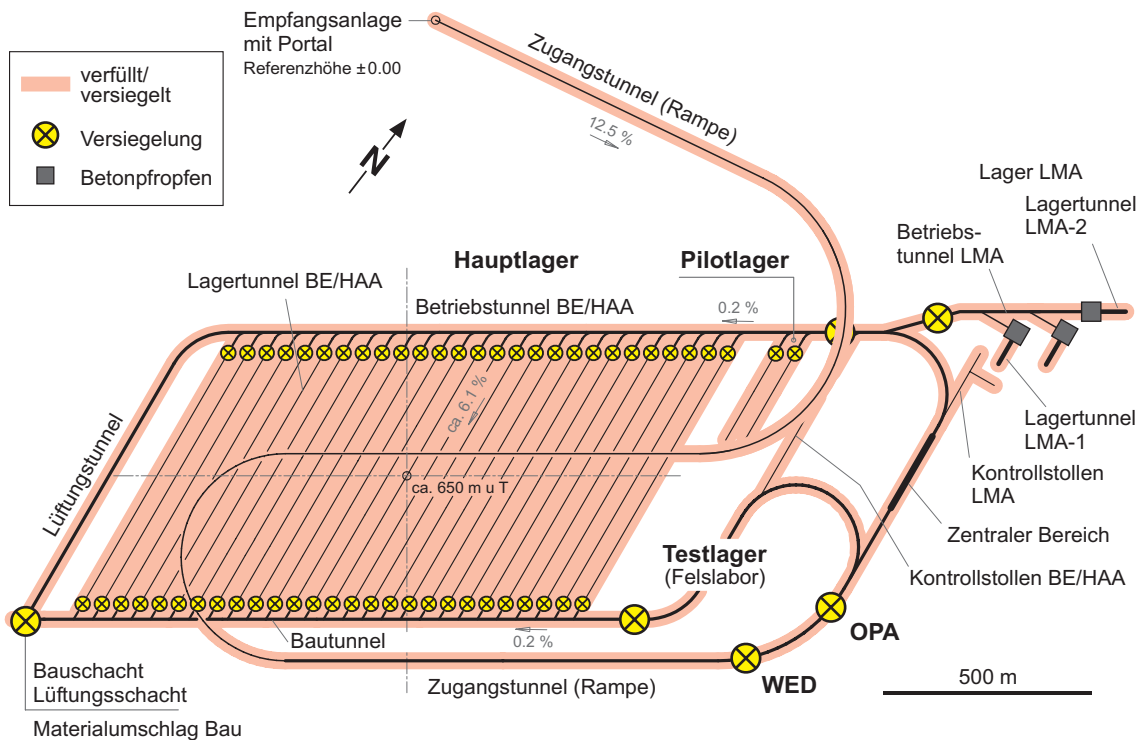


Fig. 8.3 Situation des geologischen Tiefenlagers nach dem Verschluss der Gesamtanlage
WED Wedelsandstein; *OPA* Opalinuston

8.3 Versiegelungskonzept

Mit der Versiegelung soll, in Verbindung mit der streckenweisen Verfüllung, die Barrierenwirkung des durch Bauaktivitäten verletzten Wirtgesteins als Transportbarriere möglichst wieder hergestellt und auch eine gebirgsstützende Wirkung erzielt werden. Zu diesem Zweck werden an Schlüsselstellen hochwertige *Versiegelungen* eingebaut, welche als hydraulische Barrieren konzipiert sind. Die Zwischenstrecken inkl. Rampe und Schacht werden satt verfüllt, um primär Bruch-, Auflockerungs- und Verformungserscheinungen des ausbruchnahen Gebirgsbereiches entgegen zu wirken. Versiegelungen und *Streckenverfüllungen* werden, dem Verschlusskonzept entsprechend, phasenweise eingebaut (Fig. 8.1 bis 8.3).

8.3.1 Versiegelungen in Schlüsselzonen

Versiegelungen werden als hydraulische Barrieren ausgelegt. Aufgrund ihrer Funktion im einzelnen, dem Einbaupunkt, der standortspezifischen Gegebenheiten und der projektbedingten Situation der Hohlräume (horizontal/vertikal, gross/klein), wird einerseits zwischen Versiegelungen und Betonpfropfen und bei den Versiegelungen zwischen vier Versiegelungsgruppen unterschieden, welche jeweils unterschiedliche Konzepte erfordern. Die Einbaubereiche dieser vier Versiegelungsgruppen und der Betonpfropfen sind in Fig. 8.4 eingezeichnet und beschriftet.

Während die Betonpfropfen der Lagertunnel LMA kaum weiterer Erläuterungen bedürfen, wird auf die verschiedenen Versiegelungen nachstehend zusammenfassend eingegangen, und als Beispiel dazu werden zwei Gruppen bzw. Versiegelungstypen detaillierter dargestellt. Diese Ausführungen stützen sich auf eine Studie zum Verschluss des geologischen Tiefenlagers

(Sitz 2003). Weitere Unterlagen zu Verfüllung und Versiegelung sind im Projekt Gewähr (Nagra 1985) dokumentiert, welches sich auf ein umfangreiches diesbezügliches Schrifttum abstützt und neben mehreren theoretischen, im Auftrag der Nagra durchgeführten Arbeiten auch die relevanten Versuche in der Stripamine in Schweden und Laboruntersuchungen an der ETH Zürich umfasst. Im weiteren wird auf die Versuche in Aspö (Schweden) und im URL (Kanada) verwiesen.

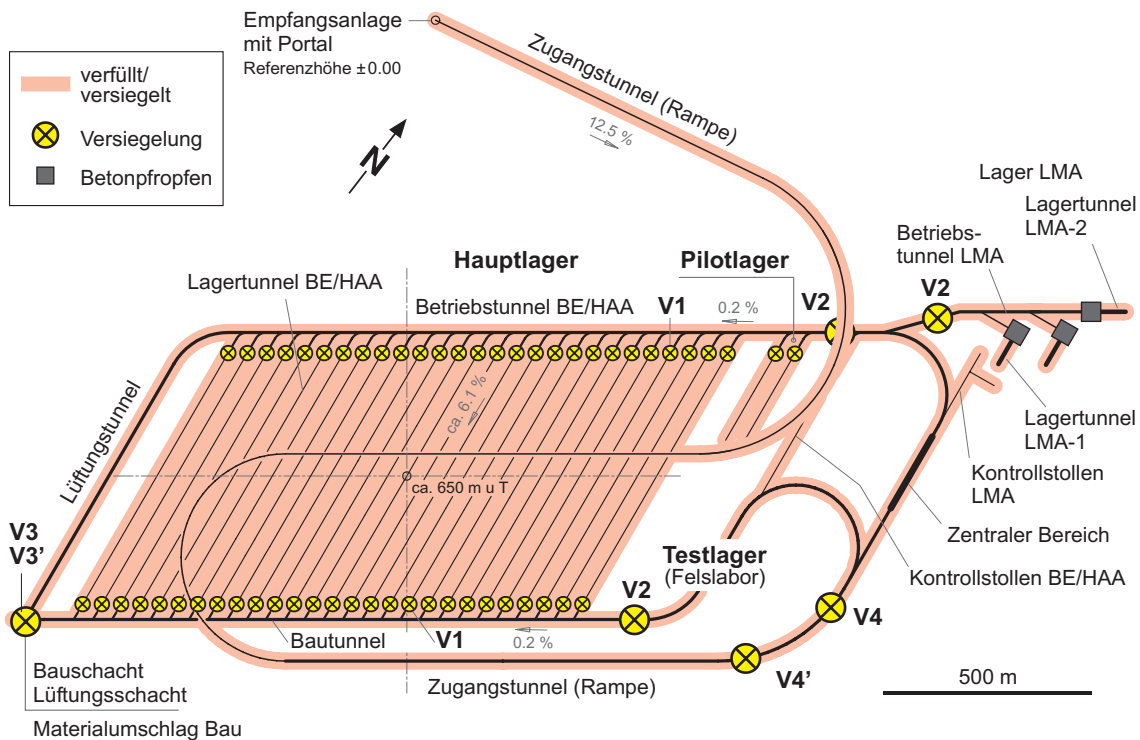


Fig. 8.4 Situation des geologischen Tiefenlagers nach dem vollständigen Verschluss mit Versiegelungsgruppen V1 bis V4

Die Versiegelungen in den Schlüsselzonen bestehen aus einem Dichtsystem, das die geforderte Dichtheit gewährleistet und aus dem statischen Widerlager zur Aufnahme bzw. Ableitung der durch den Flüssigkeitsdruck bzw. den Quelldruck hervorgerufenen Kräfte in das Gebirge. Zur konstruktiven Gestaltung und Bemessung sind neben den Belastungen detaillierte geotechnisch/felsmechanische Angaben notwendig. Das Bemessungskriterium für das Dichtsystem ist das Unterschreiten eines bestimmten, durch hydrodynamische Modellrechnungen festzulegenden kritischen Volumenstromes. Dadurch ist es möglich, die kombinierte Wirkung der Durchlässigkeit des Dichtsystems einschliesslich des aufgelockerten Gebirgsbereiches und des hydraulischen Gradienten zu berücksichtigen.

Als Material für dieses Dichtsystem bieten sich aufgrund der geringen Durchlässigkeiten, des Quellvermögens, der Langzeit- und Erosionsbeständigkeit vor allem Bentonite und Bentonit-Zuschlagstoffmischungen an, wobei die Materialeigenschaften durch die Bentonittrockenrohdichte und den Bentonitanteil gesteuert werden. Für die Widerlager ist für kürzere bis mittlere Zeiträume die Verwendung von Beton möglich. Für längere Einsätze bieten sich Trockenmauerwerk aus Natursteinen oder das Einbringen von Schotterkies z.B. aus Basalt, Diabas oder Granit mit entsprechenden Übergangsschichten an.

8.3.1.1 Versiegelungen V1

Den Versiegelungen V1 der Lagerstollen BE/HAA fallen als Aufgabe bis zum Verschluss des Hauptlagers die Verhinderung eines Wasserzuflusses aus dem Bau- und/oder Betriebstunnel und die Verhinderung einer Stollenbegehung durch Personen zu. Langfristig sollen die Verschlüsse V1 Dichtfunktion und Lastabtrag gegenüber einem aus dem Lagerstollen oder dem Betriebs- bzw. Bautunnel auftretenden Flüssigkeitsdruck übernehmen. Die Dichtelemente bestehen aus Bentonitgranulat und einer Mischung aus Bentonit/Sand und der Lastabtrag erfolgt durch eine Schotterkiespackung, welche mit je einer Übergangsschicht an das Dichtelement anschliesst. Als Abschluss gegen den Betriebs- bzw. Bautunnel wird eine Betonwand erstellt, welche eine temporäre Funktion bis zur Verfüllung des Hauptlagers hat (Fig. 8.5). Im Bereich der Versiegelung V1 werden die Schienen entfernt.

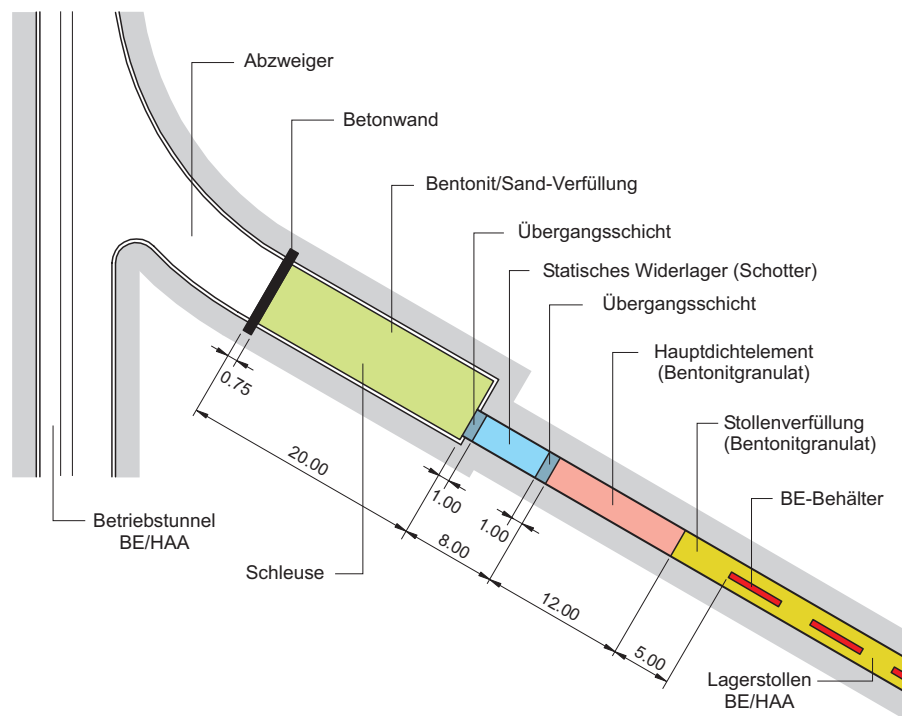


Fig. 8.5 Schematische Darstellung der Versiegelung V1 als Verschluss der Lagerstollen BE/HAA auf der Betriebstunnelseite; anderes Ende (Bauseite) prinzipiell gleich
Abmessungen in m

8.3.1.2 Versiegelung V2

Mit der Versiegelung V2 wird der Betriebstunnel BE/HAA und LMA sowie der Bautunnel beim Verschluss des Hauptlagers versiegelt (Fig. 8.4). Die V2 sollen über einen Zeitraum bis zu ca. 100 Jahren in der Lage sein, bei einem evtl. Wassereinstau über Teile des offenen Tunnel-systems einen Wasserzutritt in den verfüllten Lagerbereich wirksam zu verzögern oder, was kaum zu erwarten ist, ein Ausfließen potenziell kontaminierter Wässer aus dem Lagerbereich zu verhindern. Als Dichtbarriere ist kompaktierter Bentonit und zum Lastabtrag ein Betonpfropfen von je ca. 30 m Länge vorgesehen. Im Bereich der Versiegelung wird die Betonauskleidung der Tunnel sowie der unmittelbar anstehende Fels auf einer Tiefe von ca. 0.5 – 1.0 m entfernt.

8.3.1.3 Versiegelung V3 und V3'

Die Versiegelung V3 und V3' gehört zum Verschluss des Hauptlagers und wird mit den Versiegelungen V2 eingebracht. Ihr kommt eine besondere Bedeutung zu, weil sie im Schacht die direkte Verbindung zwischen Lagerzone und Biosphäre endgültig und dauerhaft verschliesst. Es werden somit sowohl an das Dichtelement wie an die Lastabtragung sehr hohe Anforderungen gestellt. Diese sollen durch einen mehrschichtigen Aufbau und durch die Verwendung natürlicher Materialien erfüllt werden. Ein Konzeptvorschlag für die Versiegelung V3 am Schachtfuss ist in Fig. 8.6 dargestellt. Die darüber liegende Versiegelung V3' beim Übergang zum Wedelsandstein soll nach dem gleichen Prinzip ausgeführt werden.

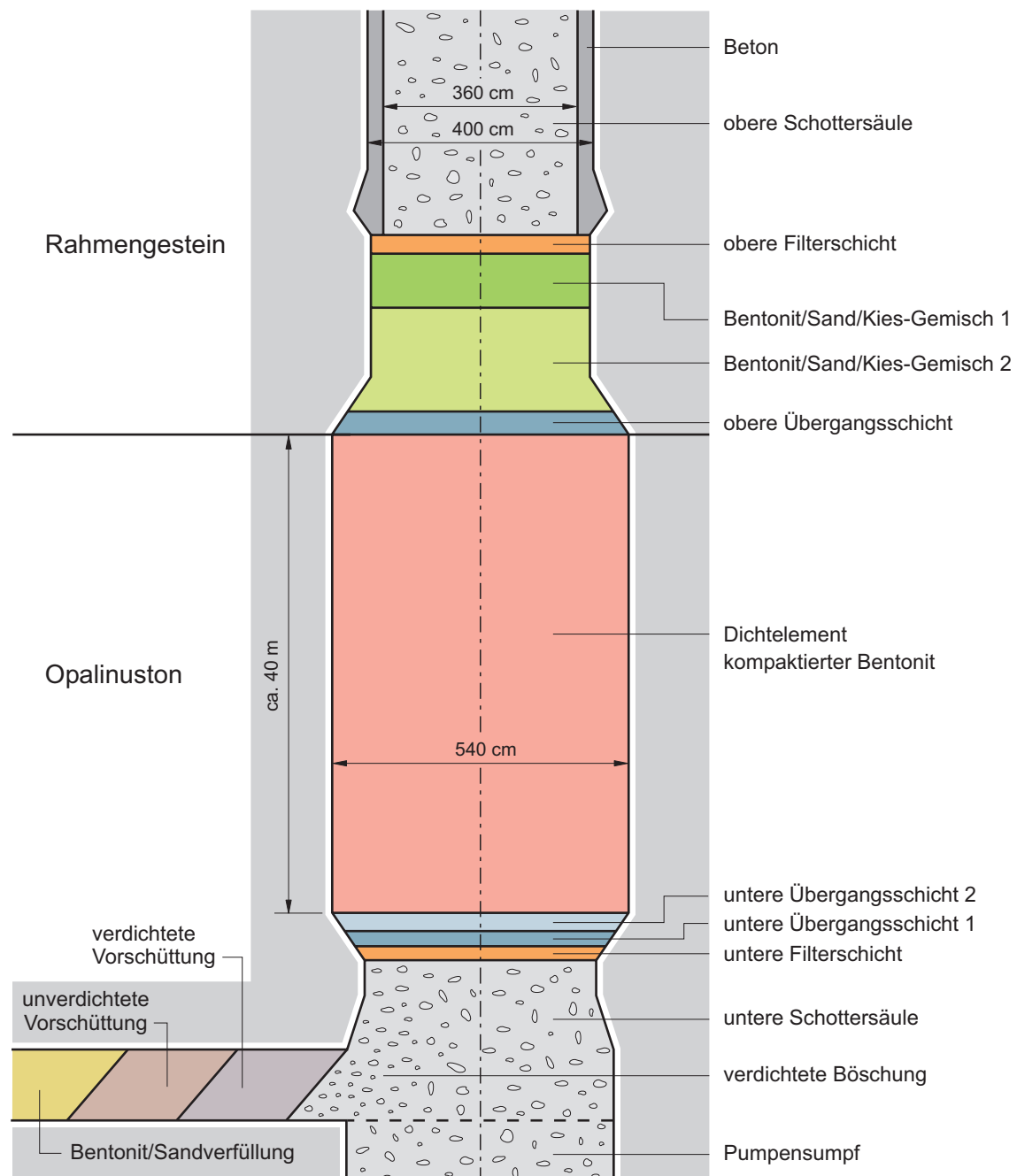


Fig. 8.6 Konzeptvorschlag für die Schachtversiegelung V3

8.3.1.4 Versiegelung V4 und V4'

Mit der Versiegelung V4 und V4' wird der Zugangstunnel (Rampe) und damit der zweite Verbindungsweg zwischen der Lagerzone und der Biosphäre final verschlossen. Die Versiegelung V4 und V4' wird beim Verschluss der Gesamtanlage, also voraussichtlich erst lange Zeit nach dem Verschluss des Hauptlagers eingebaut und hat die gleichen Anforderungen zu erfüllen wie die Schachtversiegelung. Auch hier wird ein mehrschichtiges Verschlussbauwerk aus natürlichen Materialien vorgeschlagen: Das Dichtelement aus Bentonit und die Widerlager aus Schotterkies mit entsprechenden Übergangsschichten. Der Betoneinbau im Tunnel und eine Schicht des unmittelbar angrenzenden Felsens werden ausgebaut. Die Länge des Versiegelungsbauwerks beträgt im Konzeptentwurf für diesen Verschluss ca. 80 m.

8.3.2 Streckenverfüllungen

In den Lagerstollen BE/HAA erfolgt die Streckenverfüllung mit Bentonitgranulat während der Einlagerung der Abfälle und bei den Lagertunneln LMA werden die Resthohlräume unmittelbar nach abgeschlossener Belegung der Tunnel mit Mörtel verfüllt (Kap. 5.2.4).

Zur Streckenverfüllung im übrigen Bereich des Opalinustons und der Rahmengesteine (Beilage 3-2) ist der Einbau eines Bentonit/Quarzsand-Gemisches von 30/70 % vorgesehen und zur Verfüllung des Zugangstunnels und des Schachtes in den überliegenden Schichten ist der Einsatz von Opalinuston aus der Ausbruchdeponie geplant. Die detaillierten Massnahmen zur Abtrennung von Aquiferen in den überliegenden Schichten werden aufgrund der Ergebnisse beim Rampenbau bzw. Schachtabteufen festgelegt.

8.4 Zeitliche Aspekte

Bei den zeitlichen Aspekten kann unterschieden werden zwischen dem Zeitpunkt, an welchem Verschlussarbeiten ausgeführt werden und ihrer Dauer.

8.4.1 Zeitpunkt des Lagerverschlusses

Der Verschluss des geologischen Tiefenlagers erfolgt gemäss Verschlusskonzept in Stufen:

- Die Lagertunnel LMA und die Lagerstollen BE/HAA werden während des Einlagerungsbetriebs verfüllt und verschlossen.
- Der Verschluss der Haupttunnel und des Bau- bzw. Lüftungsschachts ist am Schluss der Überwachungsphase des Hauptlagers geplant.
- Wenn der Entscheid zum Verschluss des Gesamtlagers getroffen ist, werden die restlichen noch offenen Anlagenteile verfüllt.

Konkrete zeitliche Angaben dazu können heute noch nicht gegeben werden. Sie hängen nebst technischen Randbedingungen vor allem von gesellschaftlichen Anforderungen und Wünschen ab.

8.4.2 Zeitlicher Aufwand zum Lagerverschluss

Für den *Einlagerungsbetrieb*, also Einlagerung, Verfüllung und Verschluss der Lagertunnel LMA und Lagerstollen BE/HAA ist der Zeitaufwand auf insgesamt 17 Jahre geschätzt worden (Kap. 5.1.2).

Zum *Verschluss des Hauptlagers* (Fig. 8.3) können vier Equipen eingesetzt werden, welche gleichzeitig Verfüllarbeiten ausführen. Dadurch kann die Gesamtdauer der Verfüllarbeiten dieser Phase entsprechend verkürzt werden, z.B.:

- Equipe 1 Lüftungstunnel und Betriebstunnel BE/HAA mit Versiegelung V2,
- Equipe 2 Versiegelung V3 und V3' mit Schacht,
- Equipe 3 Bautunnel und Versiegelung V2,
- Equipe 4 Abzweiger und Betriebstunnel LMA mit Versiegelung V2.

Der Aufwand für die Equipe 1 ist am grössten und wird auf rund 3 Jahre geschätzt. Als Basis wird von einer einschichtigen Arbeitszeit von 9 Stunden pro Tag und einer Verfüllleistung von ca. 12 m³/h ausgegangen. Für die Erstellung der Versiegelungen wird mit je ca. 6 Monaten gerechnet. Bei zweischichtigem Betrieb würde sich die Verfülldauer entsprechend auf ca. 1.5 bis 2 Jahre verkürzen.

Zur Verfüllung der noch offenen Anlagenteile beim *Verschluss der Gesamtanlage* (Fig. 8.4) ist es notwendig, zweischichtig zu fahren, um akzeptable Verschlusszeiten zu erreichen. Die Anlagenteile im Opalinuston können so innerhalb eines Jahres verschlossen werden inkl. Erstellung der Versiegelung V4. Der Verschluss des restlichen Zugangstunnels inkl. Versiegelung V4' sowie der Abschlussarbeiten über Tag wird, bei gleicher Stundenleistung wie oben, auf ca. 3.0 bis 3.5 Jahre geschätzt, sodass für diese Phase eine Gesamtdauer von ca. 4.0 bis 4.5 Jahre resultiert. Es ist zu erwarten, dass diese Verfüllzeit durch höhere Einbaukapazitäten in der Rampe noch reduziert werden kann. Der angegebene Wert basiert auf einer eher konservativen Leistungsannahme.

In den angegebenen Zeiten sind Mobilisation und zusätzlicher Zeitaufwand für Abbau- und Rekultivierungsarbeiten an der Oberfläche eingerechnet, Demontgearbeiten werden weitgehend zeitgleich mit Verfüllarbeiten ausgeführt.

8.5 Rekultivierung der Aussenanlagen

Die Rekultivierung der Aussenanlagen erfolgt ebenfalls phasenweise:

- Der Abbau der Aussenanlagen im Schachtkopfbereich erfolgt mit dem *Verschluss des Hauptlagers*, in welcher auch der Schacht verfüllt wird. In dieser Phase werden voraussichtlich auch die Aussenanlagen des Portalbereiches den neuen Aufgaben angepasst, sodass Teile davon abgebaut und das frei werdende Gelände rekultiviert werden kann.
- Die noch vorhandenen Aussenanlagen im Portalbereich werden mit dem *Verschluss der Gesamtanlage* abgebaut und das Gelände rekultiviert.

Ein Teilabbau der Anlagen im Portalbereich wäre auch nach Abschluss des Einlagerungsbetriebs denkbar.

Der über die Verfülldauer hinausgehende Zeitaufwand inkl. Rekultivierung der Grundstücke ist sowohl beim Verschluss des Hauptlagers wie beim Verschluss der Gesamtanlage in Kap 8.4.2 eingerechnet.

8.6 Fazit zum Lagerverschluss

Der Verschluss des geologischen Tiefenlagers kann sowohl bezüglich Qualitätsanforderung wie bezüglich Verschlusszeit vollumfänglich der HSK Richtlinie R-21 (HSK/KSA 1993) entsprechend realisiert werden. Den Safeguards (IAEA 1998) wird im Referenzprojekt insofern entsprochen, als dass in jeder Phase der Lagerrealisierung ein optimaler Schutz der Abfälle gewährleistet wird. Die Vorschläge der EKRA (EKRA 2000) werden im Einlagerungsbetrieb vollumfänglich realisiert. Ebenso erfüllt das Konzept mit dem Pilotlager und dem Kontrollstollen LMA die Empfehlungen der EKRA vollumfänglich und den Bedenken, wonach das geologische Tiefenlager unkontrolliert aufgegeben werden könnte, wird Rechnung getragen durch

- den Verschluss der Lagertunnel LMA mit Betonpfropfen und der Lagerstollen BE/HAA mit Versiegelungen V1 unmittelbar nach deren Belegung (Fig. 8.1),
- den möglichst baldigen Verschluss des Hauptlagers mit den entsprechenden Streckenverfüllungen und Versiegelungen V2 sowie dem Schachtverschluss inkl. Versiegelung V3 und V3' (Fig. 8.2).

Diese Massnahmen ermöglichen den Verschluss der noch offenen Anlagen im Opalinuston inkl. Erstellung der wünschbaren Versiegelung V4 (Fig. 8.4) innerhalb eines Jahres.

8.7 Optionen – Lagerverschluss

Im Referenzprojekt sind nach Abschluss des Einlagerungsbetriebs längere, nicht definierte Zeiträume zwischen einzelnen Verfüll- und Versiegelungsaktionen eingeplant. Sollte sich zeigen, dass ein allgemeines Interesse an einem möglichst baldigen und raschen Verschluss der Lageranlage besteht, könnten die Versiegelungen V1 einfacher und wirtschaftlicher ausgelegt und die Siegel V2 eliminiert werden, weil für den Langzeitsicherheitsnachweis die Versiegelungen V3/V3' und V4/V4' massgebend sind.

Besteht andererseits eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Anlage nach Betriebsende aufgegeben werden könnte, könnten bzw. würden die Versiegelungen V1 für die Langzeitsicherheit von erhöhter Bedeutung sein.

9 Rückholbarkeit der Abfälle

9.1 Grundsätzliches

Im folgenden wird am Beispiel der BE-Behälter, in welchen der weitaus grösste Teil der in ein geologisches Tiefenlager eingebrachten Aktivität enthalten ist, ein Vorschlag zur Rückholung dargestellt und erläutert. Die Darstellung ist auch für HAA-Behälter repräsentativ. Auf die Darstellung der Rückholbarkeit der geringen, in Lagercontainern mit LMA eingebrachten Aktivitätsmenge wird hier verzichtet und auf das Projekt SMA verwiesen, wo entsprechende Lösungsvorschläge zur Rückholung von Abfällen in Betoncontainern aufgezeigt worden sind. Diese lassen sich zur Rückholung von LMA entsprechend anpassen.

Auf die Gründe, die zur Rückholung führen könnten, wird nicht weiter eingegangen. Entsprechend den Vorgaben von EKRA (EKRA 2000, S. 52) für das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung, welche für das Hauptlager verlangt, dass die Rückholung technisch einfach bleibt, wird hier eine technische Lösung für BE-Behälter aufgezeigt

9.2 Zeitpunkt der Rückholung und Ausgangslage

Eine Rückholung von Abfällen kann zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen, nämlich

- während des Einlagerungsbetriebs,
- nach dem Verschluss des Hauptlagers; Haupttunnel und Schacht verfüllt und verschlossen, Zugang zum Pilotlager offen (Fig. 8.2) oder
- nach dem Verschluss der Gesamtanlage (Fig. 8.3).

Wird eine Rückholung der Abfälle während des Einlagerungsbetriebs beschlossen, ist dies mit geringem Aufwand zu bewerkstelligen, weil der Einlagerungsvorgang praktisch reversiert werden kann.

Eine Rückholung der Abfälle zu einem späteren Zeitpunkt unterscheidet sich im wesentlichen nur im Bezug auf die Zugänglichkeit zur Lagerzone: Im einen Fall ist sie gegeben (Fig. 8.2), im andern nicht (Fig. 8.3). In beiden Fällen muss der Betriebstunnel wieder aufgefahren und der Zugang zu den Lagerstollen BE/HAA freigelegt werden inkl. Beseitigung der Stollenabschlüsse. Die Bedingungen in den Lagerstollen werden in erster Näherung in beiden Fällen gleich angenommen: Die Temperaturen können bis gegen 100 °C und darüber angestiegen und die Bentonitverfüllung kann trocken bis gesättigt sein. Bezüglich Gebirgsstabilität wird davon ausgegangen, dass sich diese seit dem Einlagerungsbetrieb nicht wesentlich verändert hat.

Trifft diese letzte Annahme nicht zu, würde sich der Aufwand für die Felssicherung entsprechend erhöhen, wobei in diesem Fall, im Gegensatz zur Ersterstellung des Lagers, keine Einschränkungen bezüglich Materialien, Ausbruchweise, Ausbruchquerschnitt etc. zu beachten wären. Der nachstehend skizzierte Rückholvorgang wäre davon aber nicht prinzipiell betroffen.

Die Schienen sind bei der Einlagerung im Lagerstollen belassen worden. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese auch nach längerer Zeit noch brauchbar und für die Rückholung der BE-Behälter benutzt werden können. Evtl. sind sie lokal infolge Quellvorgängen leicht deformiert.

9.3 Rückholung von BE-Behältern

Zur Rückholung der BE-Behälter sind verschiedene Lösungsmöglichkeiten untersucht, und ein Vorschlag ist vertiefter bearbeitet worden. Dieser wird nachstehend erläutert und dargestellt (Fig. 9.1). Die Lösung stützt sich auf konkrete, heute verfügbare Technologie.

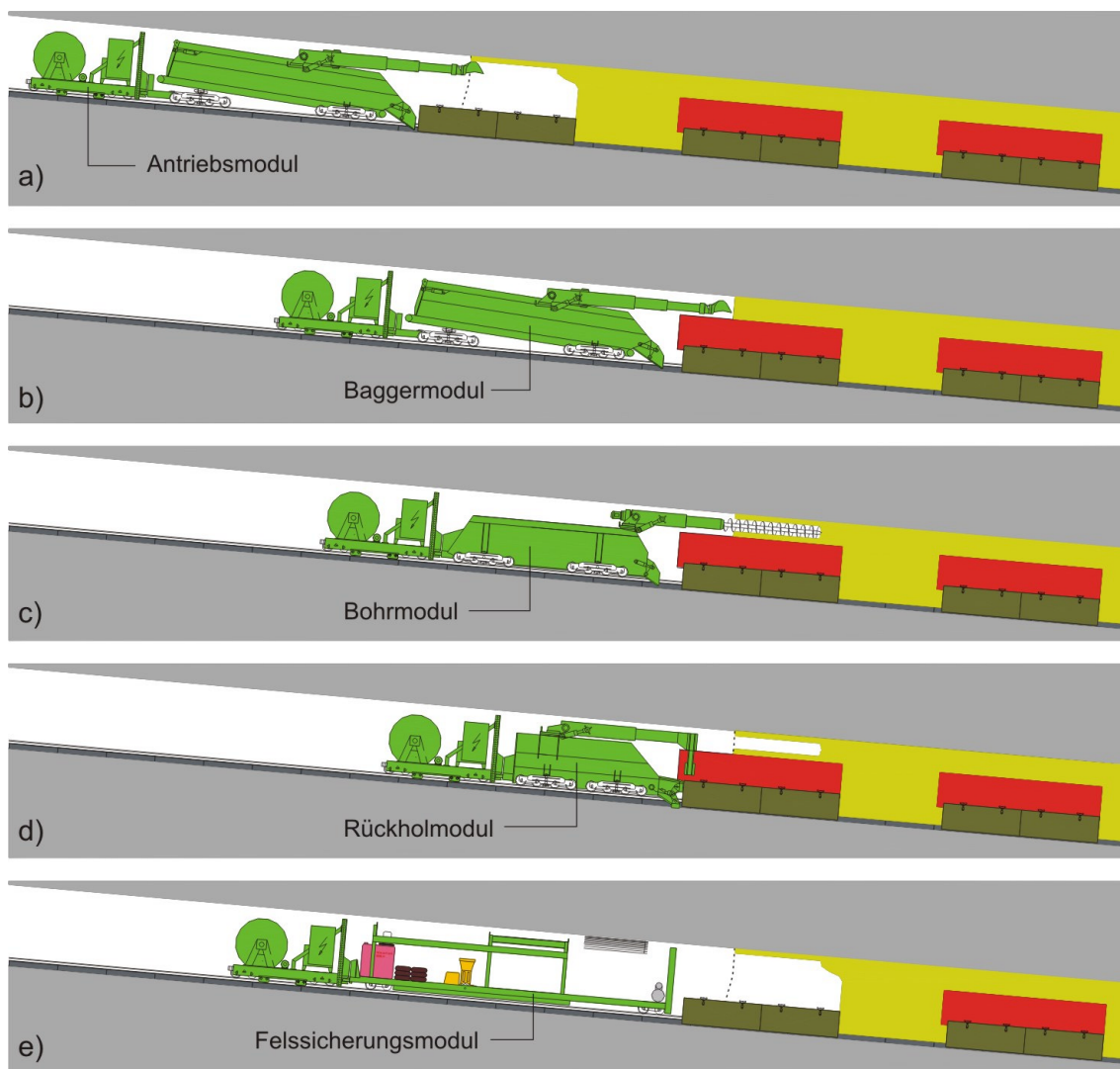


Fig. 9.1 Rückholung von BE-Behältern – Geräte und Arbeitsablauf (schematisch)

Zur Rückholung der Abfälle werden folgende Geräte vorgesehen:

- Windenlokomotive; in der Schleuse BE/HAA (Fig. 3.11),
- Antriebsmodul (Fig. 9.1 a) bis e)),
- Baggermodul (Fig. 9.1 a) und b)),
- Bohrmodul (Fig. 9.1 c)),
- Rückholmodul (Fig. 9.1 d)),
- Felssicherungsmodul (Fig. 9.1 e)).

Alle Geräte fahren auf Schienen, sind elektrisch betrieben und werden fernbedient eingesetzt. Sie sind für das Befahren auch nicht mehr optimaler Schienen ausgelegt und mit radiologischen Überwachungssonden ausgerüstet. Die Gerätekompositionen werden in der Schleuse BE/HAA zusammengestellt und in den Lagerstollen eingefahren, wobei sie durch die Winde in der Schleuse (Windenlokomotive, Fig. 3.11) gesichert sind und nach ausgeführter Aktion wieder zurückgezogen werden. Das Elektro- und Steuerkabel des Antriebsmoduls wird dabei beim Einfahren ab-, beim Ausfahren wieder aufgerollt.

Die mit den verschiedenen Geräten im einzelnen auszuführenden Arbeitsschritte sind (Fig. 9.1):

- Mit dem Baggermodul werden sowohl Bentonitgranulat wie Auflagerblöcke aus dem Lagerstollen abgebaut und in das als Wagen konstruierte Baggermodul eingebracht (Fig. 9.1 a) und b)). Es kann sowohl trockenes wie feuchtes bzw. gesättigtes Bentonitmaterial, auch bei hohen Temperaturen, abgebaut werden. Ist ein erstes Modul gefüllt, wird dieses ausgefahren und zum Zentralen Bereich gebracht. In der Zwischenzeit wird ein weiteres Baggermodul in den Stollen eingefahren und mit Verfüllmaterial gefüllt. Bei den im vorliegenden Referenzprojekt gegebenen Abmessungen ist ein dreimaliger Einsatz eines Baggermoduls erforderlich bis das Bohrmodul zum Einsatz kommen kann.
- Mit dem Bohrmodul wird in der Firste der nach oben notwendige Freiraum zum Lösen des Behälters geschaffen (Fig. 9.1 c)).
- Die nächsten Schritte werden mit dem Rückholmodul ausgeführt. Beim Einfahren des Moduls in den Lagerstollen wird die vorn im Modul integrierte Hydraulikpresse (System Kniehebel) unter das freigelegte Ende des BE-Behälters gefahren und dieser dort anschließend um 2 cm bis 3 cm angehoben. Dabei wird das Verfüllmaterial über dem Behälter aufgelockert und gelöst, sodass der Behälter mit dem Hydraulikgreifer in das Rückholmodul hineingezogen werden kann (Fig. 9.1 d)). Am Behälter klebendes Verfüllmaterial wird mit dem Greifer abgestreift. Ist diese Aktion abgeschlossen, wird das gesamte Gefährt inkl. BE-Behälter von der Winde in die Schleuse zurückgezogen.
- Im Lagerstollen kommt als nächstes das Felssicherungsmodul zum Einsatz. Der Stollen wird mit TV-Kameras inspiziert und im Anschluss daran mit einer Systemankerung und Netzen versehen (Fig. 9.1 e)). Ist dies erfolgt, beginnt der Zyklus von vorn.

Der Zeitbedarf zum Ausbau eines BE-Behälters wird auf etwa einen Arbeitstag geschätzt.

10 Schlussfolgerung und zusammenfassende Argumente

Ein geologisches Tiefenlager BE/HAA/LMA für abgebrannte Brennelemente aus dem Betrieb schweizerischer Nuklearanlagen sowie für verglaste hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle vor allem aus der Wiederaufarbeitung kann im Opalinuston des Zürcher Weinlands mit heutiger Technologie im Rahmen der gesetzlich vorgegebenen Sicherheitsanforderungen gebaut, betrieben, überwacht und innert einiger Jahre verschlossen werden. Die gesellschaftlichen Anforderungen nach Überwachung und Kontrolle, wie sie im Entwurf zum Kernenergiegesetz 2001 formuliert wurden, werden erfüllt. Die Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle ist ebenfalls gegeben. Raumreserven sind vorhanden und das Anlagen- und Betriebskonzept bietet eine hohe Flexibilität bei der Fortführung des Projektes.

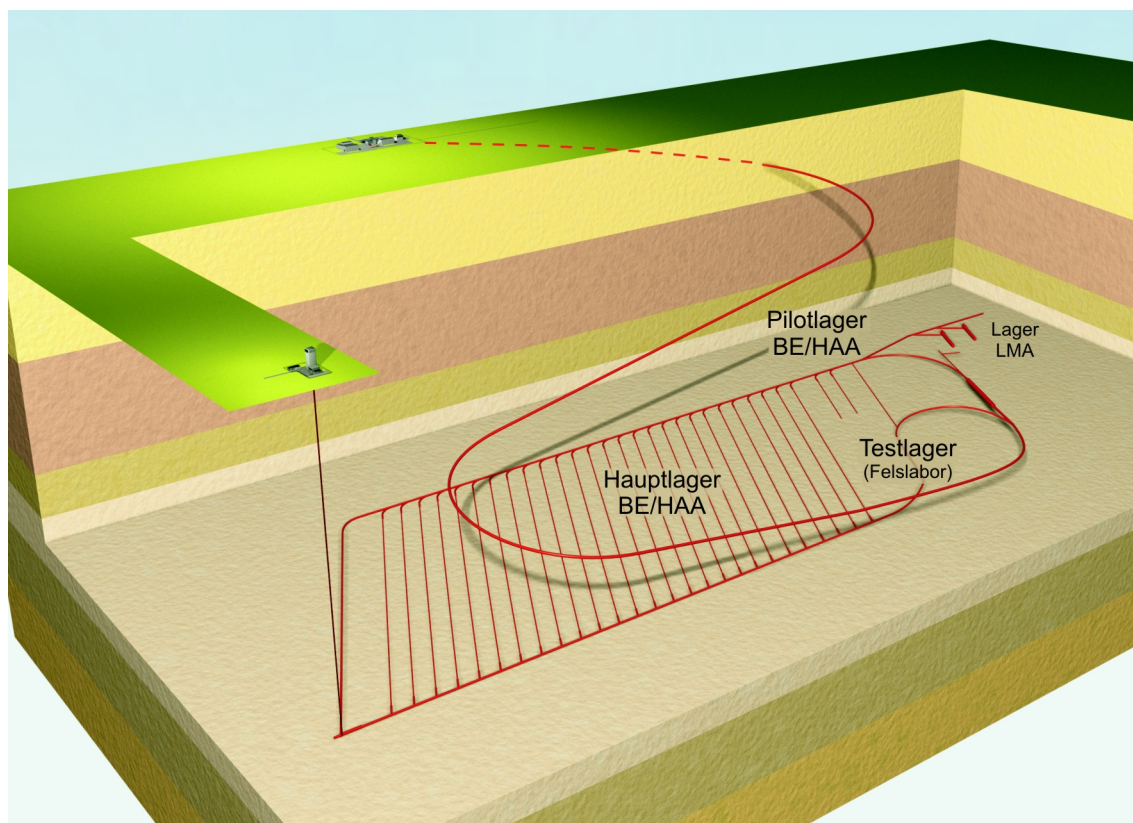


Fig. 10.1 Gesamtansicht des geologischen Tiefenlagers für BE/HAA/LMA

Zusammenfassend die wichtigsten Punkte, welche die vorhin gemachte Aussage stützen:

10.1 Bautechnische Machbarkeit

Die geologischen Verhältnisse im Zürcher Weinland sind bereits heute so umfassend bekannt (3D-Seismik, Bohrung Benken), dass die für den Bau eines geologischen Tiefenlagers geeignete Fläche klar abgegrenzt werden kann. Der Schichtverlauf des Wirtgesteins liegt auf wenige Meter genau vor und die Spannungsverhältnisse im Untergrund sind bekannt; ebenso die lokalen geotechnisch/felsmechanischen Parameter.

Dies erlaubt, die untertägigen Anlagen optimal anzulegen: Die Lagerstollen BE/HAA und die Lagertunnel LMA parallel zum tektonischen Spannungsfeld in Nord-Süd Richtung und in der Vertikalen möglichst in der Mittelebene des Opalinustons. Das Raumangebot lässt für die Anordnung der Lagerzone verschiedene Optionen zu und es liegen genügend Raumreserven vor.

Felsmechanische Berechnungen mit konkreten standortspezifischen Daten (3D-Seismik, Bohrung Benken, Felslabor Mont Terri) lassen den Schluss zu, dass alle baulichen Anlagen im Opalinuston machbar sind:

- In den *Lagerstollen BE/HAA* sind keine stabilitätsbedingten Einbauten notwendig. Felsanker und Netze genügen als Arbeitsschutz. Der gebirgsschonende Vortrieb mit einer TBM ist machbar. Die Stollenneigung (Steigung) von ca. 6 % bietet keine Schwierigkeiten. Der Bau von Lagerstollen BE/HAA wird auf die Bedürfnisse des Einlagerungsbetriebs ausgerichtet. Es werden keine Lagerstollen auf Vorrat erstellt. Die Stollen werden innerhalb von höchstens zwei Jahren wieder verschlossen.
- Die Auskleidungen der *übrigen Anlagen* bewegen sich im Rahmen des im Untertagbau Üblichen, und die nach SIA verlangten Sicherheitswerte können eingehalten werden. Der Vortrieb kann im Teilschnitt oder im schonenden Sprengverfahren erfolgen und basiert auf bewährter Technik. Die Auslegung der Anlagen erlaubt, diese, wie im Tunnelbau üblich, über lange Zeit offen zu halten.

Quellphänomene im Opalinuston sind bekannt und mit der heute verfügbaren Erfahrung sowie den technischen Möglichkeiten beherrschbar; ebenso der schichtparallele Vortrieb.

Das Durchfahren der über dem Opalinuston liegenden Schichten bietet stabilitätsmässig keine Schwierigkeiten. Ein fallender Vortrieb in wasserführenden Schichten ist bautechnisch beherrschbar. Der dazu vorgesehene Sprengvortrieb, allenfalls Teilschnittvortrieb erlaubt, entsprechende Vor- und Injektionsbohrungen auszuführen. Ebenso ist der Bau des Lüftungs- bzw. Bauschachtes machbar.

Das Zürcher Weinland ist sowohl per Schiene wie Strasse gut erschlossen. Es bieten sich somit für die Anordnung der Anlagen der Portalzone und des Schachtkopfes verschiedene Optionen. Konkrete Standorte werden später unter Berücksichtigung raumplanerischer Aspekte und lokaler Präferenzen festgelegt. Das Projekt bietet diesbezüglich eine hohe Flexibilität, insbesondere für die Portalzone, weil der Zugangstunnel als Verbindung zur Lagerzone in seiner Linienführung weitgehend frei ist (Fig. 10.1).

Das Anlagenkonzept bietet ferner genügend Flexibilität, um bei Fortführung des Projektes in späteren Phasen bei Bedarf die Anlage und den Betrieb an neue Erkenntnisse anzupassen. Das geologische Tiefenlager soll schrittweise errichtet, betrieben, überwacht und verschlossen werden.

10.2 Betriebssicherheit

Die Lageranlage wird so angelegt und betrieben, dass unzulässige radiologische Einwirkungen auf Mensch und Umwelt ausgeschlossen und konventionelle Unfälle möglichst vermieden werden:

- Alle Abfälle werden in einlagerungsfähiger Form angeliefert¹⁾: Die BE/HAA in verschweissten Metallbehältern, die LMA in Stahlfässern und Betongebinden.
- Die Vorbereitung der Abfälle für die geologische Tiefenlagerung erfolgt in geschlossenen, den Sicherheitsanforderungen entsprechend ausgelegten Räumen im Betriebsgebäude der Empfangsanlage. Für BE-Behälter¹⁾ und WA-COG-4 werden Transportabschirmungen, für HAA-Behälter¹⁾ Transportcontainer anlagenintern verwendet. Die übrigen LMA werden in Lagercontainer aus Beton verpackt und deren Resthohlräume zementvergossen. In dieser Form werden die Gebinde in die Lagerzone gebracht. Diese Massnahme begrenzt die Oberflächendosisleistung für alle Gebinde und ermöglicht dadurch eine direkte Intervention bei allfälligen Störfällen.
- Die technische Ausrüstung und Installationen sowie die Handhabungseinrichtungen und Transportmittel stützen sich auf bewährte Technik. Die Handhabung radioaktiver Abfälle gehört in jeder Nuklearanlage zum Routinebetrieb; ebenso ihr Transport.
- Die Auslegung der Zahnradbahn, welche zwischen der oberirdischen Empfangsanlage und dem unter Tag liegenden Zentralen Bereich verkehrt und die dazwischen liegende Höhendifferenz von ca. 620 m überwindet, erfolgt nach dem "fail-safe" Prinzip: Bei Betriebsstörungen erfolgt selbsttätig eine Notbremsung. In der Schweiz sind viele entsprechend ausgelegte Zahnradbahnen für den Personentransport in Betrieb; es kann auch hier auf eine grosse Erfahrung zurückgegriffen werden.
- Durch den Einsatz schienengebundener Transportmittel wird eine einfache Verkehrsführung und eine wenig störfallanfällige Verkehrsabwicklung erreicht. Die gesamte Anlage wird vom zentralen Kommandoraum in der Empfangsanlage überwacht und der Betrieb von dort aus geleitet.
- Die gesamte Anlage wird strahlenschutztechnisch in eine nicht kontrollierte und eine kontrollierte Zone unterteilt, und die Zutrittsregelungen werden entsprechend den diesbezüglichen HSK Richtlinien und Strahlenschutzverordnung gehandhabt. Abluft und Abwässer werden kontinuierlich radiologisch überwacht und Gegenstände aus dem kontrollierten Bereich werden freigemessen.
- Während des Einlagerungsbetriebs wird bei den BE/HAA nach jedem Behälter die zugehörige Verfüllung im Lagerstollen eingebracht und jeder Lagerstollen unmittelbar nach seiner Beschickung im Bereich der Schleuse verschlossen. Die Lagertunnel LMA werden nach ihrer Belegung mit Mörtel verfüllt und die Umladestation anschliessend mit Beton vergossen. Während des Einlagerungsbetriebs sind im Referenzkonzept somit alle mit Abfällen belegten Lagertunnel LMA und Lagerstollen BE/HAA verfüllt und verschlossen.
- Eine Flutung der unterirdischen Anlage wird durch Anordnung einer Pumpanlage im Testlager (Felslabor) und einer weiteren im Schachtfuss sowie deren redundante Einspeisung vom öffentlichen Netz bzw. Notstromaggregaten via Ringleitung verhindert. Weitere Pumpanlagen sind nach Bedarf vorgesehen.

¹⁾ Sollte die Konditionier- und Verpackungsanlage BE/HAA mit den Aussenanlagen der Portalzone realisiert werden, wie dies zur Abschätzung des maximalen Platzbedarfs für die Portalzone unter 1.3.2 angenommen wurde, würden die BE- und HAA-Behälter dort für die Endlagerung bereitgestellt.

- Im geologischen Tiefenlager sind verschiedene Brandschutzmassnahmen geplant. Insbesondere wird darauf geachtet, dass die Brandlasten minimiert und mögliche Zündquellen eliminiert werden.

10.3 Kontrolle und Überwachung

Die im Entwurf zum Kernenergiegesetz 2001 formulierte Idee der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung KGL ist im vorliegenden Referenzprojekt vollumfänglich umgesetzt worden. Das Tiefenlager ist gegliedert in die Elemente Testlager (Felslabor), Pilot- und Hauptlager.

Während des Betriebs der Anlage ist eine routinemässige Betriebsüberwachung wie bei jeder Nuklearanlage vorgesehen. Kontinuierliche oder periodische Überwachung und Messungen verschiedener Parameter wie etwa zur Überwachung der hydrogeologischen Verhältnisse, welche dazu beitragen, das Verhalten spezifischer Komponenten des Lagersystems in Bezug auf die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers zu überprüfen, sind insbesondere im Pilotlager und im Testlager (Felslabor) vorgesehen.

Die Überwachung und Kontrolle des Pilotlagers im Hinblick auf den Verschluss des Gesamtlagers kann zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Lagerrealisierung aufgenommen und dadurch eine lange Beobachtungsperiode erreicht werden. Dies gilt noch ausgeprägter für Untersuchungen im Testlager (Felslabor), welches bereits im Rahmen der Exploration unter Tage erstellt wird.

Ein langjähriges Offenhalten der Zugänge zu den beiden Kontrollstollen BE/HAA und LMA sowie zum Testlager (Felslabor) ist machbar, weil Unterhaltsarbeiten und evtl. Reparaturen an Tunnleinbauten jederzeit und ohne radiologische Exposition des Personals durchführbar sind.

10.4 Lagerverschluss

Im geologischen Tiefenlager ist ein stufenweiser Einbau der Verfüllung und Versiegelung bis zum vollständigen Verschluss der Gesamtanlage vorgesehen. Dadurch wird in jeder Situation ein optimaler Schutz der Abfälle vor internen und externen Einwirkungen sowie Einwirkungen Dritter erreicht:

- Die Lagertunnel LMA und Lagerstollen BE/HAA werden während des Einlagerungsbetriebs verfüllt und versiegelt.
- Nach einer ersten Überwachungsphase wird das Hauptlager inkl. Schacht verschlossen und der verschlossene Teil der Anlage durch Versiegelungen gesichert. Die Aussenanlagen im Schachtkopf werden abgebaut und das Gelände rekultiviert.
- Am Schluss werden die noch offenen Anlagen unter Tag verfüllt und ebenfalls versiegelt. Die Aussenanlagen im Portalbereich werden abgebaut und das Grundstück rekultiviert.

Der Verschluss der Anlage erfolgt durch individuell ausgelegte Versiegelungen an Schlüsselzonen und durch Streckenverfüllungen als System gestaffelter passiver Sicherheitsbarrieren derart, dass auf weitere Sicherheits- und Überwachungsmassnahmen verzichtet werden kann, wie dies in der HSK Richtlinie R-21 verlangt wird.

Durch den stufenweisen Verschluss des geologischen Tiefenlagers ist es möglich, die letzten Stollen und Tunnel im Opalinuston inkl. dessen Versiegelung bei zweischichtigem Verfüllbetrieb innerhalb eines Jahres zu realisieren. Für den Verschluss des verbleibenden Zugangstunnels inkl. Abbau und Rekultivierung der Aussenanlagen wird der Zeitaufwand bei ebenfalls

zweischichtigem Betrieb auf ca. 3 bis 3.5 Jahre geschätzt. Der vorgängige Verschluss des Hauptlagers inkl. Schacht ist bei einschichtigem Arbeitseinsatz in ca. 3 Jahren, zweischichtig in ca. 1.5 bis 2 Jahren machbar. Damit sind sowohl die Forderungen der HSK Richtlinie R-21 wie die Empfehlungen der EKRA erfüllt. Auch den Aspekten der Safeguards ist Rechnung getragen.

10.5 Rückholung

Die Möglichkeit der Rückholung eingelagerter Abfälle – speziell von abgebrannten Brennelementen, welche eine Energieressource darstellen – wurde überprüft: Die Rückholung ist mit heutiger Technik als standardisierter Ablauf machbar und kann auch für HAA angewendet werden. Die Rückholung der in Betoncontainern eingelagerten LMA ist ebenfalls machbar. Beide könnten aber nicht unbemerkt erfolgen. Überwachungsmassnahmen (Safeguards) zur Vermeidung missbräuchlicher Verwendung spaltbaren Materials sind daher einfach möglich.

Referenzen

- AkEnd (2002): Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Stellungnahme zum Auswahlverfahren Opalinuston im Zürcher Weinland. Im Auftrag der Deutsch-Schweizerischen Kommission für die Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen (DSK), (in Vorbereitung)
- Amstad, Ch. & Kovari, K. (2001): Untertagbau in quelfähigem Fels, ETH Zürich, Forschungsauftrag 52/94 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA)
- AtG (1959): Atomgesetz vom 23.12.1959, AtG, SR 732.0
- BB/AtG (1978): Bundesbeschluss zum Atomgesetz vom 6.10.1978, BB/AtG, SR 732.01
- BFE (2001): Bundesamt für Energie BFE: Sicherung von Kernanlagen und Kernmaterialien, Grundlagenrichtlinie
- BFS (1990): Bundesamt für Strahlenschutz 4/90: Plan Endlager für radioaktive Abfälle. Kurzfassung Stand 9/86. Schachtanlage Konrad Salzgitter
- Birkhäuser, Ph. et al. (2001): 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland, Nagra Technischer Bericht NTB 00-03, Nagra, Wettingen
- EBV (1983): Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung, EBV) vom 23. November 1983 (Stand am 29. August 2000). SR 742.141.1
- EDE (1998): Energie-Dialog Entsorgung: Schlussbericht des Vorsitzenden zu Händen des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
- Egger, P. (2001): Statistik der Tunnel und Stollen in Tunnelling Switzerland, Fachgruppe Untertagbau (FGU), Bertelsmann Fachzeitschriften, Gütersloh, Deutschland, ISBN 3-9803390-6-8
- EKRA (2000): Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle; Schlussbericht. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
- Enresa (1998): FEBEX, Final design and installation of the in situ test at Grimsel, Enresa Publicacion Tecnica 12/98, Enresa, Madrid
- Grondin, L. et al. (1994): The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Preclosure Assessment of a Conceptual System. N-03784-940010 (UFMED), COG-93-6. Ontario Hydro, Toronto
- HSK (1988): Konditionierung und Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle, HSK-R-14, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK), Villigen-HSK/Schweiz
- HSK (1992): Aufsichtsverfahren beim Bau und Betrieb von Kernanlagen, HSK-R-30, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK), Villigen-HSK/Schweiz
- HSK (1997): Erfassung der Dosen des beruflich strahlenexponierten Personals von Kernanlagen, HSK-R-12, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK), Villigen-HSK/Schweiz
- HSK (2001): Kurzer Überblick über das Auswahlverfahren eines Sedimentstandortes für die Endlagerung hochaktiver Abfälle, Bericht HSK 23/62, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK), Villigen-HSK/Schweiz
- HSK/KSA (1993): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, HSK-R-21, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK), Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA), Villigen-HSK/Schweiz
- HSK/KSA (1995): Richtlinien für den überwachten Bereich der Kernanlagen und des Paul Scherrer Institutes, HSK-R-07, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK), Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA), Villigen-HSK/Schweiz

- HSK/KSA/KUeR (1980): Ziele für den Schutz von Personen vor ionisierender Strahlung im Bereich von Kernkraftwerken, HSK-R-11, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK), Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA), Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität (KUeR), Villigen-HSK/Schweiz
- IAEA (1997): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel and on the Safety of Radioactive Waste Management, International Atomic Energy Agency Information Circular INFCIRC/546, Vienna
- IAEA (1998): IAEA STR-312, Safeguards for the final disposal of spent fuel in geological repositories (SAGOR), Volume 1, Executive summaries
- IAEA (2001): IAEA-TECDOC-1208, Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste
- ITASCA (1998): FLAC Version 3.4, ITASCA Consulting Group inc., Minneapolis, USA
- Kappes, J.A. (1998): Preliminary Preclosure Designs Basis Event Calculations for the Monitored Geologic Repository, TRW Environmental Safety Systems Inc., Las Vegas, Nevada. BC0000000-01717-020-0001, Revision 00A
- KEG (2001): Kernenergiegesetz (KEG), Entwurf vom 3.7.2001
- Konietzki, H., Blümling, P. & te Kamp, L. (2003): Opalinuston: Felsmechanische Untersuchungen, Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen
- Martin, C.D. & Lanyon, G.W. (2002): EDZ in Clay Shale, Mont Terri: Technical Report TR 2001-01, Nagra, Wettingen
- Mayer, G. & Wittmann, F.H. (1996): Fließfähiger, hochpermeabler Mörtel für die Verfüllung von kleinen Hohlräumen, Nagra Technischer Bericht NTB 95-03, Nagra, Wettingen
- McGinnes, D.F. (2002): Model radioactive waste inventory for reprocessing waste and spent fuel, Nagra Technischer Bericht NTB 01-01, Nagra, Wettingen
- Müller, W.H. et al. (2002): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland, Nagra Technischer Bericht NTB 99-08, Nagra, Wettingen
- Nagra (1980): Projektstudie für die Endlagerung von hochaktiven Abfällen in tiefliegenden geologischen Formationen sowie für die Zwischenlagerung, Nagra Technischer Bericht NTB 80-02, Nagra, Wettingen
- Nagra (1985): Projekt Gewähr 1985, Vols. 1-8, Vol. 9 (English Summary), Nagra Gewähr Berichtserie NGB 85-01/09, Nagra, Wettingen
- Nagra (1988): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988: Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz, Nagra Technischer Bericht NTB 88-25, Nagra, Wettingen
- Nagra (1991): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1990: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1988 bis 1990 und Konzept für das weitere Vorgehen, Nagra Technischer Bericht NTB 91-19, Nagra, Wettingen
- Nagra (1994a): Kristallin-I Sicherheitsbericht, Nagra Technischer Bericht NTB 93-22, Nagra, Wettingen
- Nagra (1994b): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1993: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990 bis 1994 und Konzept für weitere Untersuchungen, Nagra Technischer Bericht NTB 94-10, Nagra, Wettingen
- Nagra (2000): Endlager HAA/LMA – Opalinuston, Felsmechanische Berechnungen und Dimensionierung der Ausbruchssicherung zum Nachweis der baulichen Machbarkeit, Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen
- Nagra (2001): Sondierbohrung Benken, Untersuchungsbericht, Nagra Technischer Bericht NTB 00-01, Nagra, Wettingen

- Nagra (2002a): Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Nagra Technischer Bericht NTB 02-03, Nagra, Wettingen
- Nagra (2002b): Project Opalinus Clay, Safety report, Nagra Technical Report NTB 02-05, Nagra, Wettingen
- Nagra (2002c): Project Opalinus Clay, Models, Codes and Data for Safety Assessment, Nagra Technical Report NTB 02-06, Nagra, Wettingen
- Naundorf, W. & Wollenberg, R. (1992): Herstellung von Bentonitgranulat mit hoher Schüttdichte zur Bohrlochabdichtung, Nagra Technischer Bericht NTB 92-06, Nagra, Wettingen
- NEA (1997): Lessons learnt from ten performance assessment studies, OECD/NEA, Paris, France
- NEA (1999a): Geologic Disposal of Radioactive Waste: Review of Developments in the last Decades, OECD/NEA, Paris, France
- NEA (1999b): Confidence in the Long-term Safety of Deep Repositories – its Development and Communication, OECD/NEA, Paris, France
- NEA (2000): Regulatory Reviews of Assessments of Deep Geological Repositories, OECD/NEA, Paris, France
- NRC (2001): Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges, National Academy Press, Washington, DC
- RID/RSD (1999): Ordnung für die internationale und schweizerische Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter, gültig ab 1. Januar 1990, Stand 1. Januar 1999.
- SIA (1992): Eurocode 2 – Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, V 162.001, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich
- SIA (1993): Betonbauten, SIA. Norm 162, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich
- SIA (1998): Erfassen des Gebirges im Untertagbau, SIA Empfehlung 199, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich
- Sitz, P. (2003): Verschlusskonzept Geologisches Tiefenlager Opalinuston, Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen
- StSG (1991): Strahlenschutzgesetz vom 22.3.1991, StSG, SR 814.50
- StSV (1994): Strahlenschutzverordnung vom 22.6.1994, StSV, SR 814.501
- SUVA (1996): Medizinische Prophylaxe bei Untertag-Arbeiten im feucht-warmen Klima, 1. Auflage – Februar 1996, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, Luzern
- SVA (2002): Summary of operating experience in Swiss nuclear power plants 2001, Schweizerische Vereinigung für Atomenergie, Bern
- Thury, M. et al. (1994): Geologie und Hydrogeologie des Kristallins der Nordschweiz, Nagra Technischer Bericht NTB 93-01, Nagra, Wettingen
- VSE (1978): Die nukleare Entsorgung der Schweiz, Verband schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE), Gruppe der Kernkraftwerksbetreiber und -Projektanten (GKBP), Konferenz der Überlandwerke (UeW) und Nagra, Schweiz