nagra.

Arbeitsbericht NAB 09-07

Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb SGT-ZE / SUG 2.3

Alternatives Ausbaukonzept ("Liner concept") für BE/HAA-Lagerstollen

November 2009

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

nagra.

Arbeitsbericht NAB 09-07

Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb SGT-ZE / SUG 2.3

Alternatives Ausbaukonzept ("Liner concept") für BE/HAA-Lagerstollen

November 2009

KEYWORDS

BE/HAA-Lagerstollen, Ausbaukonzept, Liner, Vortriebsmethode, Ausbruchsicherung, Standsicherheit, Sachplan geologische Tiefenlager

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

Der vorliegende Bericht wurde von der Nagra in Zusammenarbeit mit Pöyry Infra AG erstellt.

"Copyright © 2009 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."

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I
Tabellenverzeichnis II
Figurenverzeichnis II

1 Einleitung 1

2 Rahmenbedingungen für das System und die einzelnen Komponenten (Boundary conditions) 5
2.1 Standorteigenschaften 5
2.2 Ungewissheiten 5

3 Auslegungsanforderungen (Design options) 7
3.1 Relevante Auslegungsanforderungen abgeleitet aus der Langzeitsicherheit 7
3.1.1 Anordnungen der Lagerkammern im Wirtgestein 7
3.1.2 Geeignete Abmessung der Lagerstollen zur Aufnahme der sicherheitstechnisch erforderlichen technischen Barrieren 7
3.1.3 Beschränkung der Gebirgsstörung infolge untertägige Anlagenteile 7
3.1.4 Günstige physikalische und chemische Bedingungen 8
3.1.5 Keine durchgehenden Auskleidungen der BE/HAA-Lagerstollen über die gesamte Stollenlänge 9
3.2 Relevante Auslegungshinweise abgeleitet aus der Rückholbarkeit 9
3.3 Relevante Auslegungshinweise abgeleitet aus Sicht der bautechnischen Machbarkeit und betrieblichen Aspekten 9
3.3.1 Auslegungsanforderungen abgeleitet aus der Betriebssicherheit und der Sicherheit für den Bau 9
3.4 Projektbasis (‚Design Criteria') 10

4 Entwurfsbasis und Konfigurationen ('Specifications and Configuration') 13
4.1 Annahmen zu Konfigurationsparametern 13
4.2 Konzeptionelle Überlegungen zur Auslegung der Baumethode 13
4.3 Alternative Vortriebsmethoden 15
4.4 Alternative Ausbaukonzepte 16

5 Referenzverzeichnis 19

Anhang 1 Vergleich möglicher Vortriebsmethoden 21
Anhang 2 Mögliche Vortriebseinrichtungen 25
Anhang 2.1 ∅ 2.5 m TBM-Herrenknecht Grippermaschine mit flachem Bohrkopf und Zentrumsdisken, kurzem Schild sowie Steuerzylindern; 27

Anhang 2.2 ∅ 2.8 m TBM-Herrenknecht Grippermaschine mit flachem Bohrkopf und Zentrumsdisken, kurzem Schild sowie Steuerzylindern und vollständiger Nachläuferauslegung inkl. zentriertem Förderband und Ankerbohreinrichtung im Bohrkopfbereich; ... 29

Anhang 2.3 ∅ 2.5 m TBM-Herrenknecht Schildmaschine ohne Schildschwanz und Spreiztübbingeinbau ausserhalb Schild mit flachem Bohrkopf ... 31

Anhang 2.4 ∅ 2.8 m offene TBM-Robbins Grippermaschine mit konischem Bohrkopf und ‚Main Beam' Konstruktion ... 33

Anhang 2.5 ∅ 2.5 m TSM-Herrenknecht Grippermaschine mit Längsschrämkopf und kurzem Schild ... 35

Anhang 3 Ausbaukonzepte ... 37

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1 Orientierende Annahmen der zugrunde gelegten Standortbedingungen (Nagra 2008b, Nagra 2009) ... 5

Tab. 3-1 Provisorische, orientierende Design Spezifikationen für BE/HAA-Lagerstollen zur Ableitung von alternativen Baumethoden (Vortriebsmethoden, Ausbaukonzepten) ... 11

Tab. 4-1 Aufschlüsselung der eingebauten Stahlmenge sowie deren Korrosionsoberfläche pro Laufmeter BE-Lagerstollen gemäss Entsorgungsnachweis 2002 ... 17

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1 Ausbruchsicherungskonzept Anlagenkonzept Entsorgungsnachweis 2002 (Nagra 2000a), Tafeljura, Opalinuston im Zürcher Weinland, Überlagerung ca. 650 m ... 1

Fig. 1-2 Modellhaftes alternatives Ausbaukonzept mit Stahlträgern (vgl. weitere alternative Ausbaukonzepte gemäss Anhang 3) ... 2

Fig. 4-1 BE/HAA-Lagerstollen auf der Basis des Projekt Opalinuston, erweitert mit einer möglichen Systemankerung ... 13

1 Einleitung

Für das Anlagenkonzept Entsorgungsnachweis 2002 (Nagra 2002a) wurde gezeigt, dass für die BE/HAA-Lagerstollen keine stabilitätsbedingten Einbauten erforderlich sind bzw. ein Arbeitsschutz aus Ankern und Netzen ausreichend ist (Fig. 1-1). Gemäss diesem Konzept war vorgesehen, die Lagerstollen mit einer Tunnelbohrmaschine (Tunnelbohrmaschine wie sie z.B. zur Erstellung des FEBEX-Teststollens im Felslabor Grimsel eingesetzt wurde; Ausbruchdurchmesser 2.30 m, Nagra 2002a) vom Bautunnel her aufzufahren und allfällige Niederbrüche aus der Firste (‚Sargdeckel') mit Felsankern (Stahl- oder glasfaservertärkte Kunststoffanker) und Netzen zu vermeiden.

Dieses standortbezogene Konzept bezog sich auf den Opalinuston im Tafeljura des Zürcher Weinlands für eine Lagertiefe mit einer durchschnittlichen Überlagerung von ca. 650 m.

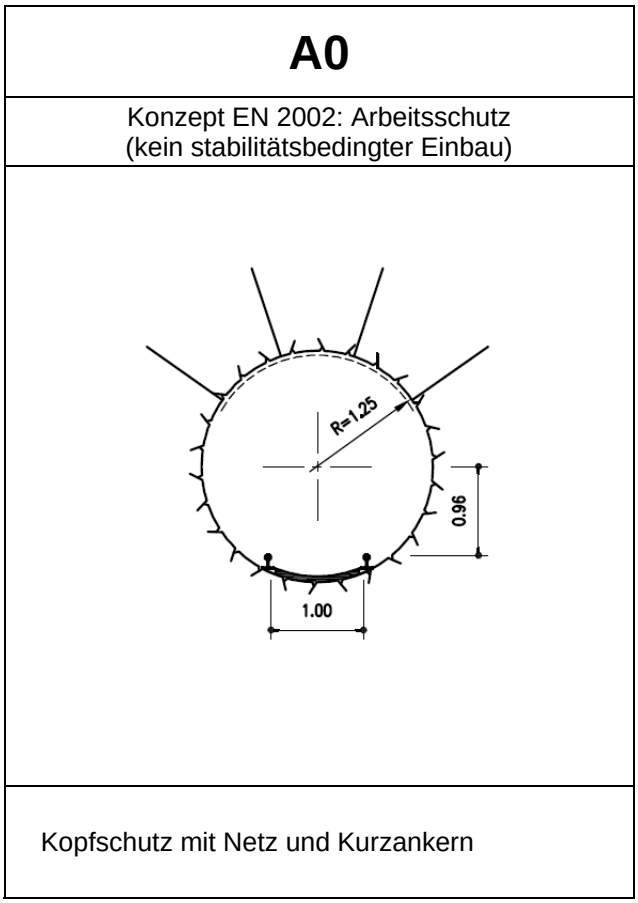


Fig. 1-1 Ausbruchsicherungskonzept Anlagenkonzept Entsorgungsnachweis 2002 (Nagra 2000a), Tafeljura, Opalinuston im Zürcher Weinland, Überlagerung ca. 650 m

Im Rahmen des ‚Sachplans geologische Tiefenlager' (SGT) wurden für HAA-Lager weitere Standorte geprüft und Vorschläge eingereicht (Nagra 2008a). Die vorgeschlagenen WG-Bereiche weisen im Vergleich zum Anlagenkonzept Entsorgungsnachweis 2002 zum Teil ungünstigere felsmechanische Bedingungen auf (grössere Überlagerung der Lagerstollen, tektonisches Regime mit eventuell höherer Trennflächendichte als im Tafeljura. Um bei der

Realisierung der Lagerstollen vergleichbare Standsicherheiten und Deformationen trotz den mutmasslich ungünstigeren felsmechanischen Bedingungen zu erreichen, sind voraussichtlich stabilisierende Ausbauten (Ausbruchsicherung) erforderlich.

In diesem Bericht werden konzeptionelle Überlegungen und Lösungsansätze zu alternativen Ausbaukonzepten („Liner concepts“) für BE/HAA-Lagerstollen vorgestellt und diskutiert (vgl. beispielhaft Fig. 1-2). Damit sollen die Möglichkeiten und der Spielraum aufgezeigt werden, ohne dass bereits eine Wahl getroffen wird.

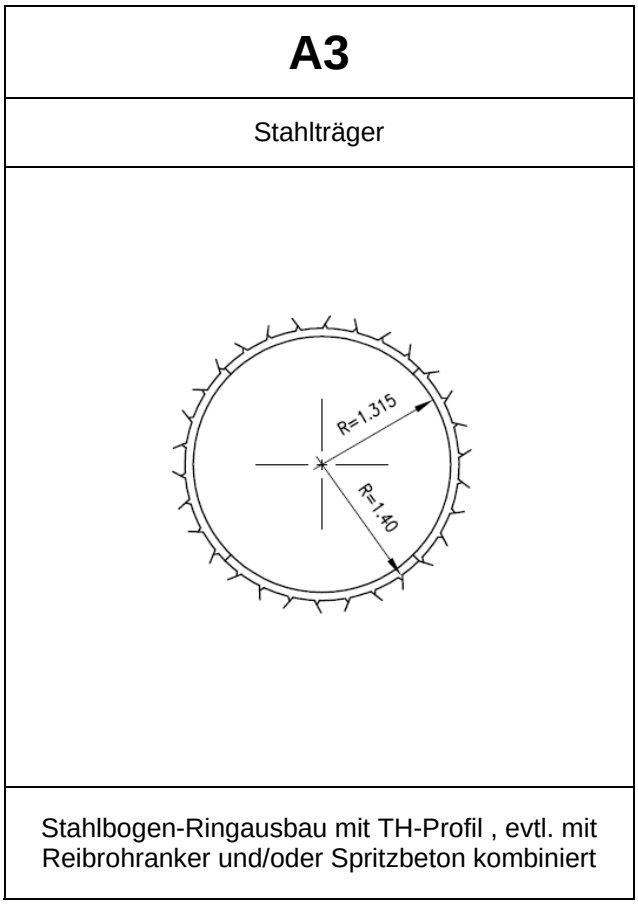


Fig. 1-2 Modellhaftes alternatives Ausbaukonzept mit Stahlträgern (vgl. weitere alternative Ausbaukonzepte gemäss Anhang 3)

Im konventionellen Untertagebau wird entweder ein Ausbaukonzept vorgesehen, welches alle vorhersehbaren Gefährdungen und Unsicherheiten sicher abdeckt (grosser Ausbauwiderstand bspw. Schildvortrieb mit Vollschnittmaschine und Tübbingausbau, Pressrohrvortrieb) oder es werden eine Reihe von Sicherungstypen[1] mit unterschiedlichen Ausbauwiderständen definiert, welche je nach Randbedingung eingesetzt werden können.

[1] „Vorbestimmte Massnahmen für die Ausbruchsicherung für verschiedene Gebirgsverhältnisse und Bemessungssituationen“ (gemäss SIA Norm 197 (SIA 2004a))

Der Ausbau[2] (‚Liner') kann nicht losgelöst von der Vortriebsmethode und weiterer Parameter (Vortriebsgeschwindigkeit, Abschlagslänge, Zeitpunkt des Einbaus der Ausbruchsicherung) festgelegt werden. Es ist deshalb wichtig, die Baumethode als Gesamtsystem zwischen Vortriebsmethode, Vortriebsgeschwindigkeit, Ausbruchsicherung und Abstände zur Ortsbrust in Kombination mit weiteren Bauhilfsmassnahmen zu verstehen und zu beschreiben. Daher werden in diesem Bericht auch mögliche Vortriebsmethoden und machbare Kombinationen mit Sicherungstypen sowie der relevanten Parameter vorgestellt und diskutiert.

Die vorgestellten Baumethoden orientieren sich an Erfahrungen und erprobten Technologien, doch wird berücksichtigt, dass einige relevante Anforderungen und Randbedingungen an den Bau der BE/HAA-Lagerstollen von denjenigen herkömmlicher Untertagebauten (Verkehrstunnelbau, Bergbau, Kraftwerksbau) abweichen. Diese Unterschiede müssen berücksichtigt werden, wenn erprobte Systeme übernommen werden.

---

[2] „Massnahmen zur Wahrung der Standsicherheit und der Beschränkung der Verformungen des ausgebrochenen Hohlraums in der Bau- und Nutzungsphase; umfasst die Ausbruchsicherung und die Verkleidung" (gemäss SIA Norm 197 (SIA 2004a))

2 Rahmenbedingungen für das System und die einzelnen Komponenten (Boundary conditions)

2.1 Standorteigenschaften

Relevant für den Ausbau der Lagerstollen sind die Eigenschaften und Bedingungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches/Wirtgesteins. Aufgrund der Anforderungen an die Langzeitstabilität, der Barriere-Eigenschaften und der Ausdehnung des Wirtgesteins kann für die Lagerstollen von einem Homogenbereich in Bezug auf die relevanten Parameter für die Baumethode ausgegangen werden, welcher im Vorfeld zudem sehr gut erkundet wurde[3].

Für die Ableitung der in diesem Bericht angenommenen alternativen Ausbaukonzepten für BE/HAA-Lagerstollen wird davon ausgegangen, dass sich die Standorteigenschaften auf Opalinuston mit folgenden Standortbedingungen beschränkt:

Tab. 2-1 Orientierende Annahmen der zugrunde gelegten Standortbedingungen (Nagra 2008b, Nagra 2009)

Wirtgesteinstyp	Opalinuston (sandige Fazies)		
Tektonisches Regime	Tafeljura	Vorfaltenzone	Subjurassiche Zone
Überlagerung (Tiefenlage)	400 – 900 m	400 – 900 m	400 – 800 m
Trennflächen	Keine Berücksichti-gung	Trennflächen zwischen den beiden Extremen	Vergleichbar wie in Felslabor Mont Terri
Gesteinsfestigkeiten (Richtwert UCS)	30 MPa		
Heterogenität	Homogen		
Anisotropie	Mittel bis stark / horizontal bis subhorizontal geschichtet		
Hydrogeologie	Sehr kleine Durchlässigkeiten / Bergwasseranfall: trocken		

2.2 Ungewissheiten

Neben diesen Standorteigenschaften sind bei der Auslegung weitere Einschränkungen und Ungewissheiten zu berücksichtigen. Aufgrund tektonischer Prozesse können kleinräumige Diskontinuitäten (Störungszonen, Scherzonen, Klüfte) und Störungszonen mit grosser Längserstreckung (regionale Störungszonen) existieren.

Um diesen auslegungsbestimmenden Störzonen ausweichen zu können, ist eine ausreichende Flexibilität in Bezug auf die Auslegung der Lagerstollen erforderlich (z.B. variable Länge). Diese Anforderung deckt sich mit einem der Auslegungsprinzipien (‚flexibility: design alternatives') (Nagra 2002b).

[3] Dazu gehört ein mehrjähriger Felslaborbetrieb auf Niveau der Lagerstollen und der Möglichkeit von Demonstrationsversuchen vor Ort.

3 Auslegungsanforderungen (Design options)

Abgeleitet von den übergeordneten Sicherheitsprinzipien (Performance Objectives and Design Principles, Nagra 2002b) und den funktionalen Anforderungen an die Langzeitsicherheit, die Rückholbarkeit und die bautechnische Machbarkeit, sowie unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen gemäss Kapitel 2, lassen sich Hinweise an die Auslegung der Lagerstollen ableiten, welche eine hohe Gewährleistung geben, dass der Sicherheitsnachweis erbracht werden kann.

Nachfolgend werden nur Anforderungen abgeleitet, welche für die Auslegung der alternativen Ausbaukonzepte (‚Liner concepts') relevant bzw. massgebend sind.

3.1 Relevante Auslegungsanforderungen abgeleitet aus der Langzeitsicherheit

Nachfolgend werden die relevanten Auslegungshinweise beschrieben, welche aus den Sicherheitsfunktionen in Bezug auf die Langzeitsicherheit (Limitierung Wassersickerung, Freisetzung Radionuklide, Transport Radionuklide in den menschlichen Lebensraum) abgeleitet werden können.

3.1.1 Anordnungen der Lagerkammern im Wirtgestein

Die Lagerkammern sollen innerhalb des Wirtgesteins so angeordnet werden, dass dessen natürliche Barrierewirkung optimal ausgenutzt werden kann. Das wird in erster Linie erreicht, wenn der erforderliche Abstand zu den auslegungsbestimmenden Störungen und regionalen Störungszonen eingehalten und die Mächtigkeit der Wirtgesteinsformation über und unter der Lagerzone genügend ist. Weiter ist die lichte Höhe der Lagerstollen zu beschränken.

3.1.2 Geeignete Abmessung der Lagerstollen zur Aufnahme der sicherheitstechnisch erforderlichen technischen Barrieren

Die Lagerstollen sind so auszulegen, dass sie günstige Rahmenbedingungen für die zuverlässige Realisierung der technischen Barrieren bieten (unterstützt Sicherheitsfunktion: ‚Langzeitverschluss durch Mehrfach-Barrierensystem mit Technischen Barrieren'). Dies wird durch die Wahl eines ausreichenden Lichtraumprofils (z.B. Mindestinnendurchmesser des BE/HAA-Lagerstollen) der Lagerstollen erreicht. Das Lichtraumprofil berücksichtigt einerseits die Mindestabmessungen der technischen Barrieren sowie den notwendigen Raum für die zuverlässige Realisierung (Einbau) der technischen Barrieren.

3.1.3 Beschränkung der Gebirgsstörung infolge untertägige Anlagenteile

Die Lagerstollen sind so auszulegen, dass das Gebirge in allen Phasen wenig gestört und damit vor allem die Auflockerungszone beschränkt wird (unterstützt sicherheitsrelevante Anforderung: ‚dauerhafter Erhalt der günstigen Eigenschaften des geologischen Tiefenlagers'). Diese wird für die Lagerstollen erreicht, wenn:

- die Lagerstollen so angeordnet werden, dass die in-situ Gebirgsspannungen günstige Voraussetzungen schaffen. Günstige Voraussetzungen liegen dann vor, wenn das Spannungsfeld möglichst einer lithostatischen Situation nahekommt und die mittlere Normalspannung (mean stress) genügend klein ist (Beschränkung der Überlagerung). Ersteres wird begünstigt, wenn die Lagerstollen in Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung ausgerichtet sind;
- die Lagerstollen so angeordnet werden, dass sie möglichst normal zu eventuell vorhandenen Störungssystemen ausgerichtet sind;
- die Grösse der zu realisierenden Hohlräume beschränkt werden;
- ein kreisrundes bzw. annähernd kreisrundes bzw. eventuell leicht elliptisches Normalprofil gewählt wird[4];
- eine deformationsarme und schonende Bau- bzw. Ausbruchmethode gewählt wird;
- eine Ausbruchsicherung bzw. ein Ausbau das Gebirgstragvermögen verbessert;
- die Abstände zwischen benachbarten Hohlräumen so gross gewählt werden, dass die gegenseitige geomechanische Beeinflussung klein ist;
- die Hohlräume nach dem Ausbruch relativ rasch verfüllt werden (in wenigen Jahren). Die Lagerstollen sind deshalb möglichst schrittweise zu realisieren und mit radioaktiven Abfällen zu belegen und anschliessend umgehend zu verfüllen (Realisierung, Einlagerung und Verfüllung in jährlichen Etappen).

Verfüllen der Lagerstollen nach Abschluss der Einlagerung (bzw. auch unter Berücksichtigung des möglichen Quelldruckaufbaus von Bentonitverfüllungen) minimiert die Konvergenzen der Hohlräume und verhindert Langzeitdeformationen und Schädigung der WG Formationen langfristig, wenn die Stützmittel (Ausbau) ihre Stützwirkung verlieren.

3.1.4 Günstige physikalische und chemische Bedingungen

Die Materialien für die technischen Barrieren sowie die bautechnisch erforderlichen Baumaterialien (Felssicherung, Hilfskonstruktionen) in den Lagerstollen sind so zu wählen, dass in Bezug auf die Langzeitsicherheit ein physikalisch und chemisch günstiges Umfeld geschaffen wird, welches die Änderung der günstigen Eigenschaften der technischen und natürlichen Barrieren (insbesondere Bentonit und Opalinuston) in Bezug auf Radionuklidfreisetzung und -rückhalt nicht bzw. nur wenig beeinträchtigt.

Folgende Auslegungsanforderungen in Abhängigkeit zum Abfalltyp können daraus abgeleitet werden:

- Beschränkung von Portlandit-haltigen Materialien im Bereich BE/HAA-Lagerstollen (pH-Fahne);
- Beschränkung von stark korrodierendem metallischem Material, bzw. Minimierung der metallischen Korrosionsoberfläche (Gasbildung);
- Beschränkung von organischen Materialien (Gasbildung).

---

[4] Durch Anpassen der Profilform (elliptisches Normalprofil) an die in-situ Spannungsverteilung bzw. an die Festigkeitsanisotropie kann die Spannungsverteilung im Nahfeld noch zusätzlich optimiert werden, was den Aufwand an Sicherungsmittel reduziert.

3.1.5 Keine durchgehenden Auskleidungen der BE/HAA-Lagerstollen über die gesamte Stollenlänge

Durchgehende Auskleidungen bspw. aus Stahl oder Beton längs der Lagerstollen könnten langfristig präferentielle Fliesspfade bilden. Um das Auslegungsprinzip der Kompartimentbildung (‚Compartmentalization') nicht zu verletzen, soll eine allfällige Auskleidung in Längsrichtung in gewissen Abständen unterbrochen sein oder soll die Länge der einzelnen Lagerstollen beschränkt werden.

3.2 Relevante Auslegungshinweise abgeleitet aus der Rückholbarkeit

Nachfolgend werden die relevanten Auslegungshinweise abgeleitet, welche den Anforderungen an Rückholbarkeit möglichst Rechnung tragen.

Die Ausbaumassnahmen sind unter Berücksichtigung der sich ändernden Bedingungen nach der Verfüllung möglichst so auszulegen, dass eine Rückholung der Abfälle bis zum endgültigen Verschluss ohne grossen Aufwand möglich ist.

3.3 Relevante Auslegungshinweise abgeleitet aus Sicht der bautechnischen Machbarkeit und betrieblichen Aspekten

3.3.1 Auslegungsanforderungen abgeleitet aus der Betriebssicherheit und der Sicherheit für den Bau

- Trennung zwischen nuklearen und nicht-nuklearen Aktivitäten: Die Bauwerke sind so anzuordnen und auszulegen, dass eine klare Trennung entweder zeitlich oder räumlich zwischen dem Bau der Stollen und der Einlagerung gewährleistet ist. Das wird erreicht, indem der Bau der Lagerstollen über einen Bautunnel und die Einlagerung über einen separaten Betriebstunnel erfolgt, welche beide vorgängig mit entsprechenden Startnischen für die Lagerstollen erstellt werden.
- Ausreichende Ventilation gewährleisten: Die Lagerstollen sind so auszulegen und auszurüsten, dass eine ausreichende Ventilation (natürliche oder künstliche Ventilation) gewährleistet werden kann. Darunter wird insbesondere folgendes verstanden:
  - Genügende Frischluftzufuhr und Reinigung (z.B. Entstaubung) der Luft zur Einhaltung der Luftqualität (MAK-Werte, Quarzgehalt etc.), dann und dort wo der Zugang von Personal erforderlich bzw. grundsätzlich möglich ist;
  - Sicherstellung von klimatischen Verhältnissen zur Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen für den Gesundheitsschutz und für die Funktionstüchtigkeit von Geräten und Ausrüstungen;
  - Unterstützung von Selbstrettung und Intervention im Falle von Störfällen (v.a. Brand) in Kombination mit ausreichenden Flucht- und Interventionsrouten;
  - Bei Erdgasgefahr ausreichende Verdünnung der Luft gemäss gesetzlichen Anforderungen.

- Ausreichende Lichtraumprofile für alle erforderlichen Funktionen in allen Phasen sicherstellen: Die Lagerstollen sind so auszulegen, dass in allen Phasen ein ausreichendes Lichtraumprofil für eine sichere Funktion aller erforderlichen Aktivitäten möglich ist. Insbesondere muss das Lichtraumprofil in den Lagerstollen folgende funktionalen Elemente berücksichtigen (nicht abschliessende Liste):
  - Baugeräte, Handhabungsgeräte, Transportgeräte, Einlagerungsgeräte, Rückholgeräte, Verfüllgeräte;
  - Temporäre Versorgungsleitungen, Entsorgungsleitungen, Lüftungskanäle, Leitungen für Leittechnik und Messungen während dem Bau soweit erforderlich;
  - Intervention und Flucht während dem Bau und Betrieb;
  - Betrieblichen und baulichen Unterhalt (inkl. Inspektion) vor der Einlagerung.
- Anforderungen an Linienführung und Längen der Lagerstollen: Die Lagerstollen sind so anzuordnen und auszulegen, dass in allen Phasen die erforderlichen Aktivitäten sicher ausgeführt werden können. Dies wird erreicht, wenn die Funktionstüchtigkeit der Geräte und Ausrüstungen gewährleistet bleibt und Anforderungen an den Arbeitsschutz eingehalten werden;
- Ausreichende Stabilität der Hohlräume in allen Phasen aus Sicht Arbeitsschutz: Kopfschutz in zugänglichen Bereichen der Lagerstollen im Vortriebsbereich (L1 gemäss SIA Normen 198, SIA 2004b).

3.4 Projektbasis (‚Design Criteria')

Aus den relevanten Auslegungshinweisen gemäss Kapitel 3 können orientierende Spezifikationen (‚Design Criteria') zur Konzipierung der BE/HAA-Lagerstollen bzw. der Baumethode abgeleitet werden, bei welchen die Wahrscheinlichkeit gross ist, dass eine machbare, sichere und zuverlässige Einlagerung möglich ist, und die Langzeitsicherheit (Sicherheitsanalyse) für ein bestimmtes Tiefenlager nachgewiesen werden kann (Tab. 3-1). Diese orientierenden Spezifikationen sind provisorisch; sie werden zur Ableitung möglicher Baumethoden (Vortriebsmethoden, Ausbaukonzepte) auf der jetzigen Stufe zugrunde gelegt.

Tab. 3-1 Provisorische, orientierende Design Spezifikationen für BE/HAA-Lagerstollen zur Ableitung von alternativen Baumethoden (Vortriebsmethoden, Ausbaukonzepten)

Parameter	Spezifikation	Relevante Anforderung
Lichtraum (lichter Innendurchmesser)	≥ 2.5 m (Nagra 2002b)	Sicherheitsfunktion ‚Langzeitverschluss durch Mehrfach-Barrierensystem mit Technischen Barrieren' (Mindestüberdeckung Verfüllmaterial (Buffer) ca. 70 cm, Lagerbehälterdurchmesser 1.05 m)
Ausbruchdurchmesser	≤ 3.5 m	Sicherheitsfunktion ‚Dauerhafter Erhalt der günstigen Eigenschaften des geologischen Tiefenlagers' (Beschränkung der Gebirgsstörung bzw. Beschränkung AUZ)
Profilform	Kreisrund (Nagra 2002a) bzw. leicht elliptisch	Sicherheitsfunktion ‚Dauerhafter Erhalt der günstigen Eigenschaften des geologischen Tiefenlagers' (Beschränkung der Gebirgsstörung bzw. Beschränkung AUZ)
Beschränkung von Portlandit-haltigen Materialien im Bereich Lagerstollen	Verwendung von Niedrig pH-Zementen (LPC); Beschränkung der Menge (Fries 2007)	Sicherheitsrelevante Anforderung: dauerhafter Erhalt der günstigen Eigenschaften des geologischen Tiefenlager
Beschränkung von metallischem Material, bzw. Beschränkung der Korrosionsoberfläche	Stahlmasse ≤ 170 kg/m; Korrosionsoberfläche ≤ 5.7 m^2/m)[5]	Sicherheitsrelevante Anforderung: dauerhafter Erhalt der günstigen Eigenschaften des geologischen Tiefenlager
Beschränkung von organischen Materialien	Beschränkung bauchemische Zusatzmittel, spezielle Kunststoffe.	Sicherheitsrelevante Anforderung: dauerhafter Erhalt der günstigen Eigenschaften des geologischen Tiefenlager
Keine durchgehende Auskleidung in Längsrichtung	Unterbruch der durchgehenden Auskleidung mind. alle 10 Lagerbehälter (ca. alle 75 m)	Prinzip Kompartimentbildung
Längsneigung Lagerstollen	≤ 10 %	Bautechnische Machbarkeit: Sicherstellung der Betriebssicherheit, der Funktionstüchtigkeit
Horizontale Linienführung	R = ∞ (Gerade Stollen)	Bautechnische Machbarkeit: Sicherstellung der Betriebssicherheit, der Funktionstüchtigkeit

[5] Dies entspricht der Stahlmenge für Einbauten gemäss Entsorgungsnachweis 2002 (Nagra 2002a). 170 kg/m entsprechen ungefähr 5% der Stahlmasse der BE-Endlagerbehälter. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Korrosion relativ rasch nach der Installation der Sicherungsmittel beginnt. Bis zur endgültigen Aufsättigung der verfüllten Lagerstollen werden dutzende bis hunderte Jahre vergehen (Nagra 2004). In dieser Zeit wird die aerobe Korrosion mit deutlich höheren Korrosionsraten als bei der anaeroben Korrosion nach der vollständigen Aufsättigung vorherrschen.

4 Entwurfsbasis und Konfigurationen ('Specifications and Configuration')

4.1 Annahmen zu Konfigurationsparametern

In Nagra 2002a wurde für das Projekt Opalinuston ein Konzept für die Lagerstollen entworfen. Das Konzept geht von einem subhorizontalen (schichtparallelen) kreisrunden und geraden Stollen mit einem Durchmesser von 2.5 m aus. Wenn es die Ausdehnung der Wirtgesteinsformation zulässt, wird eine Stollenlänge von 800 m angestrebt. Aufgrund der i.d.R. geneigten Wirtgesteinsschichten wird die vertikale Linienführung leicht geneigt sein (vgl. Fig. 4-1). Der Vortrieb erfolgt i.d.R. von einem Bautunnel aus, die Einlagerung von einem separaten Betriebstunnel. Die Lagerstollen werden daher von zwei mehr oder weniger quer zu den Lagerstollen verlaufenden Tunnel erschlossen, wobei entweder beide Erschliessungstunnel parallel auf einer Seite angeordnet werden können (Lagerstollen als ‚Blindstollen') oder je ein Erschliessungsstollen auf beiden Seiten der Lagerstollen angeordnet werden (gemäss Konzept Entsorgungsnachweis 2002, Nagra 2002a). Je nach Konfiguration erfolgt der Stollenausbruch steigend oder fallend.

Die Lagerstollen werden ungefähr parallel zur maximalen horizontalen Hauptspannung ausgerichtet (felsmechanisch günstige Raumlage) sofern keine Störungssysteme mit ungünstiger Orientierung vorliegen. Die Lagerstollen werden jeweils spätestens zwei Jahre nach dem Ausbruch wieder verfüllt, d.h. es werden jeweils nur so viele Lagerstollen pro Jahr aufgefahren, wie im nachfolgenden Jahr eingelagert und verfüllt werden.

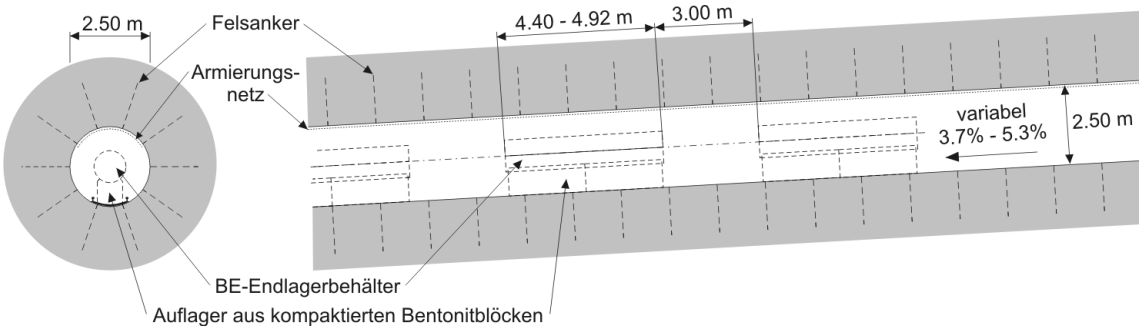


Fig. 4-1 BE/HAA-Lagerstollen auf der Basis des Projekt Opalinuston, erweitert mit einer möglichen Systemankerung

4.2 Konzeptionelle Überlegungen zur Auslegung der Baumethode

Aufgrund der Ungewissheiten bezüglich den tatsächlichen, standortspezifischen Randbedingungen in Bezug auf die felsmechanischen Bedingungen in den verschiedenen Standortgebieten ist es möglich, dass der Ausbauwiderstand gegenüber dem Projekt gemäss Entsorgungsnachweis 2002 (Nagra 2002a) erhöht werden muss. Bei der Entwicklung möglicher alternativer Ausbaukonzepte mit einem erhöhten Ausbauwiderstand ist das Gesamtsystem bestehend aus der Vortriebsmethode, dem Ausbruchsicherungs- bzw. Ausbaukonzept, der Vortriebsgeschwindigkeit und dem Zeitpunkt des Einbaus der Sicherung zu berücksichtigen. Nachfolgend werden einige grundlegenden konzeptionellen Überlegungen aufgeführt, welche die Auslegung der alternativen Baumethode beeinflussen:

1. Die Vortriebsleistung ist im Gegensatz zum konventionellen Untertagebau für die Auslegung der BE/HAA-Lagerstollen nicht massgebend bzw. untergeordnet. Basierend auf den Basiskonzepten sollten pro Jahr nicht mehr als ca. 1600 m Lagerstollen aufgefahren werden[6]. Aufgrund der erwarteten räumlichen Randbedingungen der WG-Formationen ist von einer maximalen Länge der Lagerstollen von ca. 1000 m auszugehen[7]. Geht man von einer Vortriebseinrichtung zur Auffahrung von 1600 m aus, so sind mittlere Tagesleistungen von ca. 8 m/AT[8] zu erreichen (= ca. 40 m^3/AT bzw. ca. 8'000 m^3/Jahr). Sind zwei Vortriebseinrichtungen im Einsatz, so verringert sich für einen max. 1000 m langen Stollen die erforderliche durchschnittliche Vortriebsleistung auf ca. 5 m/AT. Dies sind kleine Vortriebsleistungen im Felstunnelbau[9]. Da keine ‚Leistungsvortriebe' gefahren werden müssen, eröffnen sich dadurch Spielräume für Sicherungs- und Stützmassnahmen, welche im konventionellen Untertagebau i.d.R. nicht umgesetzt werden.
2. Eine durchgehende Auskleidung der Lagerstollen in Längsrichtung ist aus Sicht der Langzeitsicherheit zu meiden, da dies das Prinzip der Kompertimentbildung verletzt. Es ist daher ein Ausbaukonzept zu bevorzugen, welches in Längsrichtung nicht durchgehend ist oder welches zumindest ca. alle 75 m (= 10 Behälter) unterbrochen werden kann. Berücksichtigt man, dass der Opalinuston, welcher die Anforderungen an das Wirtgestein für BE- und HAA-Abfälle erfüllt, kohäsiv und aufgrund der geringen Durchlässigkeit praktisch ‚trocken' ist, können auch bei felsmechanisch ungünstigeren Bedingungen als im Tafeljura des Zürcher Weinland kurze Tunnelabschnitte (Abschnittslänge ≤ Stollendurchmesser) ohne massive gebirgsstützende Massnahme bzw. nur mit Felsankern erstellt werden. Unter dieser Voraussetzung sind gegebenenfalls auch Ausbaukonzepte realisierbar, welche eine in Längsrichtung durchgehende Auskleidung (z.B. Tübbingausbau) aufweisen.
3. Aufgrund der Anforderungen aus Sicht der Langzeitsicherheit soll grundsätzlich die (Bau)materialmenge bzw. im Falle von metallischen (bzw. Eisen-metallischen Materialien) die Korrosionsoberfläche limitiert werden. I.d.R. steigt die Materialmenge, je grösser der erforderliche Ausbauwiderstand ist. Durch ein gutes Prozessverständnis, umfassende Kenntnisse der in-situ Bedingungen (in-situ Spannungen, Gesteinsfestigkeiten, Trennflächen, Anisotropie etc.) kann eine optimierte Baumethode und Auslegung der Lagerstollen gewählt werden. Da im Vergleich zu konventionellen Vortrieben von vergleichsweise homogenen Verhältnissen ausgegangen werden kann, besteht diesbezüglich ein grosses Potential. Um die Materialmenge reduzieren zu können, sind folgende Auslegungsgrundsätze (Design) vorzusehen:
   - Kreisrundes bzw. leicht elliptisches, gleichmässiges Ausbruchprofil;
   - Raumlage Lagerstollen in Richtung der horizontalen Hauptspannungen bzw. Anpassen an Störungssysteme;
   - Beschränkung der Zeit zwischen Ausbruch und Verfüllung der Stollen;
   - Wahrung von trockenen Bedingungen während Bau und Betrieb; dazu gehören auch die Gewährleistung von klimatischen Verhältnissen, welche dem Gebirge das Wasser entziehen;

---

6 Entspricht der Einlagerung von ca. 200 BE/HAA-Endlagerbehälter pro Jahr

7 Gemäss Projekt Opalinuston (Entsorgungsnachweis 2002, Nagra 2002a) wurden 800 m lange Lagerstollen zugrunde gelegt.

8 Annahme einer durchschnittliche Verfügbarkeit von 200 AT pro Jahr (d.h. exkl. Revision, Unterhalt, Unterbrüche, Montage, Demontage etc.)

9 maschinelle Vortriebe mit Vollschnittmaschinen: um 20 – 30 m/AT, konventionelle Vortriebe z.B. Sprengvortrieb: bis 10 m/AT;

- Konischer Ausbruch der Tunnelortsbrust (Angleichung der Ausbruchgeometrie an die Hauptspannungsrichtung der sekundären Gebirgsspannungen);
- Evtl. Vorausbohrungen (Grossbohrung vgl. Klimatisierung) zur Unterstützung der Vorausdrainage (Erhöhung der effektiven Normalspannungen), evtl. zur Reduktion von bergschlagähnlichen Ereignissen;
- Stützmassnahmen im gesamten Umfang zur Reduktion spannungsinduzierter Instabilitäten (d.h. auch Sicherung in der Sohle) und zur Reduktion der Deformationen;
- Frühzeitige Sicherung d.h. wirksame Stützmassnahmen im Abstand von innerhalb ca. einem Tunneldurchmesser zur Ortbrust.

4.3 Alternative Vortriebsmethoden

In Anhang 1 sind unter Berücksichtigung der vorangegangenen Anforderungen folgende alternativen Vortriebsmethoden zur Erstellung der BE/HAA-Lagerstollen aufgeführt und beschrieben:

- Offene Tunnelbohrmaschine (TBM) mit Gripper / V1.1;
- Erweiterungsmaschine (TBE) aus Mikrotunnel / V1.2;
- Gripper verspannte Teilschnittmaschine (TSM) mit Längsschrämkopf evtl. in kurzem Schild / V2.1;
- Mobile Teilschnittmaschine (TSM) / V2.2;
- Sprengvortrieb mit Vorbohrungen (SPV) / V3.

Das minimale Lichtraumprofil von 2.5 m ist aus bautechnischer Sicht klein. Die beengten Platzverhältnisse erschweren insbesondere beim maschinellen Vortrieb die Realisierung; insbesondere wird der rasche Einbau von wirksamen Sicherungsmittel erschwert. Aus bautechnischer Sicht sind für die möglichen Vortriebsmethoden grössere Durchmesser zu bevorzugen. Zurzeit sind viele TBM's mit Gripper mit Durchmesser von 2.8 m bis 3.2 m im Einsatz. Aus Sicht der Kostenoptimierung bei konventionellen Stollenbauten mit Vollschnittmaschinen geht die Tendenz trotz Mehrausbruch zu noch grösseren Durchmessern. Da die BE/HAA-Lagerstollen mit Bentonit wieder verfüllt werden müssen, gilt dies aus Sicht der Kostenoptimierung nicht im gleichen Masse. Zudem hat der Durchmesser einen direkten Einfluss auf die Grösse der Auflockerungszone und soll somit beschränkt werden (vgl. Kap. 3.1.3).

In Anhang 2 sind mögliche Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) für BE/HAA-Lagerstollen abgebildet. Diese Konzeptstudien zeigen eine Auswahl von möglichen TVM, welche in Zusammenarbeit mit den Firmen Herrenknecht und Robbins erarbeitet wurden. Diese TVM sind noch nicht im Hinblick auf die speziellen Anforderungen ausgelegt und optimiert worden, sondern basieren im Wesentlichen auf erprobten, modernen Maschinenkonzepten. Folgende Konzepte sind beispielhaft aufgeführt:

- ∅ 2.5 m TBM-Herrenknecht Grippermaschine mit flachem Bohrkopf und Zentrumsdisken, kurzem Schild sowie Steuerzylindern;
- ∅ 2.8 m TBM-Herrenknecht Grippermaschine mit flachem Bohrkopf und Zentrumsdisken, kurzem Schild sowie Steuerzylindern und vollständiger Nachläuferauslegung inkl. zentriertem Förderband und Ankerbohreinrichtung im Bohrkopfbereich;

- ∅ 2.5 m TBM-Herrenknecht Schildmaschine ohne Schildschwanz und Spreiztübbingeinbau ausserhalb Schild mit flachem Bohrkopf;
- ∅ 2.8 m offene TBM-Robbins Grippermaschine mit konischem Bohrkopf und ‚Main Beam' Konstruktion[10];
- ∅ 2.5 m TSM-Herrenknecht Grippermaschine mit Längsschrämkopf und kurzem Schild.

In Bezug auf den raschen gebirgsstützenden Ausbau sind unter Berücksichtigung der engen Platzverhältnisse TSM Konzepte oder evtl. konventionelle Sprengvortriebe vorteilhafter. Von den Vollschnittmaschinen können diesbezüglich TBE Konzepte Vorteile bringen, wobei die Erstellung des Pilotstollens über die grosse Länge beträchtliche Herausforderungen stellen wird.

4.4 Alternative Ausbaukonzepte

In Anhang 3 sind potentiell mögliche alternative Ausbruchsicherungs- bzw. Ausbaukonzepte für BE/HAA-Lagerstollen aufgeführt und beschrieben:

- Kurze Felsanker mit Kopfschutz (Netz) ohne gebirgsstützende Wirkung (Entsorgungsnachweis 2002, Nagra 2002a) / A0.1;
- Systemankerung: Kurzanker geneigt: mit schnellwirkenden kurzen Felsankern L = 1.8 m (Reibrohranker) hinter dem TBM Bohrkopf versetzt / A1.1;
- Systemankerung: Kurzanker radial: mit schnellwirkenden kurzen Felsankern L = 1.8 m (Reibrohranker) vor der Tunnelvortriebseinrichtung versetzt / A1.2;
- Systemankerung: Langanker radial (L ≥ 2.5 m) / A1.3;
- Spritzbeton mit Stahlfasern oder Armierungsnetzen / A2;
- Stahlträger (Stahlbogen-Ringausbau) / A3;
- Tübbingausbau (Spreiztübbinge ohne vordefinierten Ringspalt, gegebenenfalls gelochte Tübbingelemente, um die Abdichtung des Ringspaltes zu gewährleisten) / A4.

Die oben aufgeführten Ausbaukonzepte können teilweise miteinander kombiniert werden. Zudem kann der Ausbauwiderstand durch Anpassung der Spezifikation (Spritzbetonstärke, Ankerlänge, Stahlbogentyp etc.) erhöht werden. Damit lässt sich der Ausbauwiderstand auf die standortspezifischen Bedingungen anpassen.

In Anhang 3 sind für jeden Ausbautyp Richtwerte für die erforderliche Stahlmasse und Korrosionsoberfläche pro Laufmeter Stollen angegeben. Darin sind mögliche alternative Materialien (Kunststoffanker, Natursteintübbinge, Glasfasern, Messinganker etc.) noch nicht berücksichtigt. Tab. 4-1 listet die eingebaute Stahlmenge sowie deren Korrosionsoberfläche pro Laufmeter BE-Lagerstollen gemäss Entsorgungsnachweis 2002 auf. Hierzu sind Konzepte vorstellbar, welche sämtliche nicht für gebirgsstützende Massnahmen erforderlichen Einbauten (Schienen, Schwellen, Rahmen für Bentonitblöcke) aus anderen, nicht metallischen bzw. korrodierenden Materialien ausbilden, oder bei welchen ein Teil der Einbauten jeweils ausgebaut werden (Schienen, Schwellen) bzw. auf welche verzichtet werden kann (Schienen, Schwellen). Damit könnte die durchschnittliche Stahlmenge um ca. 137 kg/m bzw. die durchschnittliche Korrosionsoberfläche um ca. 4.1 m^2/m reduziert werden.

---

[10] Dieses Maschinenkonzept weist gegenüber dem Konzept mit Steuerzylindern bessere Voraussetzungen für den Einbau von gebirgsstützenden Massnahmen nahe hinter dem Bohrkopf.

Die in Anhang 3 angegebenen Ausbautypen weisen im Vergleich zum Konzept gemäss Entsorgungsnachweis 2002 (Nagra 2002a) eine kleinere bzw. ähnliche Stahlmenge auf.

Tab. 4-1 Aufschlüsselung der eingebauten Stahlmenge sowie deren Korrosionsoberfläche pro Laufmeter BE-Lagerstollen gemäss Entsorgungsnachweis 2002

Bauteil aus Stahl	Stahlmenge *	Korrosions-oberfläche *
	[kg/m]	[m²/m]
Schienen S24	50	1.00
Felsanker (Stabanker D=25mm, L = 1m)	16	0.35
Ankerplatten (150x150)	6	0.2
Sicherungsgitter (@=5mm / s=100mm)	10	1
Schwellen (Stahlblech 10 mm alle 50 cm)	75	2.3
Rahmen Bentonitblöcke (gemäss NTB 02-02, Fig. 5.2 exkl. Gewindestangen)	12	0.8
Summe (gerundet)	**170**	**5.7**

* Menge aufgerundet

5 Referenzverzeichnis

Fries, T; Weber, H.P., Wetzig, V. (2007): ESDRED: Low pH Shotcrete for Rock Support: Spraying Tests in the Hagerbach Test Gallery, Nagra Arbeitsbericht. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2002a): Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht NTB 02-02. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2002b): Project Opalinus Clay: Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2004): Effects of post-disposal gas generation in a Repository for spent fuel, high-level waste and long-lived intermediate level waste sited in Opalinus Clay. Nagra Technischer Bericht NTB 04-07. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008a): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Hauptbericht). Nagra Technischer Bericht NTB 08-03. Nagra, Wettingen, Schweiz.

Nagra (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensystem und der Anforderungen an die Geologie, Bericht zur Sicherheit und Machbarkeit. Nagra Technischer Bericht NTB 08-05. Nagra, Wettingen, Schweiz.

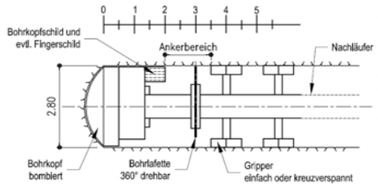
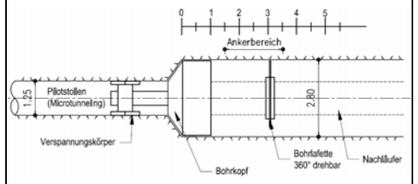
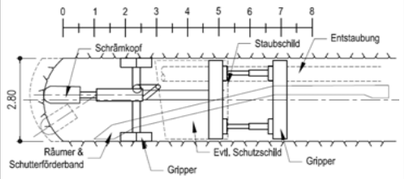
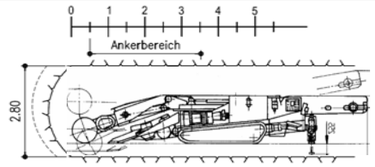
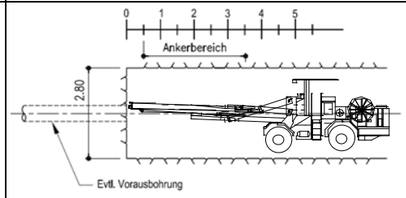
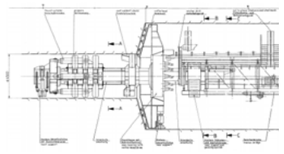
Nagra (2009a): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager Grundlagen und Umsetzung der Indikatoren ‚Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' sowie ‚Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' (Bericht zu Behördenanfrage). Nagra interner Bericht, Wettingen, Schweiz.

SIA Norm 197 (2004a): Projektierung Tunnel – Grundlagen, Schweizer Norm SN 505 197. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

Anhang 1 Vergleich möglicher Vortriebsmethoden

(vgl. nachfolgende Tabelle)

Vortriebsmethoden Lagerstollen

Bezeichner		V1.1	V1.2	V2.1	V2.2	V3
Vortriebsverfahren		TBM		Schrämkopf - TSM		Sprengvortrieb
Maschinentyp / Methode		Gripper-TBM	Erweiterungsmaschine (TBE)	Gripper - TSM	Mobile TSM	
Prinzipienskizze						
Durchmesserbereich (Porofilform)		D = 2.5 - 3.2 m (kreisrund)	Pilot: d = 1.0 - 1.5m; Aufweitung: D = 2.5 - 3.2 m (kreisrund)	D = 2.5 - 3.2 m (kreisrund)	D = 2.5 - 3.2 m (kreisrund)	D = 2.5 - 3.2 m (kreisrund)
Kurzbeschrieb		Offene Gripper-TBM mit normalen Arbeitszyklen (Bohren, Sichern, Umsetzten, Verspannen). Die Sicherung (Stahlbögen, Anker evtl. Spritzbeton) kann unter sehr beengten Verhältnissen direkt hinter dem Bohrkopf eingebracht werden, jedoch nur bei TBM's mit "main beam".	Vorgängiges Erstellen eines Pilotstollens im Micro-tunneling-Verfahren und nachträgliches Aufweiten zum Endquerschnitt mit einer Erweiterungsmaschine (TBE)	TSM verspannt mit Doppelgripper evtl. in kurzem Schild. Beim Einsatz eines Kurschildes wird das Profil mit kleinem Überschnitt geschrämmt.	Vortrieb mit mobiler Schrämkopf - TSM auf Raupenfahrgestell. Sicherung evtl. direkt von TSM aus, falls TSM mit Bohrlafette und Spritzbetonamanipulator ausgestattet. Ansonsten Sicherung im L1* nach Rückzug TSM pro Abschlagslänge.	Konventioneller Sprengvortrieb. Vorausbohrung zur Vordrainage resp. Vorentlastung mit Schneckenbohrer.
Vorteile		- Gebirgsschonender Vortrieb - Hohe Vortriebsleistung - Sehr hohe Profilgenauigkeit - Blindstollen möglich (Teilmontage Bohrkopf) - Vorausbohrung möglich (aufwendig)	- Gebirgsschonend (durch Fräsen und Vorentlastung) - sehr hohe Profilgenauigkeit - Rasche Sicherung bei guten Platzverhältnissen im L1* - Hohe Vortriebsleistung (jedoch 2 Vortriebe) - Entstaubung über Pilotstollen - Klimatisierung über Pilotstollen - Vorausdrainage (Erhöhung effektive Normalspannungen)	- Gebirgsschonend - Blindstollen möglich - permanente Ortsbrusterkundung - Flexibiltät - Vorausdrainage möglich (Erhöhung effektive Normalspannungen) - hohe Profilgenauigkeit (computergesteuert)	- Blindstollen möglich - Vorausbohrung möglich - permanente Ortsbrusterkundung - Flexibiltät - Vorausdrainage möglich - Gebirgsschonend	- Rasche Sicherung - Flexibilität - Platzverhältnisse für Sicherung im L1 - permanente Ortsbrusterkundung - Vorausdrainage möglich (Erhöhung effektive Normalspannungen)
Nachteile		- Sicherung im L1 schwierig (Platzverhältnisse) - Flexibilität eingeschränkt	- Blindstollen nicht möglich - Maximale Länge begrenzt (Microtunnel) - Platzverhältnisse im Pilotstollen (keine Sicherung möglich) - doppelte Vortriebslänge durch vorgängigen Pilostollen	- Staubentwicklung (insbesondere ohne Bewässerung) - Leistung - Sicherung im L1 schwierig wegen Schild - eingeschränkte Mobilität	- Staubentwicklung (insbesondere ohne Bewässerung) - Leistung - Profilgenauigkeit (Unterschnitt problematisch)	- Profilgenauigkeit - Leistung - Gebirgsauflockerung
Ausbaukonzept [1]	A0 : Kopfschutz	Einbau Anker mit Bohrlafette oder händisch unter sehr beengten Platzverhältnissen; a > 2m)1	Einbau problemlos möglich; a > 1.5m	Einbau im L1* unter beengten Platzverhältnissen; Evt. Bohrlafette auf TSM montiert oder händisch bohren; im L1*: a > 0.5m oder bei Einsatz Schild im L2*: a > 8m (oder Rückzug TSM)	Einbau unter beengten Platzverhältnissen; Evt. Bohrlafette auf TSM montiert oder händisch bohren; L1*:a > 0.5m oder hinter TSM: a > 8m	Einbau problemlos möglich; a > 0.5m
	A1.1 : Kurzanker geneigt	Einbau unter sehr beengten Platzverhältnissen; 360° Ankerung nur bei main-beam-TBM möglich: a > 2m	Falls Ankerbohrgerät auf Nachläufer montiert muss 360°-Drehung gewährleistet werden; a > 1.5m	dito A0 (eher A1.2 anwenden)	dito A0 (eher A1.2 anwenden)	dito A0 (eher A1.2 anwenden)
	A1.2 : Kurzanker radial	nicht möglich im L1 und L2	im L1 nur mit speziell konzipiertem Nachläufer möglich oder ohne Nachläufer (mobiles Bohrgerät)	dito A0	dito A0	dito A0
	A1.3 : Langanker radial	nicht möglich im L1 und L2	im L1 nur mit speziell konzipiertem Nachläufer möglich oder ohne Nachläufer (mobiles Bohrgerät)	dito A0	dito A0	dito A0
	A2 : Faserspritzbeton	Einbau unter sehr beengten Platzverhältnissen; händisch ohne Manipulator spritzen: a > 2m	Einbau mit Manipulator problemlos möglich; a > 1.5m	Einbau im L1* unter beengten Platzverhältnissen; Evt. Spritzmanipulator auf TSM montiert oder händisch spritzen; im L1*: a > 0m oder bei Einsatz Schild im L2*: a > 8m	Einbau im L1* unter beengten Platzverhältnissen; Evt. Spritzmanipulator auf TSM montiert oder händisch spritzen; im L1*: a > 0m oder hinter TSM: a > 8m	Einbau problemlos möglich; a > 0m
	A3 : Stahlbögen	Einbau Bogensegmente (4 Stk) mit Errektor unter sehr beengten Platzverhältnissen; a > 2m	Einbau problemlos möglich; a > 1.5m	Einbau im L1* unter beengten Platzverhältnissen; Evt. Errektor auf TSM montiert oder händisch stellen; im L1*: a > 0.5m oder bei Einsatz Schild im L2*: a > 8m (oder Rückzug TSM)	Einbau im L1* unter beengten Platzverhältnissen; Evt. Errektor auf TSM montiert oder händisch stellen; im L1*: a > 0.5m	Einbau problemlos möglich; a > 0.5m
	A4 : Tübbinge	Einbau Tübbing im Schild mit Vorschub auf Tübbing; oder Einbau Tübbing im Doppelschild; oder direkt hinter Schild	Tübbingeinbau mit Errektor auf Nachläufer	Tübbingausbau im Schild	Für Tübbingausbau ungeeignet. Evtl. unabhängiger Errektor im L2	Für Tübbingausbau ungeeignet. Evtl. unabhängiger Errektor im L2
Maschinenkenndaten		- Installierte Leistung: ca. 800 kW (abhängig Hersteller) - Hublänge: 0.8 - 1.5 m - Konischer Bohrkopf - max. Vortriebsleistung ohne Sicherung: ca. 40 - 60 m/AT	- Pilotstollen im Microtunneling-Verfahren - max. Vortriebsleistung ohne Sicherung: 20 - 30 m/AT	- Installierte Leistung: min. 110 kW, eher > 150 kW - Hublänge: ca. 0.8 m - Längsschneidekopf - max. Vortriebsleistung ohne Sicherung: ca. 10 - 20 m/AT	- Installierte Leistung: min. 110 kW, eher > 150 kW - Längsschneidekopf - Gewicht TSM: min. ca. 25t - max. Vortriebsleistung ohne Sicherung: ca. 10 - 20 m/AT	- kleiner Bohrjumbo z.B. Boomer 104 Atlas Copco (Referenzbild) - max. Vortriebsleistung ohne Sicherung: 10 m/AT
Untervarianten		- geschildete TBM	- Horizontal-raise (In Entwicklung) (vgl. negative Erfahrungen beim Bau des RB-Microtunnel im Felslabor Mont Terri)	- unterschiedliche Schildtypen (ohne, teilweise, geschlossen)	- auf Gegebenheiten speziell konzipierte TSM	- auf Gegebenheiten speziell konzipierter Bohrjumbo
Referenzbild						

[1] *a = Abstand zur Ortsbrust für Sicherungseinbau*

Anhang 2 Mögliche Vortriebseinrichtungen

Anhang 2.1 ∅ 2.5 m TBM-Herrenknecht Grippermaschine mit flachem Bohrkopf und Zentrumsdisken, kurzem Schild sowie Steuerzylindern;

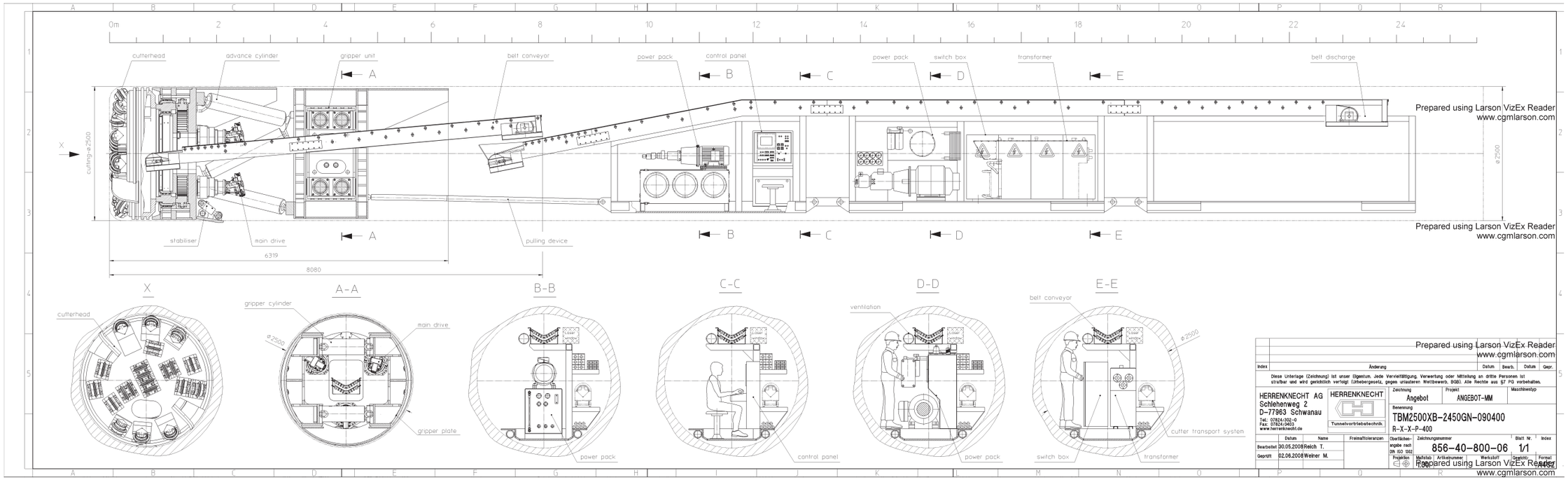
Anhang 2.2 ∅ 2.8 m TBM-Herrenknecht Grippermaschine mit flachem Bohrkopf und Zentrumsdisken, kurzem Schild sowie Steuerzylindern und vollständiger Nachläuferauslegung inkl. zentriertem Förderband und Ankerbohreinrichtung im Bohrkopfbereich;

Anhang 2.3 ∅ 2.5 m TBM-Herrenknecht Schildmaschine ohne Schildschwanz und Spreiztübbingeinbau ausserhalb Schild mit flachem Bohrkopf;

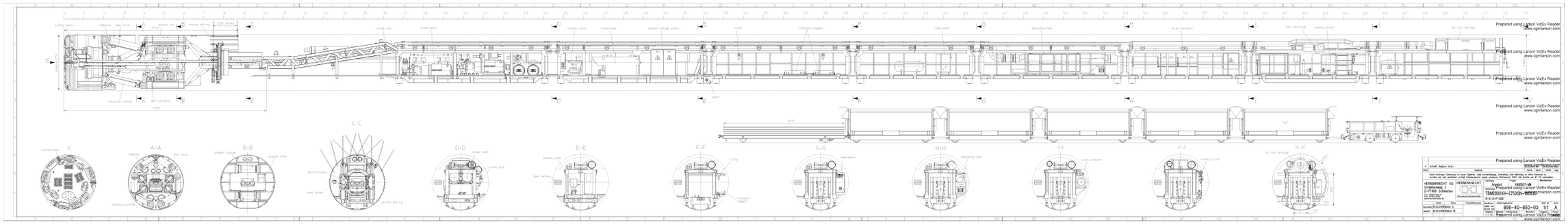
Anhang 2.4 ∅ 2.8 m offene TBM-Robbins Grippermaschine mit konischem Bohrkopf und ‚Main Beam' Konstruktion;

Anhang 2.5 ∅ 2.5 m TSM-Herrenknecht Grippermaschine mit Längsschrämkopf und kurzem Schild.

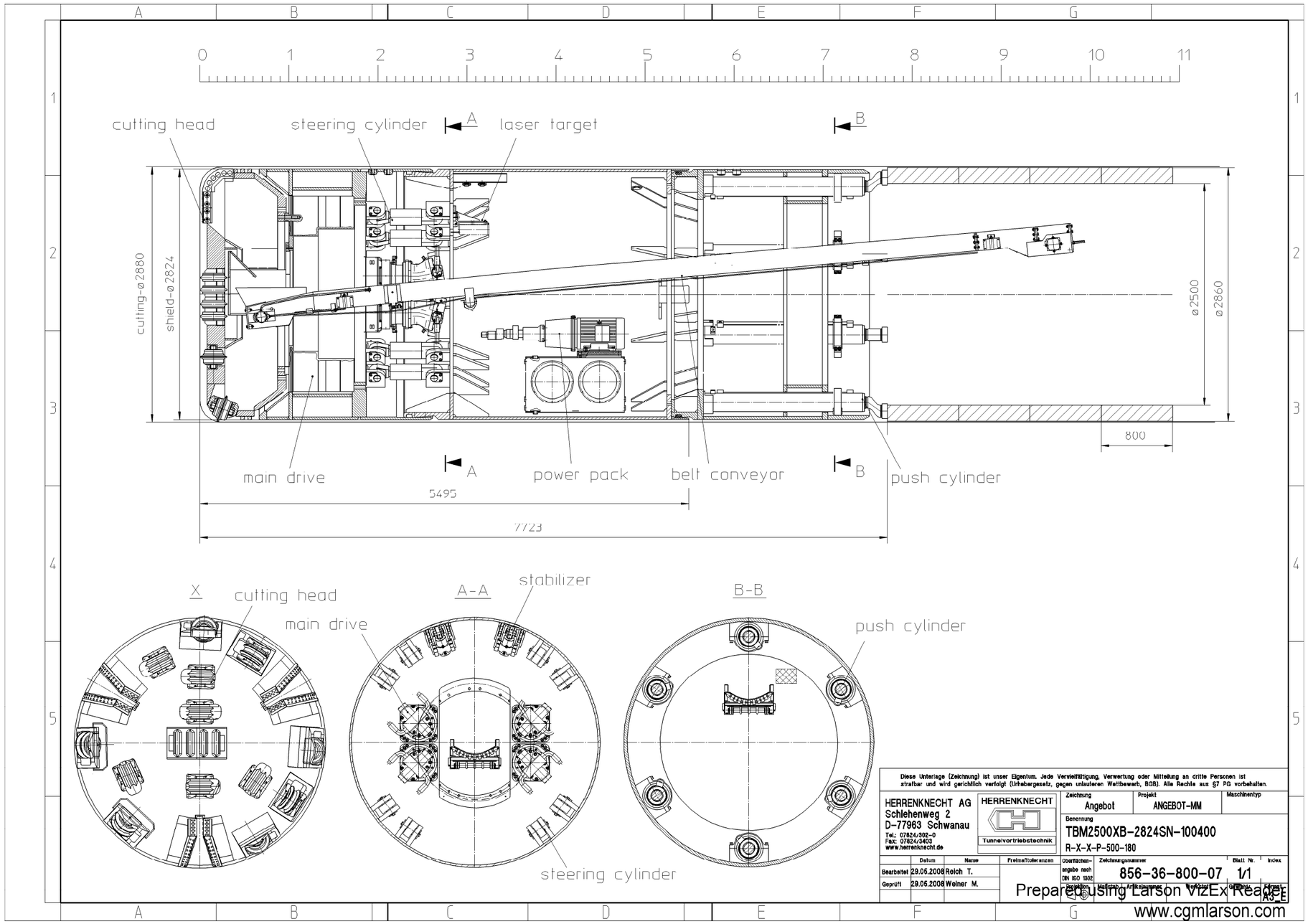
Anhang 2.1 2.5 m TBM-Herrenknecht Grippermaschine mit flachem Bohrkopf und Zentrumsdisken, kurzem Schild sowie Steuerzylindern;



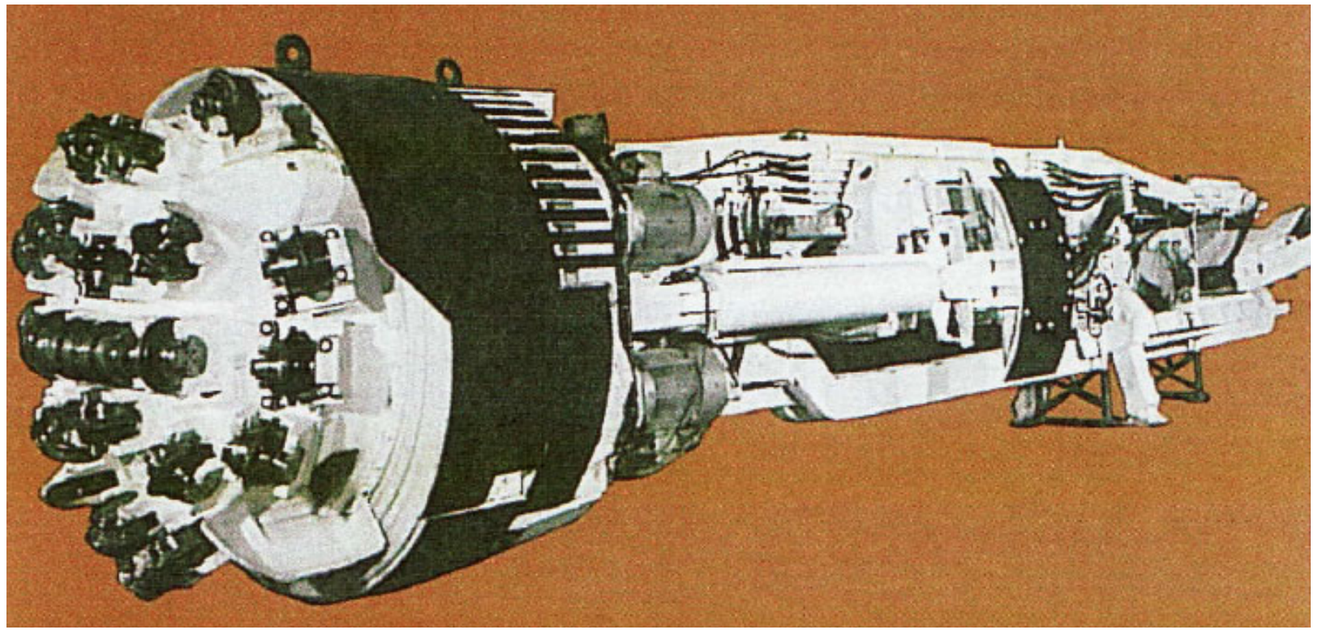
Anhang 2.2 2.8 m TBM-Herrenknecht Grippermaschine mit flachem Bohrkopf und Zentrumsdisken, kurzem Schild sowie Steuerzylindern und vollständiger Nachläuferauslegung inkl. zentriertem Förderband und Ankerbohreinrichtung im Bohrkopfbereich;



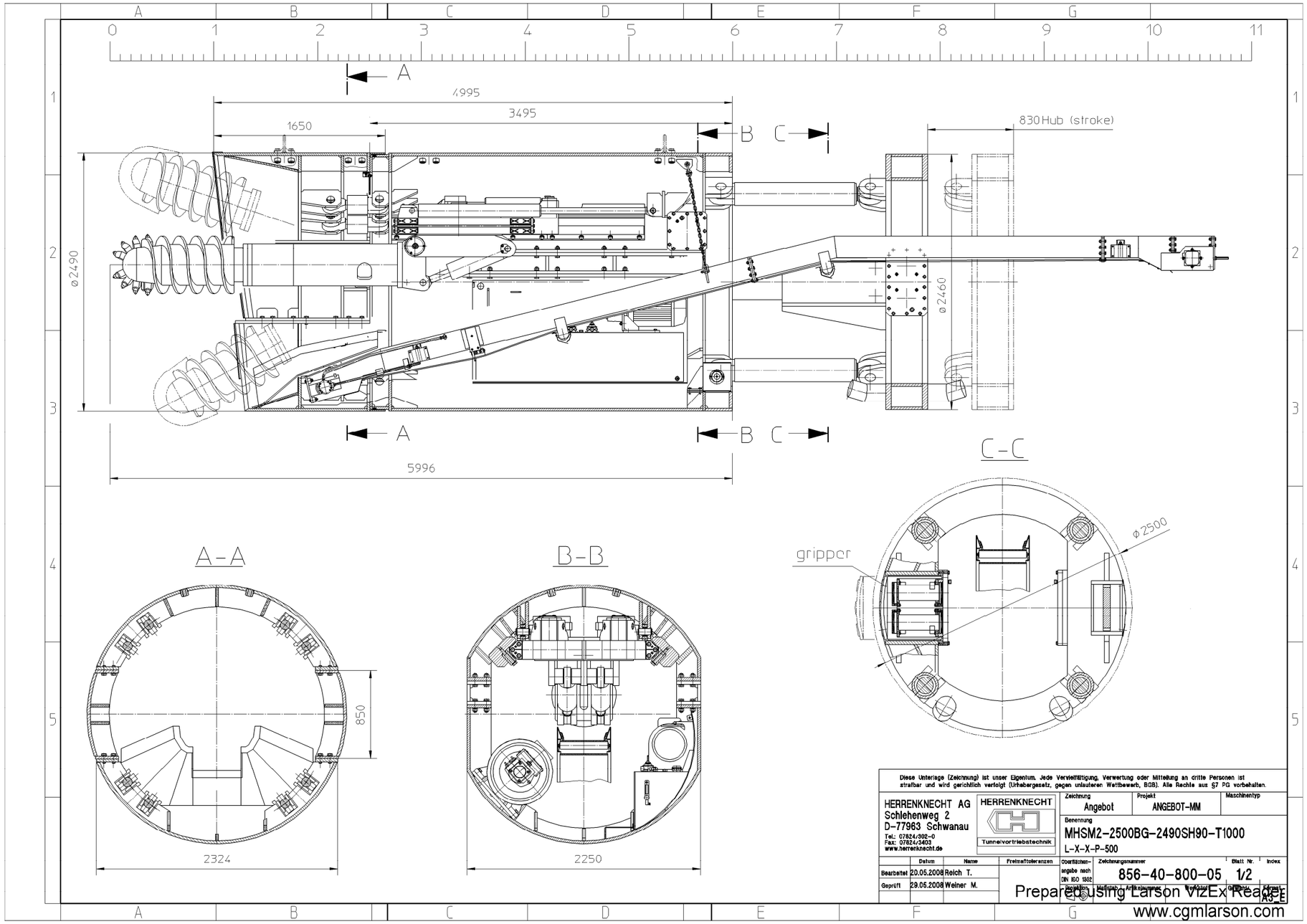
Anhang 2.3 ∅ 2.5 m TBM-Herrenknecht Schildmaschine ohne Schildschwanz und Spreiztübbingeinbau ausserhalb Schild mit flachem Bohrkopf



Anhang 2.4 ∅ 2.8 m offene TBM-Robbins Grippermaschine mit konischem Bohrkopf und ‚Main Beam' Konstruktion



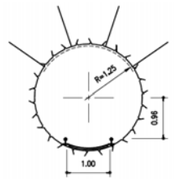
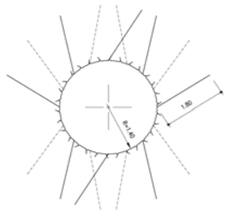
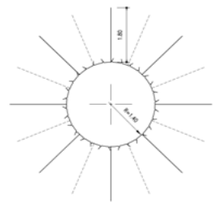
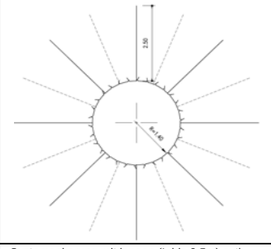
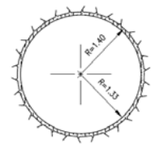
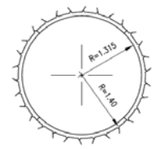
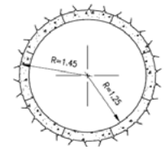
Anhang 2.5 ∅ 2.5 m TSM-Herrenknecht Grippermaschine mit Längsschrämkopf und kurzem Schild



Anhang 3 Ausbaukonzepte

(vgl. nachfolgende Tabelle)

Ausbaukonzepte

Ausbautypen		A0	A1.1	A1.2	A1.3	A2	A3	A4
Bezeichnung		Konzept Entsorgungsnachweis 2002: Arbeitsschutz (kein stabilitätsbedingter Einbau)	Systemankerung: Kurzanker geneigt	Systemankerung: Kurzanker radial	Systemankerung: Langanker radial	Spritzbeton mit Stahlfasern [2]	Stahlträger	Tübbingausbau [2]
Prinzipienskizze								
Beschrieb		Kopfschutz mit Netz und Kurzankern	Systemankerung mit kurzen sofortwirkenden Ankern (L bis 1.8m) mit fest installierter Bohrlafette geneigt gebohrt	Systemankerung mit kurzen Ankern (L bis 1.5m) mit mobiler Bohrlafette oder händisch gebohrt	Systemankerung mit langen (L bis 2.5m) evtl. gekoppelten Ankern (L>2.5m) mit mobiler Bohrlafette oder händisch gebohrt	Spritzbeton (dry mix) LPC	Stahlbogen-Ringausbau mit TH-Profil , evtl. mit Reibrohranker und/oder Spritzbeton kombiniert	Tübbingausbau bestehend aus mehreren Segmenten und Schlussstein
Kompatibilität mit Vortriebsmethode	V1:.1 TBM	geeignet	Einsatz möglich	ungeeignet	ungeeignet	Einsatz möglich	geeignet	Einsatz möglich
	V1.2: TBE	geeignet	Einsatz möglich	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	Einsatz möglich
	V2.1: TSM (Gripper)	geeignet	Einsatz möglich	Einsatz möglich	Einsatz möglich	Einsatz möglich	Einsatz möglich	Einsatz möglich
	V2.2: TSM (Mobil)	geeignet	Einsatz möglich	geeignet	geeignet	geeignet	Einsatz möglich	ungeeignet
	V3: Sprengvortrieb	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	Einsatz möglich	ungeeignet
Sicherungsmittel		Kopfschutznetz befestigt mit Kurzankern. Kein wesentlicher stützender Beitrag, verhindert Niederbruch aus Firste ('Sargdeckel')	8 Reibrohranker (Swellex) oder Stabanker pro LM; L=1.8m	8 Reibrohranker (Swellex) oder Stabanker pro LM; L=1.8m	8 Stabanker vermörtelt (DYWIDAG) pro LM; L=2.5m	Spritzbeton mit Stahlfasern; d=7cm	Stahlbogen-Ringausbau mit TH-Profil	Tübbingring hinter Bohrkopf
Einbau unmittelbar hinter Ortsbrust bzw. Bohrkopf (L1)		4 Kurze Felsanker L=1m im First (4 Stk /m) / Armierungsnetz K188 (Kopfschutz) / kein wesentlicher stützender Beitrag, verhindert Niederbruch aus Firste ('Sargdeckel')	8 Reibrohranker pro LM (Swellex Mn16, Bruchlast 160 kN, Fliessgrenze 120 kN, S355 JR) / L = 1.8 m / radial im ganzen Umfang / geneigt gebohrt / Längsabstand auf Hub-Länge TVM abgestimmt.	8 Reibrohranker pro LM (Swellex Mn16, Bruchlast 160 kN, Fliessgrenze 120 kN, S355 JR) / L = 1.8 m / radial im ganzen Umfang / zentrisch gebohrt.	8 Stabanker pro LM vermörtelt (DYWIDAG) Bruchlast 270 kN, Fliessgrenze 246 kN) / L = 2.5 m / d=25 mm / radial im ganzen Umfang, evtl. gemufft.	Spritzbeton (dry mix) LPC mit Stahlfasern >40 kg/m3, d=7 cm	1 Stahlbogen-Ringausbau pro LM (TH-Profil 16/48) direkt hinter Bohrkopf oder nahe Ortsbrust.	TBM in kurzem Schild mit der Möglichkeit Tübbingringausbau im Schild, hinter Schild oder hinter Gripper. Tübbingringlänge = Vorschublänge (ca.1m), Dicke 0.2m. Vorspannung des Tübbingringes mit Gripper und Schiften des Spaltes.
Einbau hinter Maschinenbereich (L3)		keine Sicherung	Bei Bedarf lokal Spritzbeton LPC / Dicke ca. 7 cm / 40 kg/m3 Stahlfasern	Bei Bedarf lokal Spritzbeton LPC / Dicke ca. 7 cm / 40 kg/m3 Stahlfasern	Bei Bedarf lokal Spritzbeton LPC / Dicke ca. 7 cm / 40 kg/m3 Stahlfasern oder Armierungsnetz	Bei Bedarf Erhöhung Spritzbetondicke	Bei Bedarf zwischen Bögen Spritzbeton LPC / Dicke ca. 7 cm / 40 kg/m3 Stahlfasern o. Armierungsnetz	-
Kombinationsmöglichkeiten zur Erhöhung des Ausbauwiderstand		Netzeinbau bei A1, A2 und A3 zur Erhöhung der Arbeitssicherheit möglich	A2, A3	A2, A3	A2, A3	A1, A3	A1, A2	keine Kombination möglich
Vorteile		- wenig Baumaterial - geringe Anforderungen an Tragvermögen der Sicherungsmittel (alternative Materialien möglich)	- sofortige Sicherung kleiner Kluftkörper - Bewehrung Gebirge (Gewölbe- /Balkenbildung) - postive Beeinflussung Spannungsumlagerung	- sofortige Sicherung kleiner Kluftkörper (nur bei Reibrohranker) - Bewehrung Gebirge (Gewölbe- /Balkenbildung) - postive Beeinflussung Spannungsumlagerung	- sofortige Sicherung grosser Kluftkörper (nur bei Reibrohranker) - Bewehrung Gebirge (Gewölbe- /Balkenbildung) - postive Beeinflussung Spannungsumlagerung	- gute Bettung - Variabler Ausbauwiderstand (Dicke, Fasergehalt) - flächige Stützung gegen Gebirgsauflockerung	- gutes Handling (Segmentgewicht ca. 40kg) - sofortige Stützwirkung und Ringschluss - Hohe Duktilität bzw. Arbeitsvermögen - Variabler Ausbauwiderstand (Abstand, Profiltyp, -grösse)	- industrieller Ausbau - kontrollierte Qualität - Arbeitshygiene - hoher Ausbauwiderstand
Nachteile		keine wesentliche gebirgsstützende Wirkung	- zentrisches Bohren unmöglich - max. Länge Anker ohne Kupplung ca. 1.8m - Scherbeanspruchung Anker (GFK ungeeignet) - keine flächige Stützung - Dauerhaftigkeit Reibrohranker	- keine flächige Stützung - Dauerhaftigkeit Reibrohranker	- keine flächige Stützung - bei L > 2.5m sind koppelbare Stabanker einzusetzen, was ein grösseres Bohrloch mit mehr Injektsionsvolumen bedingt	- Qualitätsicherung schwierig aufgrund Platzverhältnisse - Verschmutzung TVM - Arbeitshygien - keine sofortige Stützung durch zeitliche Entwicklung Festigkeit - Überbeanspruchung durch lokalisierte Gebirgsdehnung - hohe Korrosionsoberfläche (12m2/m')	- Bettung insbesonere bei TSM und SPV - evt. Längsaussteifung (z.B. Spritzbeton) nötig - Behinderung durch Bögen im Sohlbereich	- Kontrolle Ringspalt - grosses Baumetrialvolumen - Bettung
Alternativen / Untervarianten		- GFK-Kurzanker - Messing-Kurzanker - Drahtnetz aus Nichteisen Materialien	- GFK-Anker mit Kunststoffankerplatte - Kevlar-Anker - Seilanker (bei grösseren Längen) - evtl. Messinganker - evtl. Armierungsnetz in Firste (Kopfschutz)	- GFK-Anker mit Kunststoffankerplatte - Kevlar-Anker - Seilanker (bei grösseren Längen) - evtl. Messinganker - evtl. Armierungsnetz in Firste (Kopfschutz)	- bei L>2.5m gekuppelte Anker - GFK-Anker mit Kunststoffankerplatte - Kevlar-Anker - Seilanker (bei grösseren Längen) - evtl. Messinganker - evtl. Armierungsnetz in Firste (Kopfschutz)	- Bewehrungsnetz anstelle Fasern - alternative Fasertypen	alternative Stahlprofile mit kleinerem Oberflächen/Widerstandsverhältnis	Mögliche Tübbingtypen: - vorgefertigte Betonelemente - Naturstein - Steinzeug - Keramik
Offene Punkte		Rückbau Netze kurz vor Einlagerung; alternative Materialien (Anker, Injektionsgut, Kopfschutznetz)	alternative Materialien (Anker, Injektionsgut)	alternative Materialien (Anker, Injektionsgut)	alternative Materialien (Anker, Injektionsgut)			Montage der Tübbinge ohne Ringspalt (Vorspannen (durch Spreizen) Tübbingring zur Vermeidung Ringspalt); Bettung

Stahlmasse [1]	[kg/m]	32	52	52	67	25.0 (Stahlfasern) / 43.0 (Armierungsnetz)	169	
Korrosionsoberfläche [1]	[m2/m']	1.6	4.1 (Reibrohranker) / 1.5 (Stahl-Stabanker)	4.1 (Reibrohranker) / 1.5 (Stahl-Stabanker)	2.0	37.3 (Stahlfasern) / 3.6 (Armierungsnetz)	4.5	
Ausbauwiderstand / Stützende Wirkung [2]		kein bis gering	mittel	mittel	mittel bis gross	mittel bis gross	gross	gross bis sehr gross

[1] Grundlage Sicherheitsanalyse Konzept EN 2002: Stahlmasse: 170 kg/m; Korrosionsoberfläche: 5.7 m^2/m, zulässige Korrosionsoberfläche 9.0 m^2/m';
[2] Ausbaukonzepte A2, A4: ca. 2 m lange unverkleidete Abschnitte alle ca. 75 m (alle 10 ELB)