



ARBEITSBERICHT NAB 23-23

Schachtförderanlagen für geologische
Tiefenlager

Juni 2023



ARBEITSBERICHT NAB 23-23

Schachtförderanlagen für geologische
Tiefenlager

Juni 2023

STICHWÖRTER

RBG, Rahmenbewilligungsgesuch, Etappe 3, gTL, Referenzbericht,
Schachtförderung, Schachtförderanlage, Zugang nach Untertag

**Nagra | Nationale Genossenschaft
für die Lagerung radioaktiver Abfälle**
Hardstrasse 73 | 5430 Wettingen | Schweiz
+41 56 437 11 11 | info@nagra.ch | nagra.ch

Nagra Arbeitsberichte stellen Ergebnisse aus laufenden Aktivitäten dar, welche nicht zwingend einem vollumfänglichen Review unterzogen wurden. Diese Berichtsreihe dient dem Zweck der zügigen Verteilung aktueller Fachinformationen.

Copyright © 2023 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 (Executive Summary)

Der vorliegende Bericht stellt einen frühzeitig veröffentlichten Referenzbericht für das Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) eines geologischen Tiefenlagers dar und beschreibt Schachtförderanlagen.

Schachtförderung ist eine etablierte Technik, um Zugang zu untertägigen Anlagen zu haben. Langjährige Erfahrungen liegen vor allem in traditionellen Bergbauländern wie Deutschland, England, USA, Kanada, Skandinavien und auch Südafrika vor. In solchen Ländern bestehen umfangreiche Gesetze, Verordnungen und Vorschriften für den sicheren Bau und Betrieb von Schachtförderanlagen. In das technische Regelwerk fliessen fortlaufend Erkenntnisse aus Schadensvorkommnissen sowie aus Wissenschaft und Technik ein. Die schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva) berücksichtigt diese langjährigen, internationalen Erfahrungen und Regelwerke für Schachtförderanlagen in der Schweiz.

Die Konzepte für das geologische Tiefenlager der Schweiz sehen Lagerebenen bis ca. 900 m unter der Erdoberfläche vor, die durch bis zu drei Vertikalschächte als Zugangsbauwerke erschlossen werden. Im Zugangsschacht sind eine Güterförderanlage mit einem Grossförderkorb und eine separate Personenförderanlage geplant. Im Betriebsschacht sind drei Förderanlagen vorgesehen: ein Grossförderkorb, ein Personenförderkorb sowie zusätzlich eine Gefässförderanlage für Ausbruchmaterial. Im zweiten Nebenzugang, dem Lüftungsschacht, befindet sich keine fest installierte Schachtförderanlage. In speziellen Situationen, z. B. bei einer allfälligen Evakuierung der untertägigen Anlagen, kann dieser Lüftungsschacht mit einer mobilen Förderanlage befahren werden. Diese kann bei Bedarf auch in den anderen beiden Schächten zum Einsatz kommen.

Schachtförderung ist auch in Tiefenlagerprojekten anderer Länder vorgesehen und gilt als anerkannter Stand der Technik. Nicht immer wird ausschliesslich auf Schachtförderung gesetzt: Einige Länder sehen nebst Schächten auch Tunnel oder Schrägschächte für den Zugang nach Untertag vor.

Ein Lastabsturz als schlimmster denkbarer Unfall bei der Schachtförderung kann durch Einhaltung der Vorschriften und des Regelwerks zuverlässig verhindert werden. Die sorgfältige und redundante Auslegung sicherheitskritischer Komponenten wie der Seile leistet hierbei einen wichtigen Beitrag. Die in diesem Bericht dargestellten beispielhaften Zweiseil-Trommelfördermaschinen können, wie auch Treibscheibenanlagen, so ausgelegt, gebaut und betrieben werden, dass sie die Anforderungen eines geologischen Tiefenlagers erfüllen.

Insgesamt können Schächte mit Schachtförderanlagen als bestens geeignete und sichere Zugangsmöglichkeit zu einem geologischen Tiefenlager betrachtet werden. Bei richtiger Planung und verantwortungsbewusstem Umgang gewährleisten sie einen sicheren und zuverlässigen Betrieb eines geologischen Tiefenlagers.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung (Executive Summary).....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Figurenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Kontext und Ziele dieses Berichts	1
1.2 Hinweis auf ergänzende Angaben zum Bau, Betrieb und Verschluss eines Tiefenlagers	2
2 Randbedingungen, Annahmen und Anforderungen	3
2.1 Regelwerke, Normen, Vorschriften, gesetzliche Rahmenbedingungen	3
2.2 Annahmen zum Lagertyp und zur Anlagenkonfiguration	3
2.3 Annahmen zum Fördergut	4
2.4 Annahmen zu Fördergeschwindigkeiten	6
2.5 Varianten für Förderanlagen.....	7
2.5.1 Aufstellung (Tages- oder Blindschächte)	7
2.5.2 Seilträger (Treibscheibe oder Trommel).....	8
2.5.3 Aufstellungsort der Fördermaschine (Turm- oder Fluraufstellung)	9
2.5.4 Fördermittel (Förderkorb oder Gefässförderung)	10
2.5.5 Anzahl Fördermittel (ein- oder zweitürmig).....	11
2.5.6 Anzahl Förderseile (Einseil- oder Mehrseil-Förderanlage)	12
2.5.7 Führungseinrichtungen (Spurlatten oder Führungsseile).....	13
2.6 Annahmen zum Förderanlagentyp.....	14
3 Schachtförderung im Zugangsschacht	15
3.1 Schachtförderung im Grossförderkorb	16
3.2 Personenförderung (Seilfahrt)	20
3.3 Sicherheits- und Störfallbetrachtungen.....	22
4 Schachtförderung im Betriebsschacht	23
4.1 Schachtförderung im Grossförderkorb	24
4.2 Gefässförderung (Skipförderung)	25
4.3 Personenförderung (Seilfahrt)	26
4.4 Sicherheits- und Störfallbetrachtungen.....	26
5 Schachtförderung im Lüftungsschacht.....	27
5.1 Funktion des Lüftungsschachts im Einlagerungsbetrieb	27
5.2 Mobile Schachtwinde	27

6	Schachtförderung in anderen Tiefenlagerprojekten	28
6.1	Finnland	28
6.2	Schweden.....	29
6.3	Deutschland	30
6.4	Frankreich.....	32
6.5	USA	33
6.6	Fazit zu Tiefenlagerprojekten in anderen Ländern	34
7	Schlussfolgerungen	35
8	Literaturverzeichnis	36

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Übersichtstabelle der grössten vorgesehenen Endlagerbehälter	5
--	---

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1: Modellhafte Darstellung eines Kombilagers	4
Fig. 2-2: Systemskizze mit Material- und Personenströmen in den Schächten.....	6
Fig. 2-3: Skizze eines Tagesschachts und eines Blindschachts.....	7
Fig. 2-4: Skizze einer Treibscheiben- und einer Trommelanlage.....	8
Fig. 2-5: Skizze eines Fördergerüsts und eines Förderturms.....	9
Fig. 2-6: Beispielhaftes Fördergestell (Förderkorb) und Fördergefäss (Skip).....	10
Fig. 2-7: Skizze einer Korb-Korb- und einer Korb-Gegengewicht-Förderanlage.....	11
Fig. 2-8: Skizze einer Einseil- und einer Mehrseil-Förderanlage.....	12
Fig. 2-9: Skizze einer Seil- und einer Spurlattenführung	13
Fig. 2-10: Skizze einer Windenanlage (links) und einer Korb-Gegengewicht-Förderanlage (rechts) mit Fördermaschinen in Fluraufstellung.....	14
Fig. 3-1: Beispielhafte Schachtförderanlagen für den Zugangsschacht	15
Fig. 3-2: Beispielhafter Grossförderkorb	17
Fig. 3-3: Schachtscheibe (Grundriss) eines beispielhaften Zugangsschachts	18
Fig. 3-4: Beispielhafte Zweiseil-Förderwinde für einen Grossförderkorb	19
Fig. 3-5: Beispielhafte Personenförderkörbe (mit einer resp. zwei Etagen).....	20
Fig. 3-6: Beispielhafte Zweiseil-Förderwinde für die Personenförderung	21
Fig. 4-1: Beispielhafte Schachtförderanlagen für den Betriebsschacht.....	23
Fig. 4-2: Schachtscheibe (Grundriss) eines beispielhaften Betriebsschachts.....	24
Fig. 4-3: Beispielhaftes Fördergefäss (Skip) für den Betriebsschacht	25
Fig. 5-1: Mobile Schachtwinde in Arbeitsposition.....	27
Fig. 6-1: Projektskizze der Zugangsbauwerke und Tiefenlageranlagen im Onkalo-Projekt (Finnland).....	28
Fig. 6-2: Projektskizze des geologischen Tiefenlagers Forsmark (Schweden).....	29
Fig. 6-3: 3D-Grafik des zukünftigen Endlagers Schacht Konrad in Salzgitter	30
Fig. 6-4: Schacht Konrad mit dem denkmalgeschützten Fördergerüst.....	31
Fig. 6-5: Fördermaschine der neuen Schachtförderanlage bei Schacht Konrad.....	31
Fig. 6-6: Übersicht über das Projekt Cigéo in Frankreich.....	32
Fig. 6-7: Luftbild der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in den USA	33
Fig. 6-8: Schema der Schachtförderanlage der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP).....	34

Abkürzungsverzeichnis

Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Frankreich)
BE	(abgebrannte) Brennelemente
HAA-ELB	Endlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente oder für verglaste, hochaktive Abfälle
BFE	Bundesamt für Energie
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung (Deutschland)
BVOS	Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (Deutschland)
Cigéo	Centre industriel de stockage géologique (Frankreich)
DIN	Deutsches Institut für Normung
ELB	Endlagerbehälter
EN	Europäische Norm
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
FREI	Flucht, Rettung, Evakuierung, Intervention
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (Überbegriff für abgebrannte Brennelemente und verglaste Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente)
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernenergieverordnung
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NEAT	Neue Eisenbahn-Alpentransversale
NTB	Nagra Technischer Bericht
NZA	Nebenzugangsanlage
OFA	Oberflächenanlage
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
SMA-ELB	Endlagerbehälter für schwach- und mittelaktive Abfälle
Suva	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
TAS	Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (Deutschland)
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant (USA)

1 Einleitung

1.1 Kontext und Ziele dieses Berichts

Das Kernenergiegesetz schreibt die Entsorgung aller radioaktiven Abfälle der Schweiz in geologischen Tiefenlagern vor (KEG 2003). Die Realisierung erfolgt in einem mehrstufigen Bewilligungsverfahren, beginnend mit der Rahmenbewilligung (Art. 12 KEG 2003). Mit ihr werden Standort, Zweck der Anlage und Grundzüge des Projekts festgelegt. Weitergehende Festlegungen erfolgen stufengerecht in späteren Bewilligungsschritten. Das Auswahlverfahren für die Bezeichnung von Lagerstandorten erfolgt vorgängig zum Rahmenbewilligungsverfahren gemäss dem vom Bundesrat verabschiedeten Sachplan geologische Tiefenlager (BFE 2008). In der laufenden Etappe 3 hat die Nagra die drei Standortgebiete Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost vertieft untersucht. Zurzeit bereitet sie ein Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) für ein Kombilager in Nördlich Lägern mit den Oberflächenanlagen am Standort Haberstal vor. Die Verpackung der Abfälle in Endlagerbehälter soll am Standort Zwiilag erfolgen.

Die vorgeschriebenen Unterlagen für ein RBG umfassen Berichte zu Sicherheit und Sicherung, zur Umweltverträglichkeit, zur Abstimmung mit der Raumplanung, zur Überwachung und Beobachtungsphase, zum Verschluss des Tiefenlagers, zur Stilllegung der Oberflächenanlage sowie zur Begründung der Standortwahl (Art. 23 & 62 KEV 2004). Weiter ist das RBG gemäss den Vorgaben des ENSI für Etappe 3 (ENSI 2018) zu begründen. Die Gesuchsunterlagen zum RBG stützen sich auch auf Referenzberichte, die teilweise vor Einreichung des RBG veröffentlicht werden.

Der vorliegende Bericht stellt solch einen frühzeitig veröffentlichten Referenzbericht dar und beschreibt Schachtförderanlagen für ein modellhaftes Kombilager. Das Konzept der Schachtförderung gilt für alle standortspezifischen Lagerprojekte, die gemäss ENSI 33/649 (ENSI 2018) dem Standortvergleich – dokumentiert im Bericht zur Begründung der Standortwahl – sowie den Sicherheitsnachweisen am gewählten Standort – dokumentiert im Sicherheitsbericht – zugrunde liegen.

Der Bericht richtet sich primär an die Prüfbehörde ENSI. Er ist aber so verfasst, dass er auch einem erweiterten Publikum, insbesondere Fachgremien und interessierten Kreisen der Öffentlichkeit, als Information dienen kann.

Der Bericht beschreibt Schachtförderanlagen¹, die für den Zugang zu den untertägigen Anlagen und Einrichtungen benötigt werden. Er fokussiert auf den Einlagerungsbetrieb, da dessen Betriebsabläufe am komplexesten und für die Sicherheit am relevantesten sind. Während im Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75 (Sindern & Borowski 2014) die Technik und Sicherheit von Schachtförderanlagen im Allgemeinen und eine Treibscheibenanlage im Konzept beschrieben wurde, wird in diesem Bericht schwerpunktmässig auf Trommelförderanlagen eingegangen. Dieser Bericht ist somit als Ergänzung und Weiterentwicklung von Konzepten für die Schachtförderung zu verstehen. Er soll zeigen, dass ein geologisches Tiefenlager mit Schachtförderanlagen sicher betrieben werden kann, ohne damit die Zugangsvariante schon festzulegen.

¹ Die Schachtförderanlagen in diesem Bericht sind konzeptuelle Entwürfe für ein modellhaftes Kombilager, die ohne ihre umhüllenden Bauwerke beschrieben werden.

1.2 Hinweis auf ergänzende Angaben zum Bau, Betrieb und Verschluss eines Tiefenlagers

Der vorliegende Bericht ist – wie in Kap. 1.1 erläutert – einer von mehreren RBG-Referenzberichten. Ergänzende Angaben zum Bau, Betrieb und Verschluss eines Tiefenlagers sind in folgenden Unterlagen zu finden, die mit dem RBG vollständig vorliegen werden:

- Das Lagerkonzept ist im Entsorgungsprogramm 2021 (Nagra 2021a) beschrieben.
- Wie das Lagerkonzept modular umgesetzt werden kann, ist im Nagra Arbeitsbericht NAB 22-35 (Nagra 2022c) dargestellt.
- Die für den Standortvergleich erstellten Lagerprojekte werden für das RBG in einem bautechnischen Dossier (Nagra NAB 23-01 *in Bearb.*) zusammengestellt.
- Das Betriebskonzept für ein geologisches Tiefenlager ist im Nagra Arbeitsbericht NAB 21-06 (Nagra 2022a) beschrieben.
- Erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag sind im Nagra Arbeitsbericht NAB 21-14 (Nagra 2021b) beschrieben.
- Die Bewetterung der untertägigen Anlagen (Frischlufzufuhr und Abluftableitung) ist im Lüftungskonzept (Nagra 2022b) thematisiert.
- Angaben und Hinweise zum Strahlenschutzkonzept finden sich im Nagra Arbeitsbericht NAB 14-51 (Nagra 2014) und im Nagra Technischen Bericht NTB 13-01 (Nagra 2013).
- Das Überwachungskonzept ist im Nagra Arbeitsbericht NAB 20-28 (Fanger et al. 2021) beschrieben.
- Sicherheitsbetrachtungen für Untertageanlagen sind im Nagra Arbeitsbericht NAB 14-51 (Nagra 2014) dokumentiert.
- Für Informationen zu den Verschluss- und Verfüllungsarbeiten des geologischen Tiefenlagers wird auf den Nagra Arbeitsbericht NAB 21-12 (Nagra 2021c) verwiesen. Eine allfällige Rückholung ist im Nagra Arbeitsbericht NAB 21-13 (Nagra 2022d) beschrieben.
- Die exemplarische Umsetzung der Oberflächenanlage und des geologischen Tiefenlagers am Standort Haberstal in Nördlich Lägern wird im Nagra Technischen Bericht NTB 24-11 (Nagra NTB 24-11 *in Bearb.*) dargestellt.

2 Randbedingungen, Annahmen und Anforderungen

Diesem Bericht liegen Randbedingungen und Annahmen zugrunde, die nicht als (Vor-)Festlegungen missverstanden werden dürfen. Festlegungen für das geologische Tiefenlager werden ausschliesslich im Rahmen der schrittweisen Bewilligungsverfahren² gemäss Kernenergiegesetz (KEG 2003) getroffen. Anforderungen an die Schachtförderanlagen lassen sich aus den Randbedingungen und Annahmen ableiten.

2.1 Regelwerke, Normen, Vorschriften, gesetzliche Rahmenbedingungen

Wie im Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75 (Sindern & Borowski 2014) erläutert, gibt es in der Schweiz kein eigenes technisches Regelwerk für Schachtförderanlagen. Es wird in der Regel Bezug auf die deutschen Vorgaben genommen, die in der Schweiz und in vielen anderen Ländern gut akzeptiert sind und oft angewendet werden. Ein Beispiel für die Anwendung des deutschen Regelwerks für Schachtförderanlagen in einem Schweizer Projekt ist der Gotthard-Basistunnel (NEAT).

Die Auslegung der in diesem Bericht dargestellten Anlagen erfolgte dementsprechend nach dem Regelwerk TAS (Techn. Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS 2005)). Dieses Regelwerk wird in den deutschen Bergverordnungen für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS 2003), die auf dem Bundesberggesetz (BBergG 1980) beruhen, als «allgemeine Regeln der Sicherheitstechnik» für den Bau und die Ausführung von Schachtförderanlagen bezeichnet (siehe auch Kap. 2 im Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75 (Sindern & Borowski 2014)). Das Regelwerk TAS wird fortlaufend weiterentwickelt und fortgeschrieben. Zurzeit ist eine neue Revision in Vorbereitung.

2.2 Annahmen zum Lagertyp und zur Anlagenkonfiguration

Für die Beschreibung der Schachtförderanlagen wird ein Kombilager angenommen, das die sichere Entsorgung aller radioaktiven Abfälle der Schweiz in einem einzigen geologischen Tiefenlager ermöglicht. Grundsätzlich ist ein Kombilager repräsentativ für HAA- und SMA-Einzellager, da sich Einzellager durch Weglassen der entsprechenden Elemente aus dem Kombilager ableiten lassen.

² Entscheide zu betrieblichen Aspekten werden beispielsweise im Rahmen der nuklearen Betriebsbewilligung getroffen.

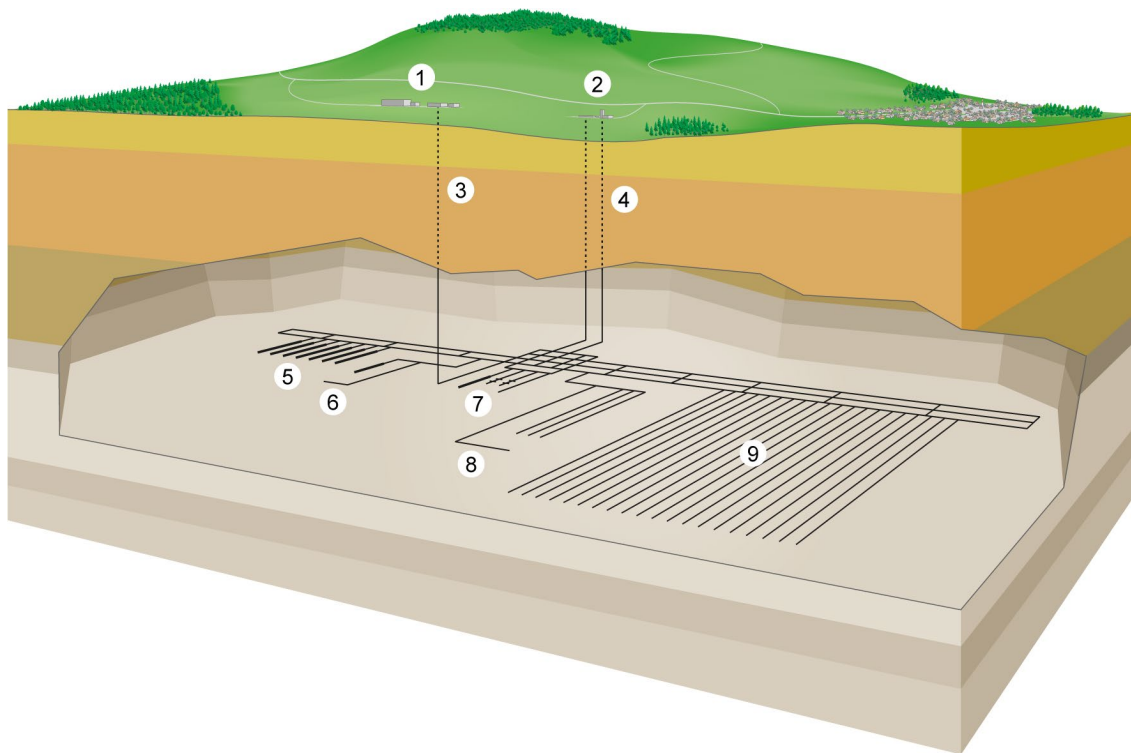


Fig. 2-1: Modellhafte Darstellung eines Kombilagers

Darstellung gemäss Entsorgungsprogramm 2021 (Fig. 3.2-2 in NTB 21-01 (Nagra 2021a)):

- 1) Oberflächenanlage (OFA)
- 2) Nebenzugangsanlage (NZA)
- 3) Zugangsschacht (Hauptzugang)
- 4) Betriebsschacht und Lüftungsschacht (Nebenzugänge)
- 5) Hauptlager SMA
- 6) Pilotlager SMA
- 7) Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag / Testbereiche
- 8) Pilotlager HAA
- 9) Hauptlager HAA

Der Zugang zu den untertägigen Lagerteilen sowie deren Versorgung (z.B. Frischluft, Energie, Medien) wird durch verschiedene Bauwerke ermöglicht: Drei Schächte (Zugangsschacht, Betriebsschacht, Lüftungsschacht) führen von der Erdoberfläche hinunter in den zentralen Bereich auf Lagerniveau (siehe auch Fig. 2-1). Das Lagerniveau befindet sich modellhaft ca. 800 m unter der Erdoberfläche³. Die Schächte sind mit einem Durchmesser von ca. 8.5 m vorgesehen.

2.3 Annahmen zum Fördergut

Für den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers werden untertag verschiedene Materialien und Personen benötigt, die mit Schachtförderanlagen in unterschiedlichen Schächten transportiert werden (siehe hierzu das Betriebskonzept (Nagra 2022a)). Folgende Materialströme müssen während des Einlagerungsbetriebs betrachtet werden (siehe auch Fig. 2-2):

³ Die Tiefenlage 800 m ist die im Standortgebiet Nördlich Lägern anzutreffende grösste Tiefe des Opalinuston. In den Standortgebieten Jura Ost und Zürich Nordost liegt der Opalinuston höher. Damit ist die Annahme von 800 m abdeckend.

- Radioaktive Abfälle in Endlagerbehältern⁴ (die sich ggf. in Transportbehältern befinden und auf Transportwagen im Grossförderkorb des Zugangsschachts von der Erdoberfläche hinunter auf Lagerniveau gefördert werden)
- Verfüll- und Versiegelungsmaterialien (Förderung auf oder in Transport- oder Silowagen im Grossförderkorb des Zugangsschachts)
- Betriebsmittel, Instandhaltungs- und Versorgungsmaterialien für die untertägigen Einrichtungen (Förderung auf oder in Transport- oder Silowagen im Grossförderkorb des Betriebsschachts)
- Baumaterialien für die fortlaufende Erstellung neuer HAA-Lagerstollen (Förderung auf oder in Transport- oder Silowagen im Grossförderkorb des Betriebsschachts)
- Ausbruchmaterial von der fortlaufenden Erstellung neuer HAA-Lagerstollen (Förderung in der Gefässförderanlage (Skip) des Betriebsschachts)

Bei den zu transportierenden Personen handelt es sich im Normalbetrieb um:

- Betriebspersonal, das unmittelbar mit der Einlagerung radioaktiver Abfälle in der kontrollierten Zone zu tun hat (Förderung im Personenkorb des Zugangsschachts)
- Betriebspersonal, das die kontrollierte Zone nicht betreten muss (z. B. Betreuungspersonal erdwissenschaftlicher Untersuchungen, Förderung im Personenkorb des Betriebsschachts)
- Baupersonal für die fortlaufende Erstellung neuer HAA-Lagerstollen (Förderung im Personenkorb des Betriebsschachts, bei grösseren Gruppen und freier Förderkapazität ggf. auch im Grossförderkorb des Betriebsschachts)
- Besucherinnen und Besucher (Förderung im Personenkorb des Betriebsschachts, bei grösseren Gruppen und freier Förderkapazität ggf. auch im Grossförderkorb des Betriebsschachts)

In speziellen Situationen (z. B. Notfälle, ausserordentliche Ereignisse) müssen Personen evakuiert und Interventionspersonal und -materialien durch die Zugangsbauwerke transportiert werden. In solchen Fällen muss situativ entschieden werden, welche Schächte benutzt werden. Grundsätzlich stehen für Flucht, Rettung, Evakuierung und Intervention (FREI) alle drei Zugangsbauwerke (Zugangsschacht, Betriebsschacht und Lüftungsschacht) zur Verfügung.

Tab. 2-1: Übersichtstabelle der grössten vorgesehenen Endlagerbehälter

Die in der Tabelle genannten Zahlen sind ungefähre Maximalwerte.

Endlagerbehälter	Abmessungen	Gewicht
HAA-ELB	Länge / Durchmesser: 5.2 m / 1.1 m	ca. 25 t
SMA-ELB	Länge / Breite / Höhe: 4.5 m / 2 m / 2 m	ca. 60 t

⁴ Die grössten und schwersten vorgesehenen Endlagerbehälter sind in Tab. 2-1 aufgelistet.

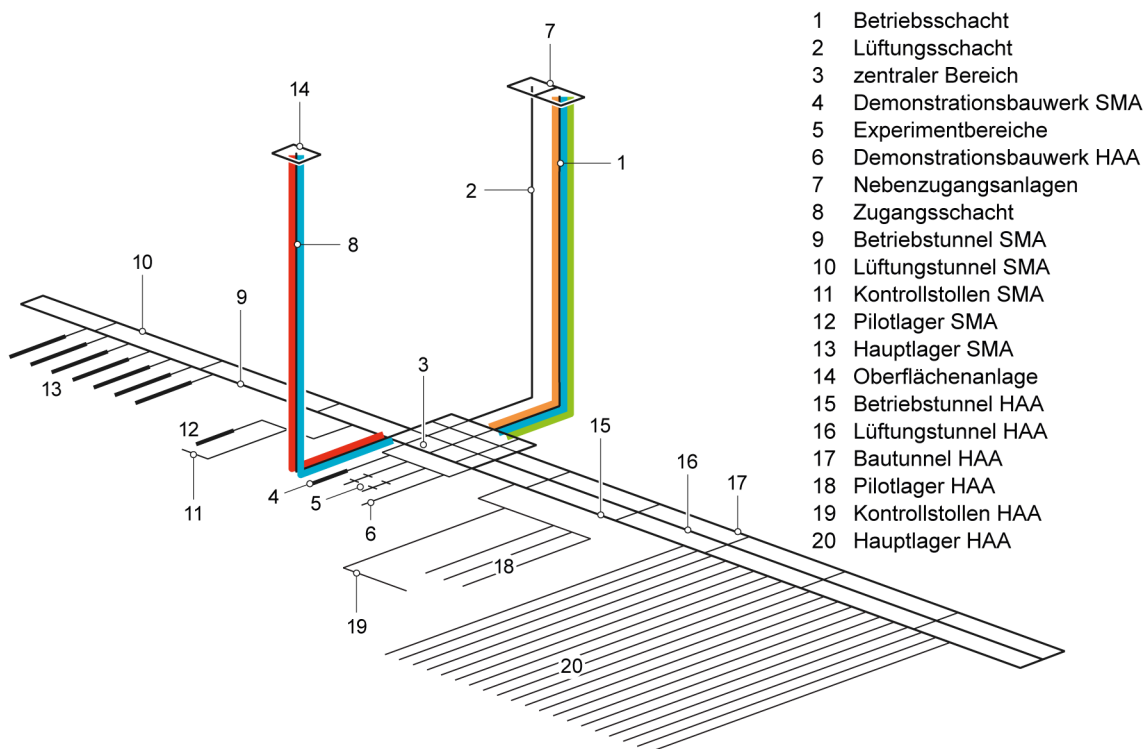


Fig. 2-2: Systemskizze mit Material- und Personenströmen in den Schächten

Rot: Endlagerbehälter mit radioaktiven Abfällen, Verfüll- und Versiegelungsmaterial

Blau: Betriebspersonal

Grün: Baumaterial, Baupersonal, Ausbruchmaterial

Orange: Besucherinnen und Besucher

Für FREI (Flucht, Rettung, Evakuierung und Intervention) stehen alle drei Zugangsbauwerke (Zugangsschacht, Betriebsschacht und Lüftungsschacht) zur Verfügung.

2.4 Annahmen zu Fördergeschwindigkeiten

Aufgrund von Sicherheitsbetrachtungen hinsichtlich nuklearer Betriebssicherheit wurde für Transporte mit radioaktiven Materialien in einer Schachtförderanlage als Richtwert eine maximale Geschwindigkeit von 1 m/s postuliert (Nagra 2014). Im Betriebskonzept eines geologischen Tiefenlagers (Nagra 2022a) wurde aufgezeigt, dass mit einer solchen Geschwindigkeit kein Engpass durch die Schachtförderung entsteht. Dementsprechend wird auch im hier vorliegenden Bericht von einer beispielhaften, maximalen Transportgeschwindigkeit von 1 m/s für den Grossförderkorb im Zugangsschacht ausgegangen.

Ebenfalls im Betriebskonzept (Nagra 2022a) wurde aufgezeigt, dass im Betriebsschacht mit einer Fahrgeschwindigkeit vom 4 m/s genügend Transportkapazität für den Betrieb des geologischen Tiefenlagers besteht. Dementsprechend wird hier für die Förderanlagen im Betriebsschacht eine maximale Transportgeschwindigkeit von 4 m/s angenommen.

2.5 Varianten für Förderanlagen

Abhängig vom Zweck der Anlage und den resultierenden Anforderungen sind unterschiedliche Eigenschaften der Förderanlagen wichtig. So liegt die Priorität in Gewinnungsbergwerken (z. B. Salz- oder Kalibergwerke) meist auf möglichst grossen Förderleistungen.

Für Schachtförderanlagen gibt es zahlreiche Varianten (siehe hierzu auch Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75 (Sindern & Borowski 2014)), die sich z. B. aufgrund der nachfolgend dargestellten Merkmale unterscheiden lassen.

2.5.1 Aufstellung (Tages- oder Blindschächte)

Bei einem Tagesschacht befindet sich das obere Ende des Schachts an der Erdoberfläche, während dieses bei einem Blindschacht in einer untertägigen Kaverne liegt. Dementsprechend können Schachtförderanlagen entweder an der Erdoberfläche (in der Regel in einem Schachtkopfgebäude) oder untertägig in einer Schachtkopfkaверne aufgestellt werden.

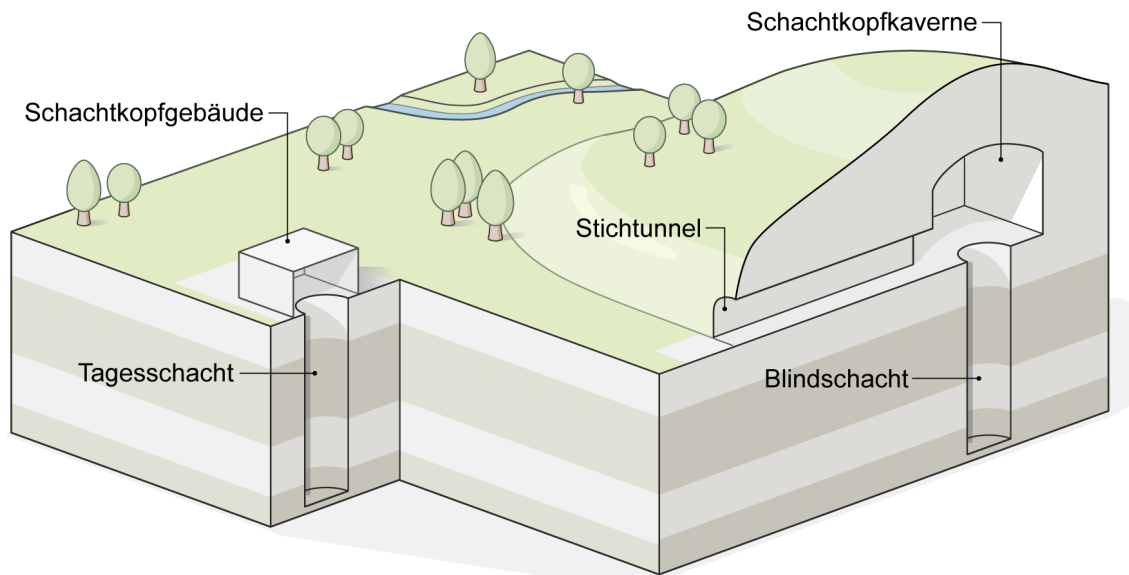


Fig. 2-3: Skizze eines Tagesschachts und eines Blindschachts

2.5.2 Seilträger (Treibscheibe oder Trommel)

Bei einer Treibscheibenanlage wird das Förderseil umgelenkt. An beiden Enden der Förderseile hängen Lasten (z. B. jeweils ein Förderkorb oder ein Förderkorb und ein Gegengewicht). Das Förderseil und damit das Fördergut wird durch Reibungskräfte an der Treibscheibe bewegt.

Bei einer Trommelanlage (auch Windenanlage genannt) wird das Förderseil auf einer Trommel auf- oder abgewickelt, um das Fördergut im Schacht zu bewegen.

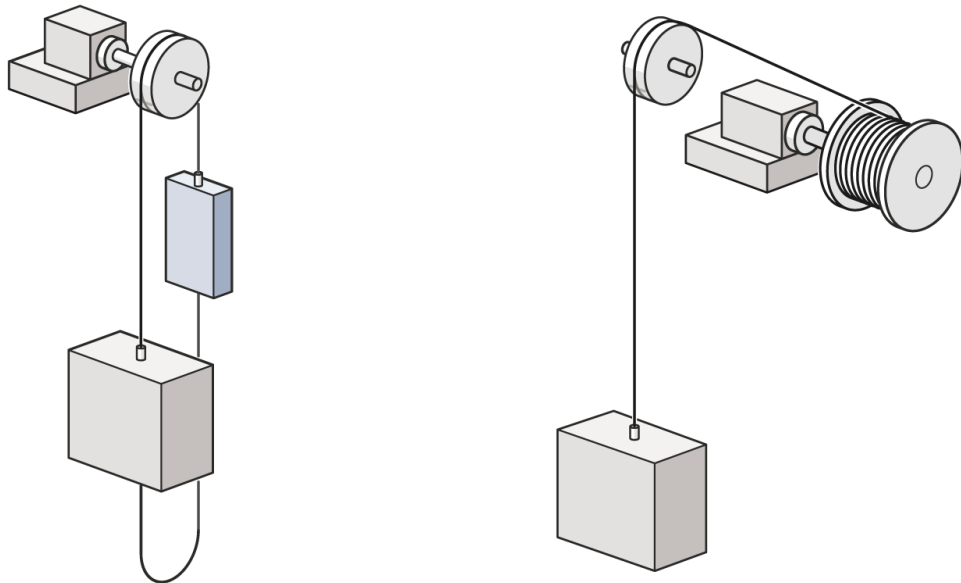


Fig. 2-4: Skizze einer Treibscheiben- und einer Trommelanlage

2.5.3 Aufstellungsort der Fördermaschine (Turm- oder Fluraufstellung)

Die Fördermaschine kann entweder ebenerdig (in Fluraufstellung) oder oben auf einem Förderturm aufgestellt werden. Bei Windenanlagen (siehe Kap. 2.5.2) wird grundsätzlich die Fluraufstellung der Fördermaschine gewählt, während es bei Treibscheibenanlagen beide Aufstellungsvarianten gibt.

Bei der Fluraufstellung einer Fördermaschine ist diese für Unterhalt und Wartung in der Regel besser zugänglich. Das zugehörige Fördergerüst kann in leichterer Bauweise erstellt werden als ein Förderturm, der die statischen und dynamischen Lasten einer Fördermaschine aufnehmen muss.

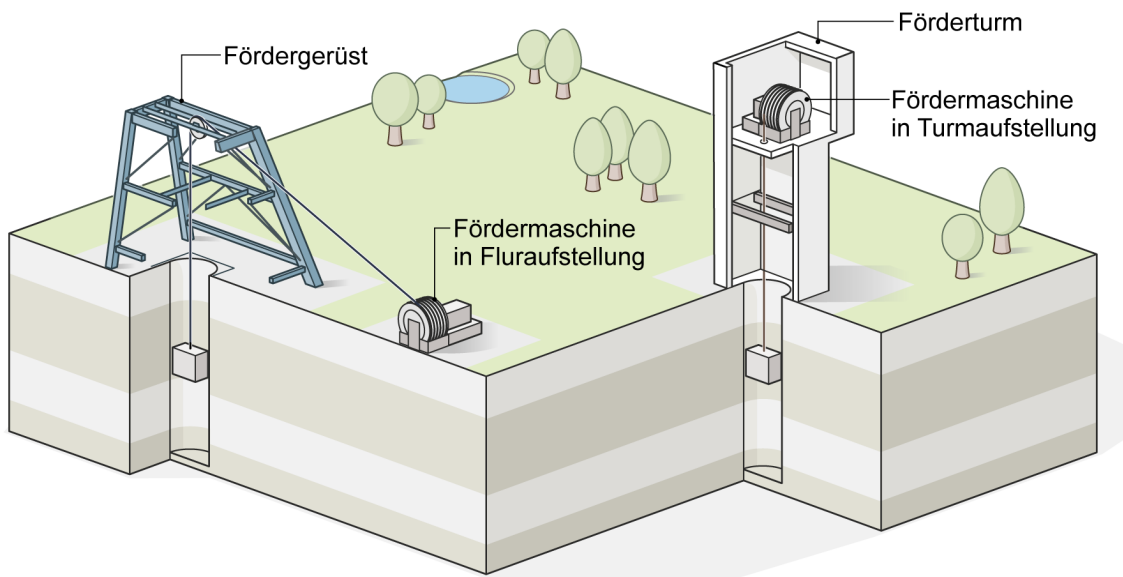


Fig. 2-5: Skizze eines Fördergerüsts und eines Förderturms

2.5.4 Fördermittel (Förderkorb oder Gefäßförderung)

Als Fördermittel kommen Fördergestelle und Fördergefäße in Frage. Fördergestelle werden umgangssprachlich auch als «Förderkorb» bezeichnet. In der Regel sind dies ein- oder mehretagig ausgeführte Stahlkonstruktionen zum Transport von Personen, Transportwagen, Maschinen oder anderen Gütern. Fördergefäße kommen für den Transport von Schüttgut zur Anwendung und werden umgangssprachlich oft als «Skip» bezeichnet.

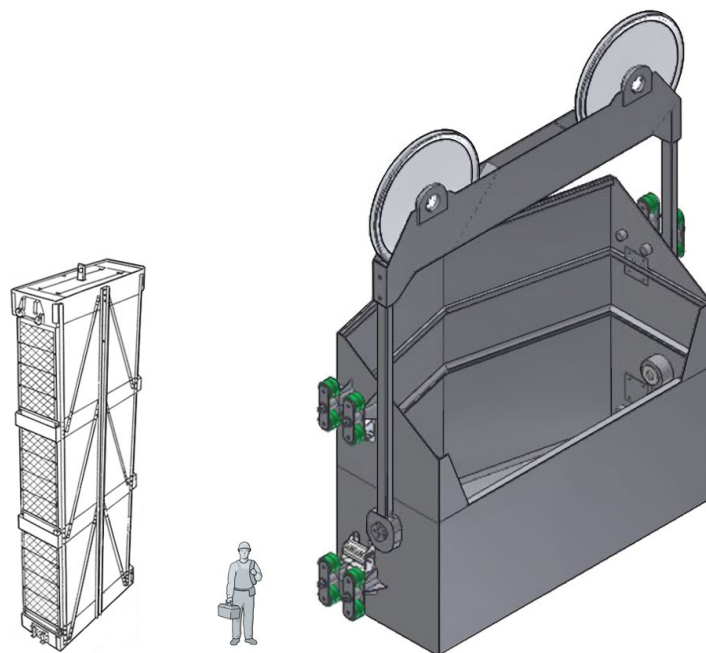


Fig. 2-6: Beispielhaftes Fördergestell (Förderkorb) und Fördergefäß (Skip)

Quellen: Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75 (Sindern & Borowski 2014) und Albatros GmbH

2.5.5 Anzahl Fördermittel (ein- oder zweitrümig)

Schachtförderanlagen mit zwei Fördermitteln (Korb-Korb-Förderanlage) werden auch als zweitrümige Förderanlagen bezeichnet, während man Korb-Gegengewicht-Förderanlagen als eintrümig bezeichnet. Wenn zwei Fördermittel vorhanden sind, lassen sich bei jeder Förderung Güter in die eine oder andere Richtung transportieren, was zu höheren Transportleistungen führt. Demgegenüber steht ein grösserer Schachtdurchmesser, der für zweitrümige Anlagen benötigt wird.

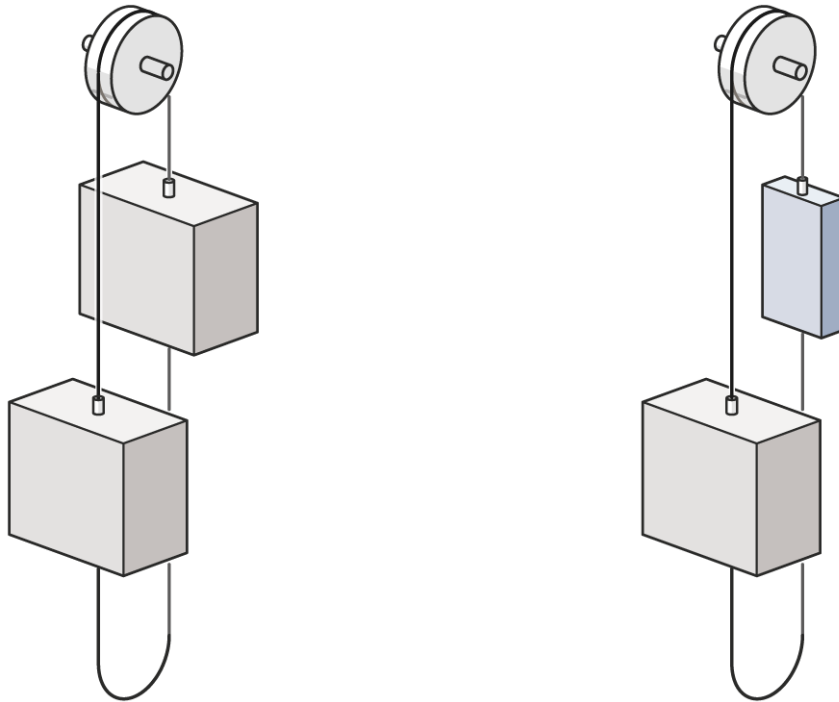


Fig. 2-7: Skizze einer Korb-Korb- und einer Korb-Gegengewicht-Förderanlage

2.5.6 Anzahl Förderseile (Einseil- oder Mehrseil-Förderanlage)

Schachtförderanlagen mit mehreren Förderseilen kommen hauptsächlich bei Treibscheibenanlagen vor (siehe Kap. 2.5.2). Trommelanlagen haben in der Regel nur ein Förderseil.

Mehrere Förderseile werden vorzugsweise bei sehr grossen Schachtförderanlagen mit sehr hohen Seilzugkräften verwendet. Damit können die Seil- und die Treibscheibendurchmesser reduziert und die Handhabung (z. B. beim Seilwechsel) verbessert werden.

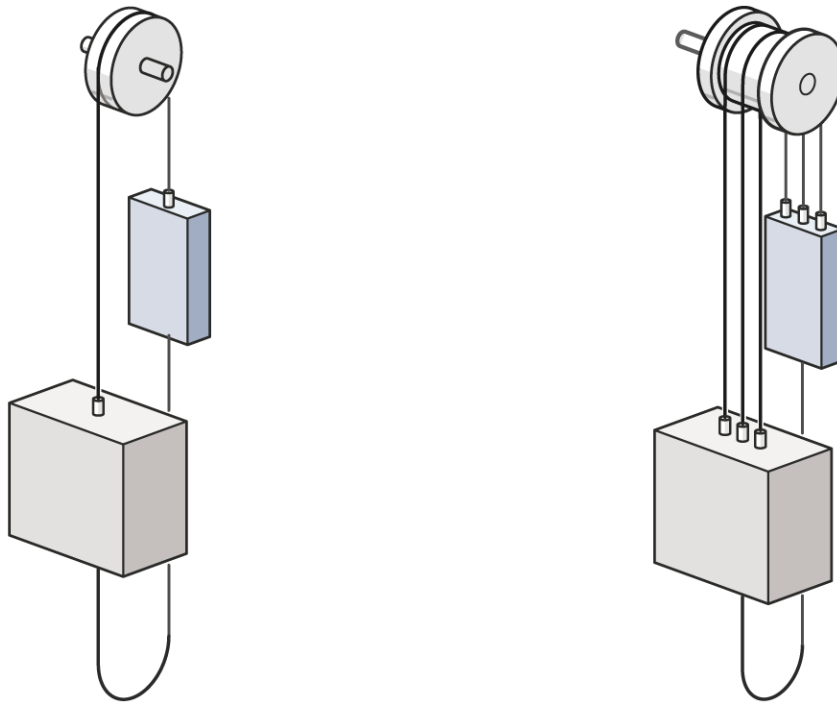


Fig. 2-8: Skizze einer Einseil- und einer Mehrseil-Förderanlage

2.5.7 Führungseinrichtungen (Spurlatten oder Führungsseile)

Bei einer Spurlattenführung wird der Förderkorb an mehreren im Schacht montierten Schienen geführt. Bei Seilführung übernehmen vorgespannte Seile diese Aufgabe und vermeiden die Kollision des Förderkorbs mit der Schachtwand. Weil Seile flexibler sind als Spurlatten, muss bei Seilführung ein grösserer Abstand zur Schachtwand eingehalten werden.

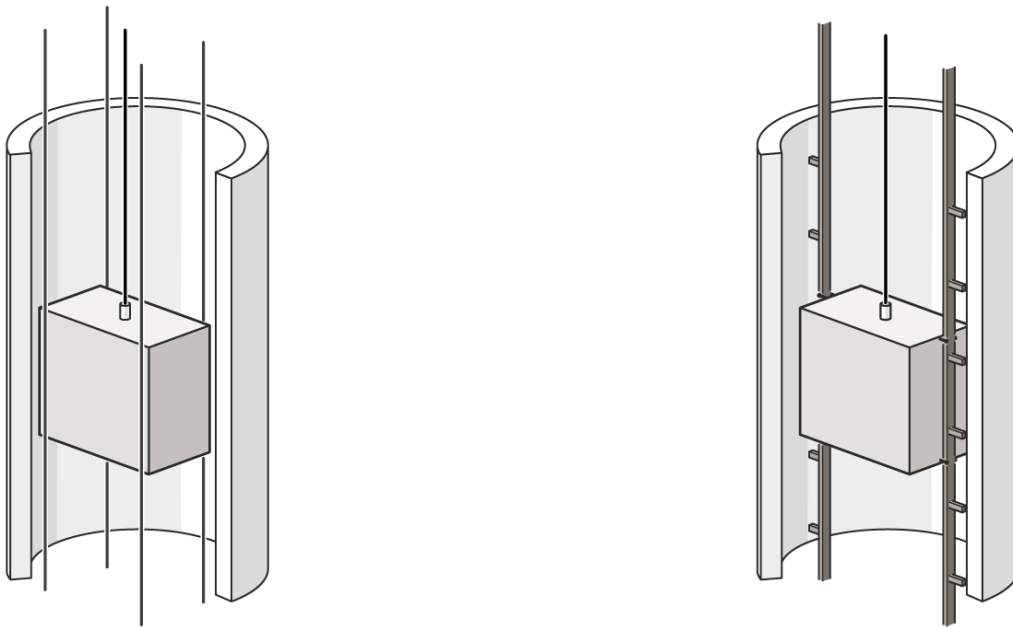


Fig. 2-9: Skizze einer Seil- und einer Spurlattenführung

2.6 Annahmen zum Förderanlagentyp

Die in diesem Bericht modellhaft dargestellten Schachtförderanlagen bedienen Tagesschächte und haben jeweils ein Fördermittel (d. h. einen Förderkorb oder ein Fördergefäß ohne Gegengewicht). Mit Ausnahme der mobilen Notfahranlage handelt es sich um festinstallierte Anlagen mit elektrisch betriebenen Fördermaschinen und einer Trommel als Seilträger (Windenanlagen in Fluraufstellung). Alternativ stehen auch Korb-Gegengewicht-Förderanlagen mit Treibscheiben zur Auswahl (siehe auch Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75 (Sindern & Borowski 2014)). Eine vergleichende Skizze dieser beiden Anlagentypen ist in Fig. 2-10 zu sehen.

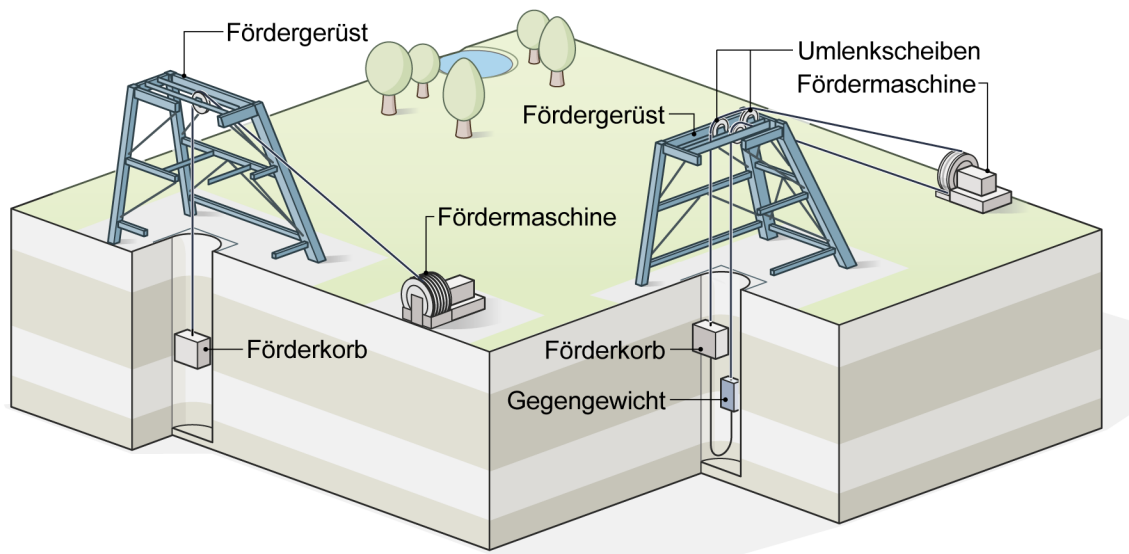


Fig. 2-10: Skizze einer Windenanlage (links) und einer Korb-Gegengewicht-Förderanlage (rechts) mit Fördermaschinen in Fluraufstellung

3 Schachtförderung im Zugangsschacht

Wie in Kap. 2.3 und Fig. 2-2 gezeigt, werden im Einlagerungsbetrieb die radioaktiven Abfälle, Verfüll- und Versiegelungsmaterialien sowie Betriebspersonal durch den Zugangsschacht transportiert. Nachfolgend werden die modellhaften Anlagenkonzepte und der Betrieb der Güterförderanlage (Grossförderkorb, siehe Kap. 3.1) und der Seilfahrtanlage (Personenförderkorb, siehe Kap. 3.2) mit Trommelfördermaschinen in Fluraufstellung erläutert.

Für die Auslegung dieser Förderanlagen wurden nebst den in Kap. 2.4 genannten Fördergeschwindigkeiten folgende Bedingungen zugrunde gelegt:

- Nutzlast des Grossförderkorbs: max. 100 t
- Kapazität des Personenförderkorbs: 8 Personen

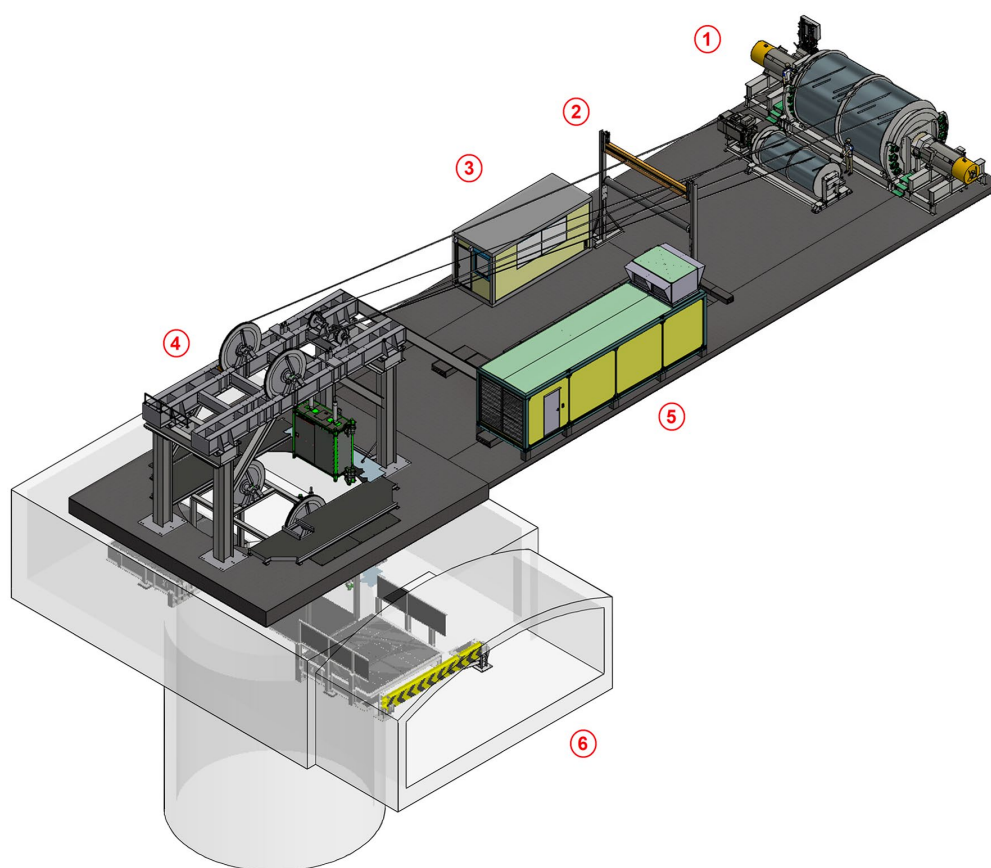


Fig. 3-1: Beispielhafte Schachtförderanlagen für den Zugangsschacht

- 1) Fördermaschinen (Förderwinden)
- 2) Seilberuhigung
- 3) Steuerstand
- 4) Fördergerüst (Seilscheibenträger) mit Personenförderkorb (auf der oberen Ebene) und Grossförderkorb im Untergeschoss
- 5) Umrichtercontainer
- 6) Beladeebene für den Grossförderkorb (Untergeschoss)

Bild: Albatros GmbH

3.1 Schachtförderung im Grossförderkorb

Mit dem Grossförderkorb im Zugangsschacht sind im Einlagerungsbetrieb insbesondere folgende Transporte vorgesehen (siehe auch Betriebskonzept (Nagra 2022a)):

- jährlich ca. 200 HAA-Endlagerbehälter, resp. ca. 800 SMA-Endlagerbehälter
- gleichzeitige Förderung von jeweils 1 HAA-ELB oder 1 – 2 SMA-ELB⁵
- Förderung von 1 HAA-ELB oder 4 SMA-ELB pro Tag

Insgesamt ergeben sich zusammen mit der Förderung von Verfüll- und Versiegelungsmaterialien ca. 10 Fahrten pro Tag mit dem Grossförderkorb.

Die Schachtförderanlage hat zwei Förderseile, die redundant ausgelegt sind, d. h. auch einzeln den Grossförderkorb halten und in eine sichere Position bringen können. Die Seile werden am Förderkorb umgelenkt und sind am Gerüsturm mit Seillängen-Ausgleichszylindern und verstellbaren Vergusschülern angeschlagen.

Die Beladung des Förderkorbs ist im Untergeschoss vorgesehen, auf dieser Ebene befindet sich das obere Betriebsende / die obere Endposition des Grossförderkorbs. Vor dem Beladen wird der Korb auf eine Haltevorrichtung abgesetzt. Anschliessend wird das Förderseil entspannt. Damit wird gewährleistet, dass während des Aufschiebens oder Abziehens der Fahrzeuge keine unkontrollierten Bewegungen des Förderkorbs stattfinden. Die Zufahrt zum Förderkorb wird erst freigegeben, wenn er sich in seiner vorgegebenen Position befindet und die entsprechenden Endschalter betätigt sind. Sicherheitsrelevante Endschalter sind redundant ausgeführt.

Bevor sich der Förderkorb zur Schachtfahrt in Bewegung setzen kann, müssen der Korb und die Zufahrt verriegelt und die entsprechenden Endschalter betätigt sein. Während der Schachtfahrt werden in der Windensteuerung die Betriebszustände abgefragt. Bei Abweichungen eines Istwerts vom Sollzustand wird die Anlage sicher zum Stillstand gebracht.

⁵ In Tab. 2-1 sind die grössten und schwersten vorgesehenen Endlagerbehälter aufgelistet. Von den schwersten SMA-ELB gibt es nur ein paar wenige. Diese sind sehr gross, d. h. sie können nur einzeln im Förderkorb aufgenommen werden. Die meisten SMA-ELB sind wesentlich kleiner und leichter. Diese können zu zweit im Schacht transportiert werden.

Der Förderkorb ist eine Stahlkonstruktion und für die Aufnahme der verschiedenen Transportbehälter und Transportwagen dimensioniert. Am oberen Ende des Förderkorbs befinden sich zwei Seilscheiben für die Umlenkung der beiden Förderseile.

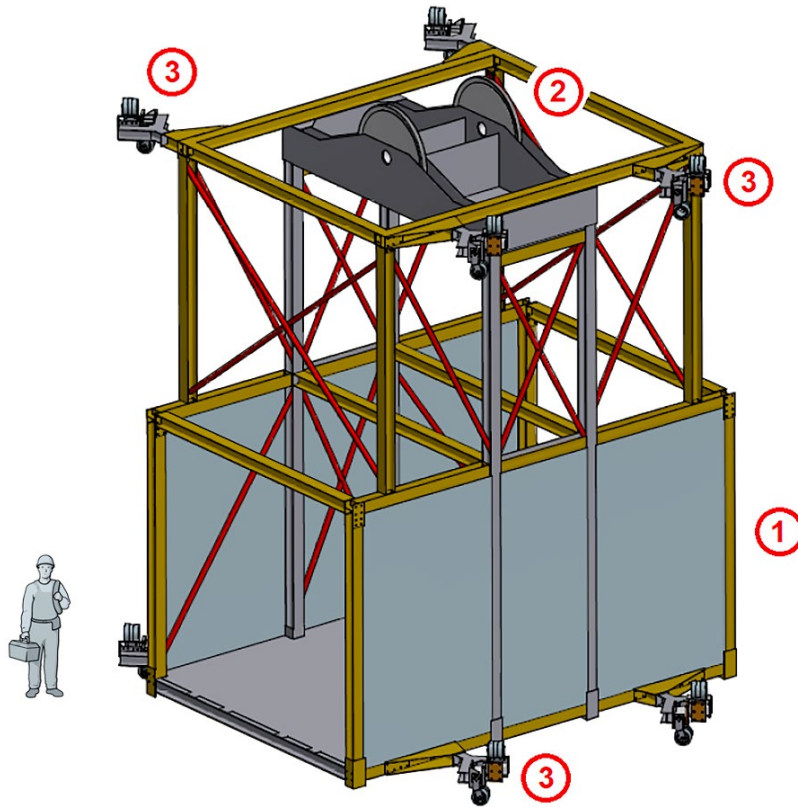


Fig. 3-2: Beispielhafter Grossförderkorb

- 1) Grossförderkorb für die Aufnahme von Transportwagen (und ggf. Personen)
- 2) Seilscheiben für die Umlenkung der Förderseile
- 3) Führungsrollen für die Führungsseile (Führung des Förderkorbs im Schacht)

Der Förderkorb wird bei dieser modellhaften Anlage mit zwei eingesicherten Förderseilen bewegt und mit vier Führungsseilen entlang des Schachts geführt. Die Führungsseile sind am Schachtfuss und am Fördergerüst befestigt und vorgespannt. Die Vorspannung wird über Hydraulikzylinder gewährleistet. Am Förderkorb selbst sind Führungsrollen für die Führungsseile befestigt.

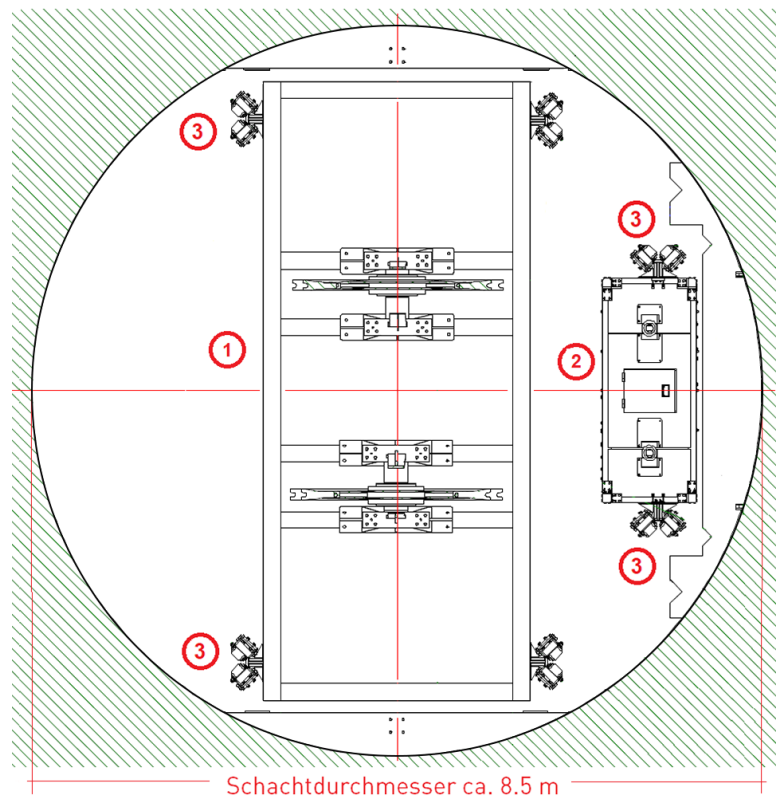


Fig. 3-3: Schachtscheibe (Grundriss) eines beispielhaften Zugangsschachts

- 1) Grossförderkorb mit Umlenkscheiben
- 2) Personenförderkorb mit Seillängen-Ausgleichszylindern (siehe auch Fig. 3-5)
- 3) Führungsrollen für Führungsseile

Massgebend für die Auslegung der Fördermaschine sind die erforderliche Seilsicherheit und der daraus resultierende erforderliche Seildurchmesser sowie der Durchmesser des Seilträgers. Ein modellhaftes Bild der vorgeschlagenen Förderwinde ist in Fig. 3-4 wiedergegeben.

Für die Fördermaschine sind elektrische Antriebe über Frequenzumrichter vorgesehen, die über ein Bedienpult im zentralen Steuerstand bedient werden können. Mit optischem und digitalem Stellungsanzeiger (Seillängenmessgerät) wird dabei die Position des Förderkorbs angezeigt. Scheibenbremsen sind als Betriebsbremse zwischen Motor und Getriebe angeordnet. Als Sicherheitsbremsen wirken weitere Scheibenbremsen direkt auf die Bordscheibe des Seilträgers.

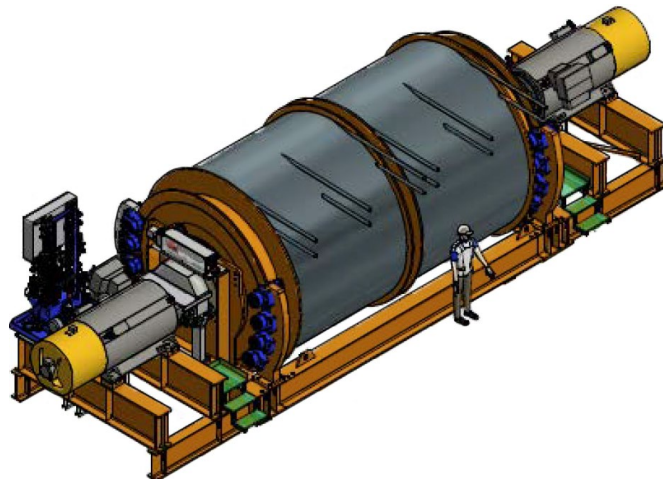


Fig. 3-4: Beispielhafte Zweiseil-Förderwinde für einen Grossförderkorb
Bild: Albatros GmbH

Das Spezialseil entspricht den Anforderungen nach EN 12385-4 mit Drähten für erhöhte Anforderungen nach DIN 10264-3. Mit einem Spezialendbeschlag (verstellbare Vergusshülse mit Justiermöglichkeit) kann die jeweilige Seillänge eingestellt werden. Die Ausführung der Seilscheibe erfolgt nach den Vorgaben der TAS bzw. den einschlägigen Normen (z. B. DIN 22410 1994-05 – Förderseilscheiben für Rundseile). Zwischen den Seilscheiben und den Seilträgern ist eine Seilberuhigungsverrichtung vorgesehen (siehe auch Fig. 3-1).

Als weitere Sicherheitseinrichtungen können genannt werden:

- Überlast- und Schlaffseilauswertung (in der Windensteuerung integriert)
- Obere und untere Seilendlage abgesichert
- Überdrehzahlabschaltung (elektrisch)
- Hydraulisch verbundene Seillängen-Ausgleichszylinder mit Drucküberwachung
- Schachtabsturz Sicherungen mit verriegelten und überwachten Schachttoren
- Redundante Ausführung sicherheitsrelevanter Endschalter
- Notstromversorgung

3.2 Personenförderung (Seilfahrt)

Das für den untertägigen Einlagerungsbetrieb notwendige Personal wird mit einer separaten Personentransportanlage durch den Zugangsschacht nach Untertag (und wieder zurück) gefördert. Gemäss Betriebskonzept (Nagra 2022a) ist für die Einlagerungstätigkeiten auf Lagerebene ein Zweischichtbetrieb mit Schichtgruppen von 4 – 5 Personen vorgesehen.

Insgesamt sind für das Betriebspersonal ca. 6 Fahrten pro Tag veranschlagt (siehe Betriebskonzept (Nagra 2022a)). Der Personenkorb ist eine Stahlkonstruktion, die vollständig eingehaust ist. Am oberen Ende des Personenkorbs sind die beiden Seillängen-Ausgleichszylinder im Stahlbau integriert.

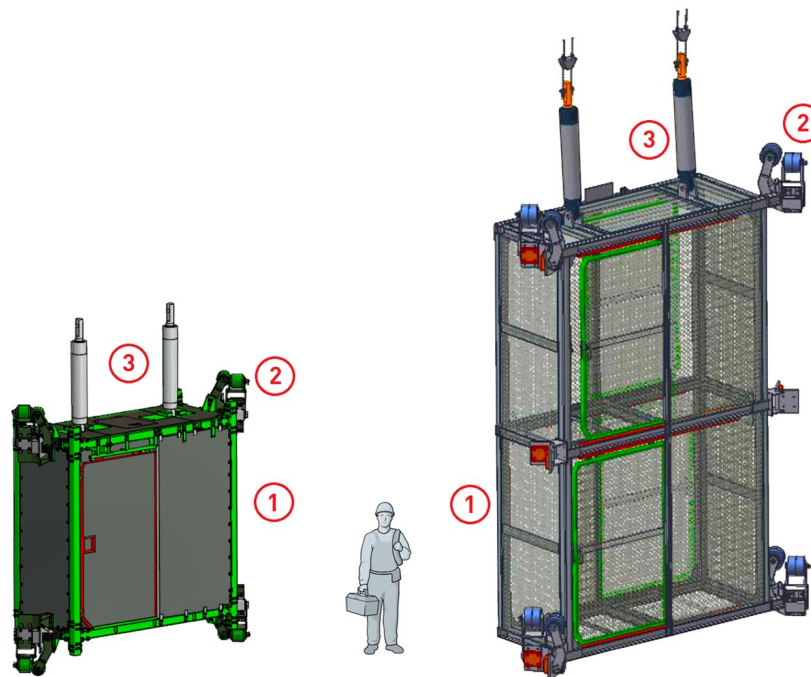


Fig. 3-5: Beispielhafte Personentransportkörbe (mit einer resp. zwei Etagen)

- 1) Personentransportkorb
- 2) Führungsrollen für Führungsseile
- 3) Seillängen-Ausgleichszylinder

Der Personentransportkorb im Zugangsschacht wird mit zwei Führungsseilen im Schacht geführt, die wie beim Grossförderkorb am Schachtfuss und am Fördergerüst befestigt und mit Hydraulikzylindern vorgespannt sind.

Auf der jeweiligen Beladeebene (Schachtfuss oder Erdoberfläche) wird der Personentransportkorb durch Betriebschalter in seiner Endposition angehalten. Die Personen besteigen oder verlassen den Korb über die Schiebetür und eine Sicherheitstür, die beim Zugangspodest integriert ist. Befindet sich der Personentransportkorb nicht in seiner Endposition, kann die installierte Sicherheitstür nicht geöffnet werden. Sie ist verriegelt und wird erst freigegeben, wenn die entsprechenden Endschalter betätigt sind. Sicherheitsrelevante Endschalter sind auch hier redundant ausgeführt.

Auch bei der Seilfahranlage werden festgelegte Betriebszustände in der Windensteuerung abgefragt bzw. ein Vergleich zwischen Soll- und Istzustand durchgeführt, sodass bei Abweichungen die Anlage sicher zum Stillstand gebracht werden kann (z. B. beim Öffnen der eigentlich verriegelten Personenkorbtür während der Fahrt). Die Bedienung der Seilfahranlage erfolgt entweder direkt im Korb (Selbstfahrbetrieb) oder über eine weitere Bedienungsstelle im zentralen Maschinensteuerstand.

Als Antrieb ist auch für die Seilfahranlage ein Elektromotor mit Frequenzumrichter vorgesehen. Ein modellhaftes Bild der vorgeschlagenen Seilfahrtwinde ist in Fig. 3-6 wiedergegeben.

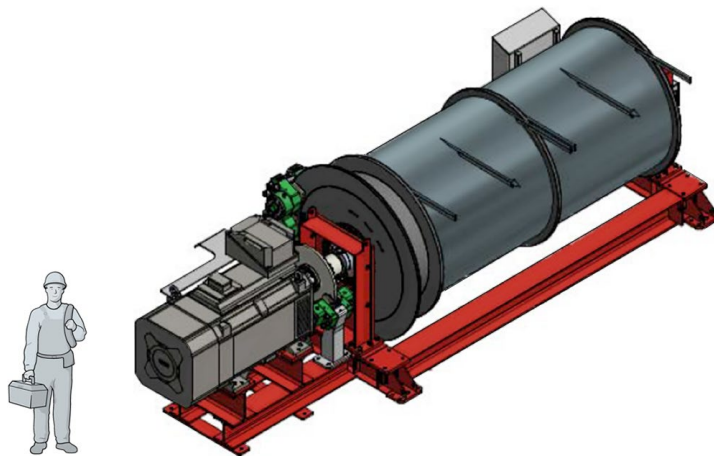


Fig. 3-6: Beispielhafte Zweiseil-Förderwinde für die Personenförderung
Bild: Albatros GmbH

Wie bei der grossen Förderanlage liefert ein Seillängenmessgerät die Informationen für die optische und digitale Stellungsanzeige des Personenförderkorbs. Scheibenbremsen sind als Betriebsbremse zwischen Motor und Getriebe angeordnet. Für Nothalte wirkt eine weitere Scheibenbremse direkt auf die Bordscheibe des Seilträgers. Das Spezialseil und die weiteren Sicherheitseinrichtungen entsprechen den Angaben beim Grossförderkorb (siehe Kap. 3.1).

3.3 Sicherheits- und Störfallbetrachtungen

Zuverlässigkeit und Störfälle von Schachtförderanlagen sind im Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75 (Sindern & Borowski 2014) eingehend diskutiert worden. Im hier vorliegenden Bericht werden Förderanlagen mit Trommelfördermaschinen beschrieben. Die Merkmale dieser Anlagen werden aus sicherheitsrelevanter Sicht im Folgendem betrachtet. Dabei werden u. a. die im Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75 (Sindern & Borowski 2014) angeführten Störfälle in die Betrachtung einbezogen.

Das vorliegende Konzept sieht vor, dass die Fördermaschinen, die Frequenzumrichter sowie der zentrale Maschinensteuerstand in der Oberflächeninfrastruktur integriert sind. Dadurch wird eine einfache und sichere Erstmontage ermöglicht, und es ergibt sich eine optimale Zugänglichkeit für Unterhalts-, Instandsetzungs- und Wartungsarbeiten (z. B. Seilwechsel).

Durch das flache Fördergerüst und die Anordnung der Beladeebene im Untergeschoss kann die Schachtkopfhalle kompakt konstruiert werden, was für die Auslegung gegen Einwirkungen von aussen (z. B. Flugzeugabsturz) vorteilhaft ist.

Die Kraftübertragung bei Trommelfördermaschinen auf das Förderseil findet formschlüssig statt, wodurch ein Seilrutsch (z. B. wegen Verschmutzung der Seile, zu stark einfallender Bremsen, zu stark geschmierter Seile) nicht möglich ist. Zusammen mit der Überwachung der Schleichfahrt vor den Endpositionen und den redundant ausgeführten Endschaltern (inkl. zusätzlichem Sicherheitsschalter) ist somit ein Übertreiben der Anlage nicht möglich.

Wie im Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75 (Sindern & Borowski 2014) beschrieben, waren bei allen Vorkommnissen, bei denen Förderseile rissen, die Seilrisse Folgeschäden, nicht Ursache des jeweiligen Vorkommnisses. Durch normale betriebliche Schwächung als Folge von Drahtbrüchen, Korrosion oder Verschleiss ist seit einem halben Jahrhundert kein Förderseil mehr gerissen. Seilrisse aufgrund von Seilversagen durch vernachlässigte Prüfungen oder unerkannte Schädigungsmechanismen sind in keinem einzigen Fall vorgekommen. Bei entsprechender Überwachung (u. a. automatische Seilprüfung) und Wartung der Seile werden Seilbeschädigungen und Seilchwächungen rechtzeitig detektiert. Die entsprechenden Massnahmen für den Austausch der Seile können getroffen werden.

Die Ausführung der Förderwinde und der Seilfahrtwinde ist in Zweiseiltechnik vorgesehen, d. h., je Winde kommen zwei Seile zum Einsatz. Das Gesamtsystem entspricht den Anforderungen an die Seilsicherheit gemäss TAS 6.8.1 (TAS 2005). Durch die Anwendung der Zweiseiltechnik wird im Falle eines sehr unwahrscheinlichen Seilrisses das Fördermittel mit ausreichender Seilsicherheit im Schacht gehalten.

4 Schachtförderung im Betriebsschacht

Im Folgenden werden beispielhafte Schachtförderanlagen im Betriebsschacht beschrieben und dargestellt. Dabei wird auf die Wiederholung von Aussagen, die bereits im Kap. 3 zum Zugangsschacht gemacht wurden, verzichtet. Das Anlagenkonzept für die Förderungen im Betriebsschacht sieht eine Güterförderanlage (Grossförderkorb), eine Gefässförderanlage (Skipförderung) und eine Seilfahrtanlage (Personenförderkorb) vor, jeweils mit Trommelfördermaschinen in Fluraufstellung.

Für die Auslegung dieser Förderanlagen wurden nebst den in Kap. 2.4 genannten Fördergeschwindigkeiten folgende Bedingungen zugrunde gelegt:

- Nutzlast des Grossförderkorbs: max. 30 t
- Nutzlast der Gefässförderung: max. 50 t
- Kapazität für den Personenförderkorb: 10 Personen

In Fig. 4-1 wird eine modellhafte dreidimensionale Darstellung einer Schachtförderanlage für den Betriebsschacht gezeigt.

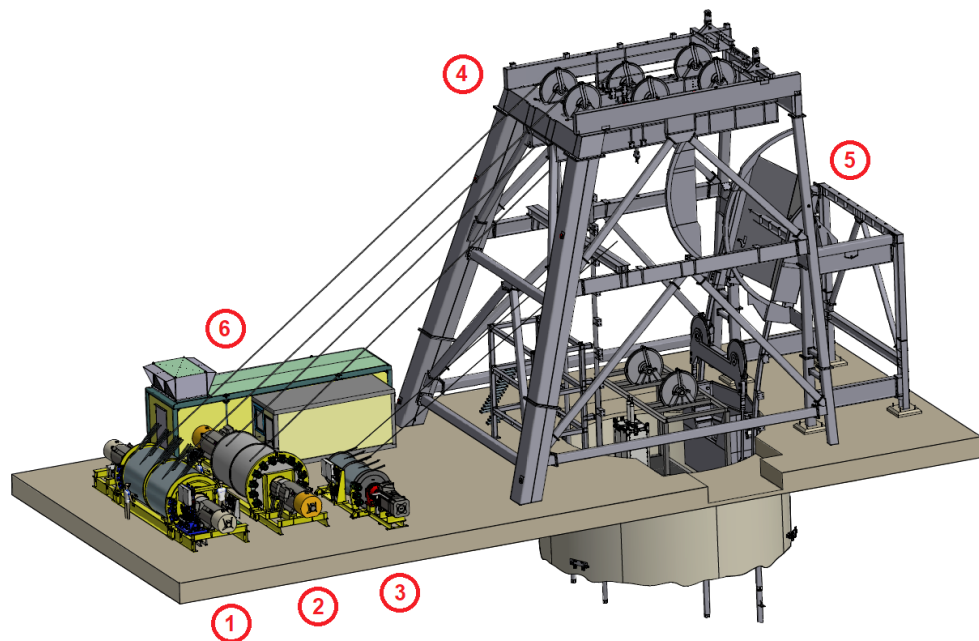


Fig. 4-1: Beispielhafte Schachtförderanlagen für den Betriebsschacht

- 1) Förderwinde für die Gefässförderung (Skipförderung)
- 2) Förderwinde für den Grossförderkorb
- 3) Förderwinde für den Personenförderkorb (Seilfahrtanlage)
- 4) Fördergerüst (Seilscheibenverlagerungsträger)
- 5) Einrichtungen für die Gefässentleerung (Skipentleerung)
- 6) Container für Frequenzumrichter und Anlagensteuerung

Bild: Albatros GmbH

In Fig. 4-2 ist die Schachtscheibe (Grundriss des Schachts) für den beispielhaften Betriebsschacht dargestellt. In der Schachtscheibe sind vier Hauptbereiche erkennbar: die drei Förderwegbereiche, auch Fördertrume genannt (links im Bild die Gefässförderanlage, in der Mitte die Güterförderanlage und rechts oben die Personenförderanlage) sowie einen Bereich (schraffierte Fläche) für Ver- und Entsorgungsleitungen (z. B. Abluftkanal).

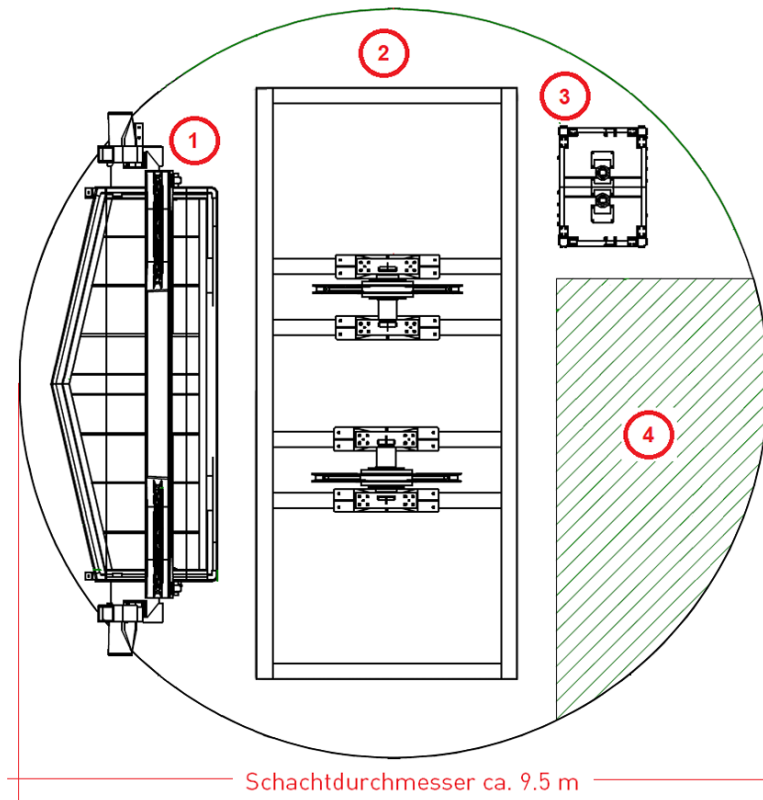


Fig. 4-2: Schachtscheibe (Grundriss) eines beispielhaften Betriebsschachts

- 1) Fördergefäss (Skip)
- 2) Grossförderkorb
- 3) Personenförderkorb
- 4) Bereich für Ver- und Entsorgungsleitungen (z. B. Abluftkanal)

4.1 Schachtförderung im Grossförderkorb

Für den Grossförderkorb im Betriebsschacht sind folgende Transporte vorgesehen:

- Baumaterialien und Baumaschinen
- Betriebsmittel, Instandhaltungs- und Versorgungsmaterialien
- Personentransporte (z. B. für grosse Besuchergruppen, Wechsel grosser Schichtgruppen)

Die obere Be- und Entladung des Förderkorbs ist auf der Erdgeschosebene vorgesehen, wobei gleichartige Sicherheitssysteme wie beim Grossförderkorb des Zugangsschachts zur Anwendung kommen (siehe Kap. 3.1). Ein beispielhafter Förderkorb ist in Fig. 3-2 dargestellt.

Massgebend für die Auslegung der Fördermaschine sind auch hier die erforderliche Seilsicherheit und der daraus resultierende Seildurchmesser sowie der Durchmesser des Seilträgers.

4.2 Gefässförderung (Skipförderung)

Für die Gefässförderung wurden folgende Auslegungswerte angenommen:

- Tagesfördermenge: max. ca. 3'000 t Ausbruchmaterial
- Fördertrumfläche: ca. 7 m² (für die Gefässförderung zur Verfügung stehender Anteil der Schachtscheibe)
- Fördergutaufnahme und -abgabe (Skipbeschickung und -entleerung) über Silos

Der Skip ist eine Stahlkonstruktion mit einem Schwenkbügel, der eine Schwenkbewegung zum Entleeren des Gefässes ermöglicht. Im Schwenkbügel sind die beiden Seilscheiben integriert. Die Seile der Skipwinde werden am Skip umgelenkt und sind am Gerüstturm mit Seillängen-Ausgleichszylindern und verstellbaren Vergusschülern angeschlagen.

Im Schacht wird der Skip entlang zweier Spurlatten geführt. Entsprechende Führungsrollen sind an den Seiten des Fördergefässes angebracht.

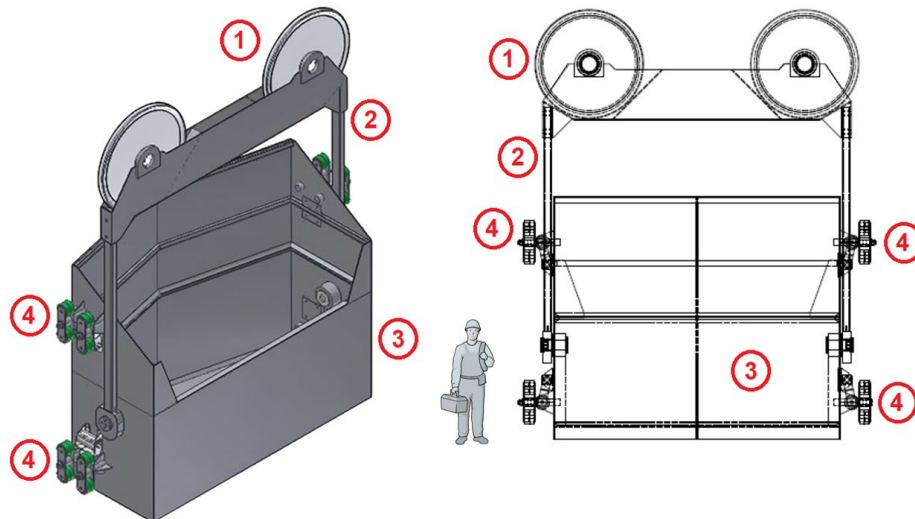


Fig. 4-3: Beispielhaftes Fördergefäss (Skip) für den Betriebsschacht

- 1) Seilscheiben zur Umlenkung der Förderseile
- 2) Schwenkbügel zur Entleerung des Gefässes an der Erdoberfläche
- 3) Fördergefäss mit Entleerschurre (Rutsche)
- 4) Führungsrollen für die Spurlattenführung im Schacht

Die Beladung des Fördergefässes mit Ausbruchmaterial erfolgt beim Schachtfuss (auf Lager-ebene) über ein Beschickungssilo. Die Beschickungsmenge wird sowohl durch den Siloabwurf wie auch durch Füllstands- und Füllgewichtsmessungen überwacht.

Die Auslegung der Fördermaschine erfolgt auch für die Gefässförderanlage unter Berücksichtigung der erforderlichen Seilsicherheit und der daraus resultierenden Durchmesser von Seil und Seilträger.

Die Sicherheitseinrichtungen der Gefässförderanlage entsprechen denjenigen des Grossförderkorbs im Zugangsschacht (siehe Kap. 3.1).

4.3 Personenförderung (Seilfahrt)

Das für den untertägigen (Bau-)Betrieb notwendige Personal soll unabhängig vom Grossförderkorb und von der Gefässförderung mit einer Seilfahrtanlage nach Untertag (und wieder zurück) gefördert werden können. Gleichzeitige Transporte der drei Förderanlagen sollen deshalb möglich sein. Insgesamt sind für das hier vorgesehene Bau- und Betriebspersonal ca. 4 Fahrten pro Tag veranschlagt (siehe auch Betriebskonzept (Nagra 2022a)). Aufgrund der Platzverhältnisse im Betriebsschacht ist der Personenförderkorb mit zwei Etagen vorgesehen. Beispielhafte Personenförderkörbe sind in Fig. 3-5 dargestellt.

Für den Betrieb dieses Personenförderkorbs gelten im Übrigen die gleichen Beschreibungen wie für denjenigen im Zugangsschacht (siehe Kap. 3.2). Ein modellhaftes Bild einer Förderwinde ist in Fig. 3-4 wiedergegeben.

4.4 Sicherheits- und Störfallbetrachtungen

Im vorliegenden Anlagenkonzept ist der Betrieb der Güterförderanlage, der Gefässförderanlage und der Seilfahrtanlage mit Trommelfördermaschinen vorgesehen. Die Sicherheits- und Störfallbetrachtungen sind die gleichen, die bereits in Kap. 3.3 beschrieben wurden, auch wenn über diese Anlagen des Betriebsschachts keine nuklearen Transporte vorgesehen sind.

5 Schachtförderung im Lüftungsschacht

5.1 Funktion des Lüftungsschachts im Einlagerungsbetrieb

Während des Einlagerungsbetriebs führt der Lüftungsschacht die Frischluft in die untertägigen Anlagen, ist also ein sogenannter «einziehender Schacht». Weil eine zuverlässige und störungsfreie Frischluftzufuhr für den Betrieb des geologischen Tiefenlagers wichtig ist, sind nur sehr wenige feste Einbauten im Lüftungsschacht vorgesehen. Insbesondere ist keine festinstallierte Schachtförderanlage geplant.

Der Lüftungsschacht soll aber im Ausnahmefall für Transporte (z. B. für Flucht, Rettung, Evakuierung, Intervention) genutzt werden können. Deshalb ist eine mobile Schachtwinde vorgesehen, die im Bedarfsfall zum Einsatz kommen kann. Diese mobile Schachtwinde kann auch die Aufgabe einer Befahrungsanlage gemäss TAS 8.1.1 wahrnehmen. Sie kann demnach in allen drei Schächten von den mit der Überwachung, Instandhaltung und Vermessung beauftragten Personen sowie zur Bergung von Personen in Notfällen benutzt werden.

5.2 Mobile Schachtwinde

Eine beispielhafte mobile Schachtwinde ist in Fig. 5-1 dargestellt. Sie kann maximal 6 Personen (3 auf der oberen Ebene, 3 auf der unteren Ebene) mit einer Fahrgeschwindigkeit von 1 m/s transportieren.



Fig. 5-1: Mobile Schachtwinde in Arbeitsposition

Bild: Siemag Tecberg

Die mobile Schachtwinde kann bei Bedarf auch in anderen Schächten und unabhängig vom Stromnetz eingesetzt werden, weil sie redundante Antriebe besitzt (Elektro und Diesel). Ihre Einsatzmöglichkeiten sind damit sehr flexibel.

6 Schachtförderung in anderen Tiefenlagerprojekten

In diesem Kapitel wird in kurzer Form auf Tiefenlagerprojekte anderer Länder eingegangen. Insbesondere stehen dabei die Zugangsvarianten im Fokus und es wird gezeigt, dass auch anderswo Schachtförderanlagen für geologische Tiefenlager vorgesehen oder bereits in Betrieb sind.

6.1 Finnland

Finnland sieht das geologische Tiefenlager im Granitgestein vor und hat ein Gesuch für die Betriebsbewilligung eingereicht. Das finnische Tiefenlagerprojekt ist das weltweit am weitesten fortgeschrittene für hochaktive Abfälle.

Die Lagerebene auf ca. 430 m unter der Erdoberfläche wird über verschiedene Zugangsbauwerke erreicht: Ein Transporttunnel mit einem Gefälle von ca. 10 % windet sich in mehreren Schlaufen in die Tiefe, ist aber nicht für nukleare Transporte vorgesehen. Die Endlagerbehälter werden durch einen separaten Schacht mit einer Förderanlage direkt aus der Verpackungsanlage von der Erdoberfläche auf die Lagerebene gebracht. Weitere Schächte stellen die Versorgung des Tiefenlagers sicher.

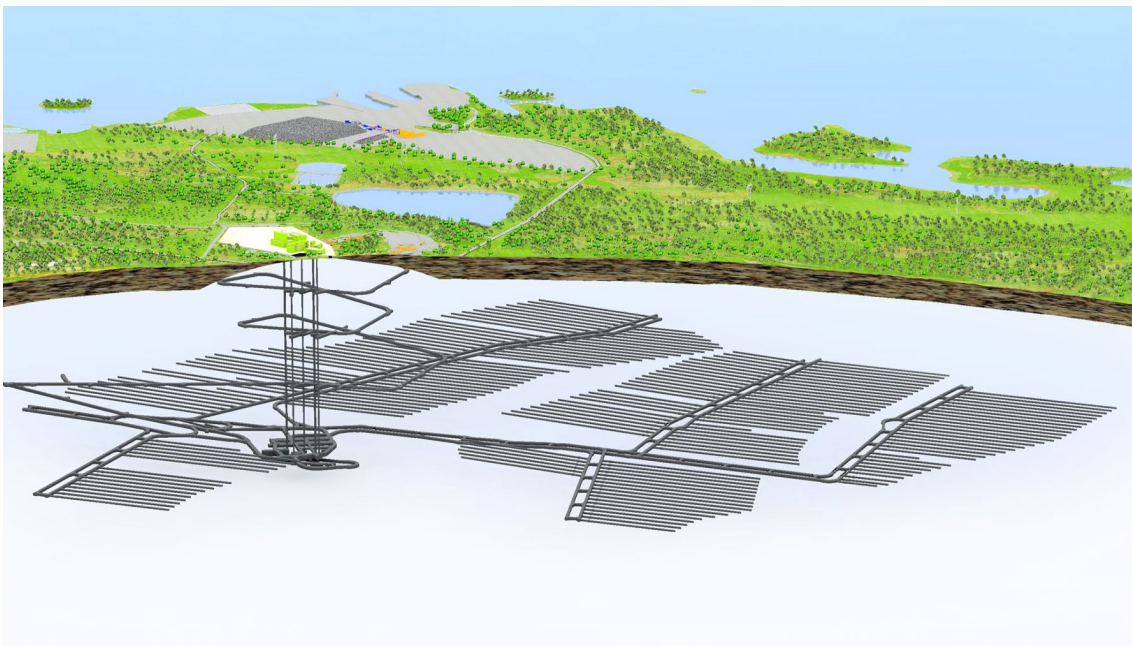


Fig. 6-1: Projektskizze der Zugangsbauwerke und Tiefenlageranlagen im Onkalo-Projekt (Finnland)

Quelle: Homepage Posiva (posiva.fi)

6.2 Schweden

Auch das schwedische Tiefenlagerprojekt in Forsmark, das durch die schwedische Regierung im Januar 2022 genehmigt wurde, liegt (wie das finnische) im Granitgestein. Es sieht als Zugangsbauwerke einen Tunnel und mehrere Schächte hinunter auf die Lagerebene vor, die ca. 500 m unter der Erdoberfläche liegt.

Der Transport der radioaktiven Abfälle von der Verpackungsanlage bis zum geologischen Tiefenlager soll durch Schiffe erfolgen. Von der Erdoberfläche hinunter auf die Lagerebene ist der Transport mit einem Spezialfahrzeug vorgesehen, das durch den Zugangstunnel fährt.

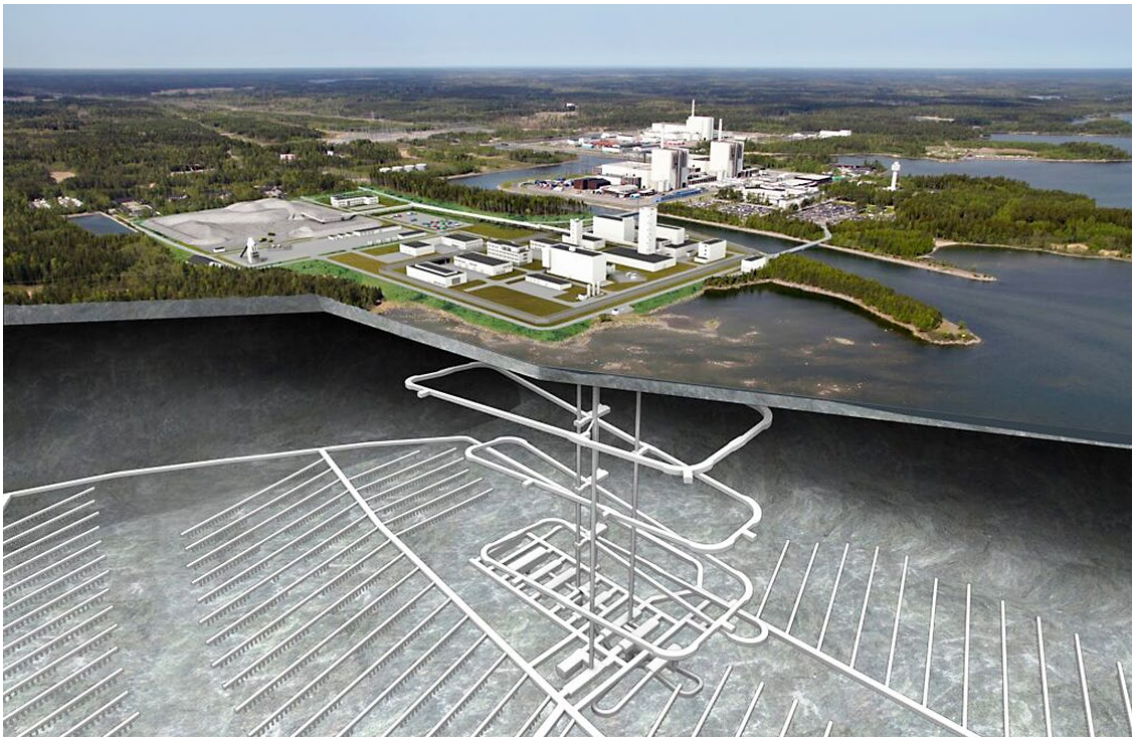


Fig. 6-2: Projektskizze des geologischen Tiefenlagers Forsmark (Schweden)

Quelle: Homepage SKB (skb.se)

6.3 Deutschland

Für schwach- und mittelaktive Abfälle ist in Deutschland u. a. das ehemalige Eisenerzbergwerk Schacht Konrad in Salzgitter (Niedersachsen) vorgesehen. Die radioaktiven Abfälle sollen in einer Tiefe von ca. 850 m unter der Erdoberfläche eingelagert werden. Die Lagerebene wird erschlossen durch zwei (bereits existierende) Schächte, die zurzeit mit ihren zugehörigen Förderanlagen ertüchtigt oder erneuert werden. Für die nuklearen Transporte sind Schachtförderungen mit einer neuen Korb-Gegengewicht-Förderanlage vorgesehen.

Das Projekt für hochaktive Abfälle ist in Deutschland noch nicht sehr weit fortgeschritten. Insbesondere ist noch kein Standort festgelegt worden. Insofern kann zurzeit noch keine belastbare Aussage hinsichtlich zukünftiger Zugangsbauwerke und Fördermittel im Tiefenlager hochaktiver Abfälle gemacht werden.



Fig. 6-3: 3D-Grafik des zukünftigen Endlagers Schacht Konrad in Salzgitter
Quelle: Homepage BGE (bge.de)



Fig. 6-4: Schacht Konrad mit dem denkmalgeschützten Fördergerüst
Quelle: Homepage BGE (bge.de)



Fig. 6-5: Fördermaschine der neuen Schachtförderanlage bei Schacht Konrad

6.4 Frankreich

Die Entsorgung der hochaktiven Abfälle ist in Frankreich in einer Tongesteinsschicht in Bure (Departemente Meuse und Haute-Marne) vorgesehen, die ca. 500 m unter der Erdoberfläche liegt. Die Zugangsbauwerke zu diesem Tiefenlager namens «Cigéo», für das im Januar 2023 durch die Projektierungs- und Betriebsgesellschaft «Andra» die Baubewilligung beantragt wurde, umfassen zwei ca. 4.5 km lange Schrägschächte mit einer Neigung von ca. 12 % sowie mehrere Vertikalschächte mit Schachtförderanlagen. Die nuklearen Transporte sind über einen Schrägschacht mit einer Standseilbahn als Transportmittel vorgesehen. Die Vertikalschächte dienen verschiedenen Versorgungs- und Transportaufgaben (z. B. Lüftung, Personaltransporte).

Das französische Tiefenlagerprojekt ist wesentlich grösser als das schweizerische, weil mehr radioaktive Abfälle aus zahlreicheren Kernkraftwerken zu entsorgen sind. Hinsichtlich geologischer Barriere ist es vergleichbar, weil ebenfalls eine Tonschicht als Wirtgestein genutzt wird, allerdings in geringerer Tiefe als in der Schweiz.

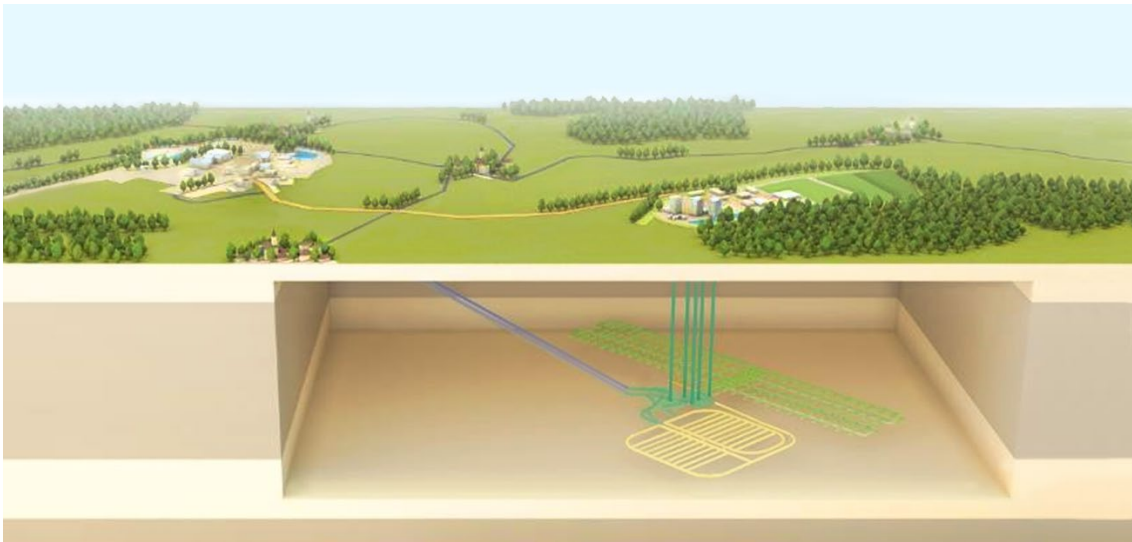


Fig. 6-6: Übersicht über das Projekt Cigéo in Frankreich

Quelle: Homepage Andra (andra.fr)

6.5 USA

Das einzige geologische Tiefenlager, das bereits in Betrieb ist, liegt im US-Bundesstaat New Mexico in der Nähe von Carlsbad. Es liegt in ca. 600 m Tiefe im Salzgestein und wurde für die Entsorgung radioaktiver Abfälle aus der Atomwaffenproduktion erstellt. Als Zugangsbauwerke dienen vier Schächte mit entsprechenden Schachtförderanlagen, durch die auch die einzulagernden Abfälle transportiert wurden.

Das Tiefenlagerprojekt in Yucca Mountain, für das fortgeschrittene Pläne vorliegen, wurde zwischenzeitlich gestoppt. Es ist derzeit unklar, ob dieses Projekt wieder aufgenommen und realisiert werden kann.



Fig. 6-7: Luftbild der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in den USA

Quelle: Homepage WIPP (wipp.energy.gov)

Die Schachtförderanlage für die nuklearen Transporte in der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) besteht aus einer Korb-Gegengewicht-Förderanlage (Treibscheibenanlage). Der Korb und das Gegengewicht sind im Schacht seilgeführt. Die Vorspannung der Führungsseile wird durch Gegengewichte beim Schachtfuss erzeugt (siehe auch Fig. 6-8).

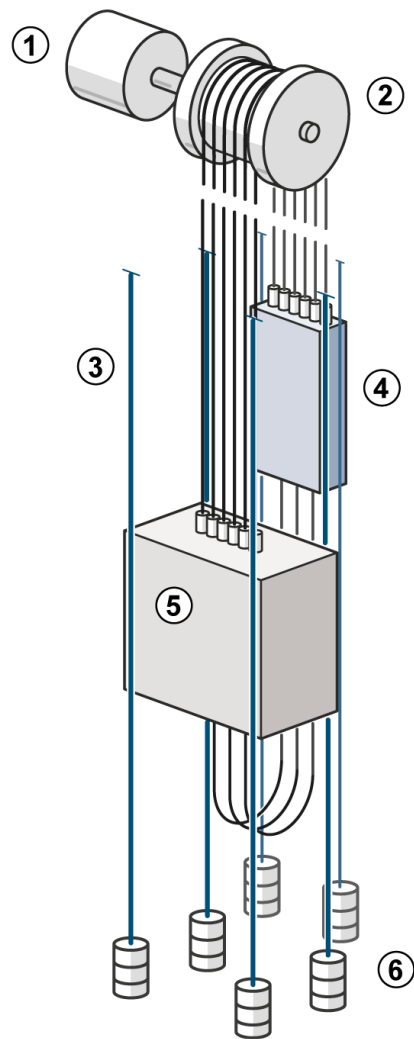


Fig. 6-8: Schema der Schachtförderanlage der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)

- 1) Fördermaschine
- 2) Seilscheiben zur Umlenkung der Förderseile (Koepe-Seilscheiben)
- 3) Führungsseile (für Förderkorb und Gegengewicht)
- 4) Gegengewicht
- 5) Förderkorb
- 6) Spannungsgewichte für die Führungsseile

Quelle: Homepage WIPP (wipp.energy.gov)

6.6 Fazit zu Tiefenlagerprojekten in anderen Ländern

In den betrachteten Ländern mit geologischen Tiefenlagerprojekten sind Schachtförderanlagen nebst Zugangstunneln anerkannter Stand der Technik und werden in vielen Fällen auch für nukleare Transporte vorgesehen. Der «World Nuclear Waste Report 2019» (Besnard et al. 2019) erwähnt ebenfalls Schächte als meistgewählte Zugangsvariante, schliesst aber Zugangstunnel als Möglichkeit nicht aus.

7 **Schlussfolgerungen**

Die Schachtförderung für die Erschliessung untertägiger Anlagen ist eine etablierte Technik, für die es langjährige internationale Erfahrungen gibt. In traditionellen Bergbauländern wie auch bei Tunnelbauprojekten im Alpenraum sind Schachtförderanlagen weit verbreitet. Es bestehen international umfangreiche Gesetze, Verordnungen und Vorschriften für deren sicheren Bau und Betrieb.

Die Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva) berücksichtigt für Schachtförderanlagen die internationalen Erfahrungen und empfiehlt auf ihrer Homepage das deutsche Regelwerk.

Ein Lastabsturz als schlimmster denkbarer Unfall kann bei der Schachtförderung durch Einhaltung der Vorschriften und des Regelwerks zuverlässig verhindert werden. Die in diesem Bericht dargestellten beispielhaften Zweiseil-Trommelfördermaschinen können, wie auch die Treibscheibenanlagen, so ausgelegt, gebaut und betrieben werden, dass sie die Anforderungen eines geologischen Tiefenlagers erfüllen.

Schachtförderung ist auch in Tiefenlagerprojekten anderer Länder vorgesehen und gilt als anerkannter Stand der Technik. Insgesamt können Schächte mit Schachtförderanlagen als geeignete und sichere Zugangsmöglichkeit zu einem geologischen Tiefenlager betrachtet werden. Technische Weiterentwicklungen und Verbesserung einzelner Komponenten, die vom Gewinnungsbergbau oder von den Anlagenherstellern vorangetrieben werden, sind weiterhin zu erwarten. Bei umfassender Planung und verantwortungsvollem Betrieb stellen Schachtförderanlagen verlässlich den Zugang zu unterirdischen Lagerstätten sicher.

8 Literaturverzeichnis

BBergG (1980): Bundesberggesetz der Bundesrepublik Deutschland.

Besnard, M., Buser, M., Fairlie, I., MacKerron, G., Macfarlane, A., Matyas, E., Marignac, Y., Sequens, E., Swahn, J. & Wealer, B. (2019): The World Nuclear Waste Report 2019. Focus Europe. (www.worldnuclearwastereport.org). Arnold Group, Grossbeeren.

BFE (2008): Sachplan Geologische Tiefenlager: Konzeptteil. BFE 2. April 2008 (Revision vom 30. November 2011). Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.

BVOS (2003): Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS) vom 15.10.2003. Vorschriftensammlung Bergbau der Bezirksregierung Arnsberg.

ENSI (2018): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 3. ENSI 33/649. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

Fanger, L., Müller, H. & Vogt, T. (2021): Konzeptbericht Überwachung Umwelt und geologisches Umfeld. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-28 Rev. 1.

KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.

KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Februar 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.

Nagra (2013): Standortunabhängige Betrachtungen zur Sicherheit und zum Schutz des Grundwassers: Grundlagen zur Beurteilung der grundsätzlichen Bewilligungsfähigkeit einer Oberflächenanlage für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht NTB 13-01.

Nagra (2014): Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Untertageanlagen der geologischen Tiefenlager in der Betriebsphase: Vorgaben, Vorgehen und Dokumentation der Ergebnisse. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-51.

Nagra (2021a): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.

Nagra (2021b): Konzept erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag (EUU). Nagra Arbeitsbericht NAB 21-14.

Nagra (2021c): Verschlusskonzept für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-12.

Nagra (2022a): Betriebskonzept für die geologische Tiefenlagerung. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-06.

Nagra (2022b): Lüftungs- und Kühlkonzept geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-31.

Nagra (2022c): Module der Lagerarchitektur. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-35.

Nagra (2022d): Rückholungskonzept für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-13.

Nagra (2022e): Vorläufige Planungsstudie zur Oberflächeninfrastruktur für das geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-05.

Nagra NAB 23-01 (*in Bearb.*): Bautechnisches Dossier. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 .

Nagra NTB 24-11 (*in Bearb.*): Anlagen- und Betriebskonzept des geologischen Tiefenlagers am Haberstal. Nagra Technischer Bericht NTB 24-11.

Sindern, W. & Borowski, S. (2014): Sicherheitstechnische Betrachtungen zu Schachtförderanlagen für den Zugang zu einem zukünftigen geologischen Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75.

TAS (2005): Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS) Stand: Dezember 2005. Vorschriftensammlung Bergbau der Bezirksregierung Arnsberg.