



Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit



Verwertung von Tunnelausbruch

Christian Stefan Kirchtog, BSc

Oktober 2021

Thema

Verwertung von Tunnelausbruch

**Für den Vortrieb eingebrachte Materialien und deren
Auswirkungen auf die Verwertung**

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfsmittel bedient habe.

19.10.2021

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Auflistung der im Tunnelbau eingebrachten Sicherungs- und Stützmittel, Sprengstoffe, Injektionsmaterialien und Abgase im konventionellen Vortrieb und der verwendeten Medien der Ortsbruststützung beim maschinellen Vortrieb zu erstellen und deren Auswirkungen auf die Verwertung und/oder Entsorgung des Tunnelausbruches aufzuzeigen.

Mithilfe einer Literaturrecherche wurden die einzelnen Materialien, die für die jeweiligen Vortriebsverfahren benötigt werden, identifiziert. Den Abschluss des ersten Abschnittes bildet eine Tabelle, die unkompliziert aufzeigt, welches Material, bei welchem Vortriebsverfahren eingesetzt wird.

Im zweiten Abschnitt wird kurz auf die in Österreich rechtliche Situation bezüglich Verwertung und/oder Entsorgung von Ausbruchmaterial eingegangen.

Im dritten Abschnitt wird auf die Materialien, die im Tunnelvortrieb Verwendung finden, näher eingegangen. Die Herstellungsprozesse der Materialien, sowie die genaue Zusammensetzung der einzelnen Stoffe werden aufgezeigt. Der Zweck der verwendeten Materialien im Vortriebsverfahren und die Auswirkungen der einzelnen Materialien auf die Wiederverwertung des Tunnelausbruches werden erläutert.

Für die beiden realen Projekte: die Neubaustrecke (NBS) Schaftenau-Radfeld und der Future Circular Collider (FCC) werden, anhand der bereits geplanten und möglichen Vortriebsverfahren, aus der im Kapitel 2.5 erstellten Tabelle, die zum Einsatz kommenden Materialien entnommen. Die Auswirkungen der eingebrachten Materialien bei der Wiederverwertung des Tunnelausbruches werden erörtert. Die daraus abzuleitenden Maßnahmen werden festgehalten.

Die gesammelten Daten über die Sicherungs-, Stützmittel, etc. und ihre Auswirkungen werden in eine Excel-Tabelle übertragen. Diese Excel-Tabelle soll die Excel-Datei, die von Herrn Johannes Lehn (Masterarbeit) erstellt wird, vervollständigen. Diese Excel-Datei zeigt dann durch die Eingabe der Korngröße, der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung und der Vortriebsmethode die möglichen Verwertungsmöglichkeiten von Tunnelausbruch an.

Abstract

The aim of this thesis is to create a list of the securing and support materials, explosives, injection materials and exhaust gases used in conventional tunnelling and the materials used for face support during mechanical tunnelling, as well as to show the effects on the recovery and/or disposal of the tunnel excavation.

With the help of a literature search, the individual materials that are used for the tunnelling process have been identified. The conclusion of the first section is a table that shows in an uncomplicated manner which material is used in which tunnelling method.

The second section briefly describes the legal situation of excavated material in Austria.

In the third section, the materials that are used in tunnelling are discussed in more detail. The manufacturing processes of the materials as well as the exact composition of the individual substances are shown. The purpose of the use in the tunnelling process and the effects of the individual materials on the reuse of the tunnel excavation material are explained.

In two real projects on the new Schaftenau-Radfeld line and the Future Circular Collider (FCC), the materials to be used are selected from the table created in chapter 2.5 using the planned and possible tunnelling methods. The effects of the materials on recycling are discussed. The measures to be derived from this are recorded.

The data collected about the securing and support materials and their effects are transferred to an Excel-table. This Excel-table should complete the Excel-file created by Mr. Johannes Lehn (master's thesis). By entering the grain size, the chemical and mineralogical composition and the tunnelling method, this Excel-file shows the possible reuse options for tunnel excavations.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Allen bedanken, die mir bei der Erstellung der Masterarbeit zur Seite gestanden sind. Zunächst gilt mein aufrichtiger Dank meinem Betreuer Herrn Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. mont. Robert Galler, der mich auf das Thema aufmerksam gemacht hat und mir mit Rat und Tat beiseite stand. Der größte Dank geht an meine Familie, die mich während des ganzen Studiums zu hundert Prozent unterstützte. Mein besonderer Dank gilt meiner Mutter Karin Kirchttag, die die Arbeit Korrektur las und meinem Vater Georg Kirchttag, der mir mit hilfreichen Ideen und Kontakten weiterhalf. Des Weiteren möchte ich mich bei all jenen bedanken, die sich Zeit genommen haben und mir durch ihr Fachwissen bei diesem Thema weiterhelfen konnten.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	I
Kurzfassung.....	II
Abstract	II
Danksagung.....	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
1. Aufgabenstellung	1
2. Grundlagen.....	2
2.1. Offene Bauweise	2
2.1.1. Anwendungsbereich	2
2.1.2. Herstellung	2
2.1.3. Verwendete Materialien	2
2.1.4. Mengen	2
2.2. Geschlossene Bauweise	2
2.3. Zyklischer Vortrieb.....	3
2.3.1. Bohren und Sprengen.....	3
2.3.2. Mechanischer Ausbruch (Baggervortrieb)	4
2.4. Kontinuierlicher Vortrieb.....	5
2.4.1. Ablauf zur Ermittlung der geeigneten Tunnelbohrmaschine	5
2.4.2. Gripper-TBM	6
2.4.3. Einfachschild	7
2.4.4. Doppelschildmaschine	8
2.4.5. Flüssigkeitsschildmaschine (Slurry Shield, SLS)	8
2.4.6. Erddruckschilde (Earth Pressure Balance Shield, EPB)	9
2.4.7. Einsatzbereiche von Slurry- und EPB-Maschinen	10
2.4.8. Variable-Density-Schild (VDS)	10
2.4.9. Hybrid-/Multimodeschilde (HYS)	11
2.5. Zuordnung der Materialien zu den Vortriebsverfahren	11
2.6. Kornform und Korngrößenverteilung von Ausbruchmaterial.....	12
3. Gesetzliche Regelungen	13
3.1. EU-Abfallrahmenrichtlinie	13
3.2. Abfallwirtschaftsgesetz (AWG)	14
3.2.1. Begriffe im Abfallwirtschaftsgesetz	14
3.2.2. Pflichten des Abfallbesitzers.....	14
3.3. Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP)	15
3.4. Deponieverordnung (DVO).....	19
3.4.1. Ablauf der Charakterisierung eines Tunnelabschnittes	19
3.4.2. Parameter in der Deponieverordnung	19
3.5. ÖBV-Richtlinie (Verwendung von Tunnelausbruch).....	21
3.6. Altlastensanierungsgesetz.....	23
4. Im Tunnelbau eingesetzte Materialien	24
4.1. Spritzbeton	24
4.1.1. Verarbeitung von Spritzbeton	24
4.1.2. Spritzbetontechnologie.....	24
4.1.3. Zement.....	24
4.1.4. Wasser	24

4.1.5.	Zusatzstoffe.....	24
4.1.6.	Zusatzmittel.....	26
4.1.7.	Interaktion von Spritzbeton mit Ausbruchmaterial.....	27
4.2.	Bentonit-Suspension.....	29
4.2.1.	Interaktion Bentonit-Suspension mit Ausbruchmaterial	29
4.2.2.	Separationsanlage	30
4.2.3.	Wiederverwertung von Ausbruchmaterial einer Slurry-TBM	30
4.3.	Ringspaltverfüllung.....	31
4.3.1.	Perlkies	31
4.3.2.	Ein-Komponenten-Mörtel.....	31
4.3.3.	Zwei-Komponenten-Mörtel.....	32
4.3.4.	Interaktion von Ringspaltmaterial mit dem Ausbruchmaterial	32
4.3.5.	Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung von Ausbruchmaterial	32
4.4.	Anker	33
4.4.1.	Verwendete Materialien bei Anker.....	33
4.4.2.	Verwendete Materialien beim Verbund	33
4.4.4.	Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung von Ausbruchmaterial	34
4.5.	Injektionen	35
4.5.1.	Injektionen als Abdichtung	36
4.5.2.	Injektionen für die offene Bauweise.....	37
4.5.3.	Injektionen zur Verfestigung.....	37
4.5.5.	Interaktion mit Ausbruchmaterial	39
4.5.6.	Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung von Ausbruchmaterial	40
4.6.	Düsenstrahlverfahren / HDI (Hochdruckinjektionen).....	41
4.6.1.	Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung von Ausbruchmaterial	41
4.7.	Bodenkonditionierungsmittel	42
4.7.1.	Schäume	42
4.7.2.	Anti-Ton-Additive	45
4.7.3.	Polymere.....	45
4.7.4.	Wasser	45
4.7.5.	Feinstoffsuspension.....	45
4.7.6.	Auswahl der Bodenkonditionierungsmittel	46
4.7.7.	Bestimmung von Tensid- und Polymer-Gehalten (chemische Analysen)	47
4.7.8.	Regelung für Tenside und Polymere in Gesetzen und Verordnungen.....	47
4.7.9.	Wassergefährdungsklasse (WGK).....	47
4.7.10.	Methoden zur Prüfung der Toxizität	47
4.7.11.	Prüfungsmethoden für die biologische Endabbaubarkeit	50
4.7.12.	Feststellung der biologische Abbaubarkeit in Feldversuchen.....	52
4.7.13.	Bioaugmentation von Tensiden.....	53
4.7.14.	Änderung der Bodeneigenschaften durch Bodenkonditionierungsmittel	55
4.7.15.	Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung von Ausbruchmaterial	55
4.8.	Stickoxide	56
4.8.1.	Verbrennung von fossilem Brennstoff	56
4.9.	Kohlenwasserstoffe	58
4.10.	Sprengstoffe	59
4.10.1.	Allgemeines	59
4.10.2.	Sprengstoffarten.....	60
4.10.3.	Umweltauswirkungen.....	62

4.10.4.	Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung.....	65
5.	Neubaustrecke Schaftenau-Knoten Radfeld.....	66
5.1.	Allgemeines	66
5.2.	Geologie.....	68
5.3.	Verwertung des Tunnelausbruches.....	71
6.	FCC (Future Circular Collider).....	73
6.1.	Allgemeines	73
6.2.	Geologie.....	73
6.3.	Chemische und geomechanische Untersuchung der Kernbohrungen	75
6.4.	Vortriebsmethoden	78
6.5.	Verwertungsmöglichkeiten	78
6.6.	Auswirkungen der verschiedenen Vortriebsmöglichkeiten.....	79
7.	Excel-Sheet.....	80
7.1.	Aufgabe des Excel-Sheets.....	80
7.2.	Aufgabenstellung.....	80
7.3.	Problemfelder.....	80
7.4.	Bedienungserklärung der Excel-Tabelle	81
8.	Fazit.....	82
8.1.	Allgemeines	82
8.2.	Offene Bauweise.....	82
8.3.	Konventionelles Vortriebsverfahren	83
8.4.	Injektionen	84
8.5.	Maschinelles Vortriebsverfahren	84
8.6.	Projekte	85
8.6.1.	NBS Schaftenau Knoten Radfeld.....	85
8.6.2.	Future Circular Collider (FCC).....	86
8.7.	Ausblick.....	86
9.	Abbildungsverzeichnis	87
10.	Tabellenverzeichnis.....	89
11.	Literaturverzeichnis	90

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
ALSAG	Altlastensanierungsgesetz	
ANS	Anionische Sulfate	
ASE	beschleunigte Lösemittelextraktion / accelerated solvent extraction	
ASR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion / alkali-silica reaction	
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz	
AwSV	Verordnung über Anlagen im Umgang mit wassergefährdenden Stoffen	
BAWP	Bundesabfallwirtschaftsplan	
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie	
BOD	biologischer Sauerstoffbedarf / biochemical oxygen demand	
C	Konzentration	[%]
CMC	Carboxymethylcellulose	
COD	chemische Sauerstoffbedarf / chemical oxygen demand	
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen	
DE	Beseitigung/Deponierung	
DOC	gelöster organischer Kohlenstoff / dissolved organic carbon	
DVO	Deponieverordnung	
EC ₅₀	mittlere effektive Konzentration	
EPB	Erddruckschild / earth pressure balance shield	
F.E.R.	Schaumausdehnungsverhältnis / foam expansion ratio	[-]
F.I.R.	Schauminjektionsverhältnis / foam injection ratio	[-]
FCC	Future Circular Collider	
FET	Fish Embryo Acute Toxicity	
G	gefährliche Abfälle	
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff	
HDI	Hochdruckinjektionen	
HG	hydraulisch gebunden	
HU	hydraulisch ungebunden	
HWS	Hochwasserschutz	
Hydro	Flüssigkeitsschildmaschine	
HYS	Hybrid Schildmaschine	
IP	industrielle Produktion	
KW-Index	Kohlenwasserstoff-Index	
LC ₅₀	mittlere letale Konzentration	
LD ₅₀	mittlere letale Dosis	
MAE	Mikrowellenunterstützte Extraktion / microwave-assisted extraction	
NATM	Neue Österreichische Tunnelbaumethode / new Austrian tunnelling method	
NBS	Neubaustrecke	
NO _x	Stickoxide	
ÖBV	Österreichische Bautechnik Vereinigung	
PLE	Lösungsmittelextraktion unter Druck / pressurized liquid extraction	
S.I.R.	suspension injection ratio	[-]
SDA	Sicherheitsdatenblatt / safety data sheet	

Symbol	Bezeichnung	Einheit
SLES	sodium lauryl ether sulphate	
SLS	Flüssigkeitsschildmaschine	
TBM	Tunnelbohrmaschine	
TBM-S	Tunnelbohrmaschine Einfachschild	
TDS	Technisches Datenblatt / technical data sheet	
THOD	theoretischer Sauerstoffbedarf /theoretical oxygen demand	
TM	Trockenmasse	
TOC	gesamter organischer Kohlenstoff / total organic carbon	
VDS	Variable-Density-Schilde	
WGK	Wassergefährdungsklasse	

1. Aufgabenstellung

Im Tunnelbau bekommt die Verwertung von Tunnelausbruch eine immer größere Bedeutung. Aufgrund, der sich ständig verschärfenden umwelttechnischen Regelungen ist eine möglichst vollständige Verwertung des Tunnelausbruchmaterials anzustreben. Die natürlichen Ressourcen sollen einem sinnvollen Zweck zugeführt werden. Bis zum heutigen Tag wird in den Gesetzen (Abfallwirtschaftsgesetz) Tunnelausbruchmaterial als Bodenaushubmaterial und das wiederum als Abfall angesehen. In den Ländern Schweiz und Österreich ist der Platz für große Deponieflächen nur mehr eingeschränkt vorhanden und dies führt bei der Umsetzung zu erheblichen Problemen (Genehmigung, Kosten, etc.). Daher soll Tunnelausbruchmaterial einem Aufbereitungskreislauf zugeführt werden, um bestehende Ressourcen zu schonen und eine Deponierung zu vermeiden.

Diese Masterarbeit widmet sich der Frage, welche Auswirkungen eingebrachte Stoffe, wie Sicherungs- und Stützmittel, Sprengstoffe, Injektionsmaterialien und Abgase im konventionellen Vortrieb und die verwendeten Medien der Ortsbruststützung beim maschinellen Vortrieb, auf die Verwertung und/oder auf die Entsorgung des Tunnelausbruches haben.

Ein Großteil der Untersuchung erfolgt mithilfe einer Literaturrecherche der vorhandenen Fachliteratur. Anhand der Datenbanken (Science Direct, Web of Science, Google Scholar, Wiley Online Library) werden die entsprechenden Themenbereiche recherchiert. Durch die persönliche Befragung von Fachexperten werden die einzelnen Sachgebiete vertieft.

Die erste Aufgabe ist die verschiedenen Materialien, die zur Anwendung kommen, zu identifizieren und ihre Aufgabe im jeweiligen Verfahren zu erklären.

Zweitens wird die derzeit gültige Rechtslage in Österreich bezüglich Tunnelausbruch erörtert.

Die dritte Aufgabe ist die chemische Zusammensetzung der einzelnen Materialien durch Literaturrecherche und Befragungen zu klären und die Auswirkung der eingebrachten Materialien bei der Verwertung und/oder die Entsorgung des Tunnelausbruches aufzuzeigen. Zusätzlich werden die beiden Projekte, die NBS Schaftenau-Radfeld und der Future Circular Collider (FCC) als reale Beispiele herangezogen. Anhand dieser Projekte soll aufgezeigt werden, welche Auswirkungen auf das Ausbruchmaterial zu erwarten sind.

Abschließend erfolgt die Erstellung einer Excel-Tabelle. Diese Tabelle soll der Vervollständigung der Excel-Datei von Herrn Johannes Lenes dienen. Mithilfe der Excel-Datei soll aufgrund der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung, der geomechanischen und geophysikalischen Eigenschaften und der Korngröße die möglichen Verwendungszwecke von Tunnelausbruchmaterial aufgezeigt werden. Die zugefügte Excel-Tabelle soll den Einfluss der verschiedenen Vortriebsmethoden bei der Wiederverwertung ergänzen.

2. Grundlagen

Im Tunnelbau wird zwischen offener und geschlossener Bauweise unterschieden.

2.1. Offene Bauweise

2.1.1. Anwendungsbereich

Die offene Bauweise wird bei einer sehr seicht liegenden Tunnelachse und schwierigen geologischen Verhältnissen, die eine bergmännische Herstellung unwirtschaftlich werden lassen, herangezogen. Nachteilig für dieses Verfahren sind der enorme Platzbedarf, sowie das erhöhte Ausbruchvolumen.

2.1.2. Herstellung

Die Herstellung der Baugrube erfolgt entweder durch eine geböschte Baugrube (großer Platzbedarf) oder durch einen Baugrubenverbau. Die Böschung eines Baugrubenverbaus wird durch Bohrpfahlwände, Schlitzwände, Spundwände, Trägerbohlenwände oder Düsenstrahlwände als Seitenwände gesichert.

Nach der Abteufung der Seitenwände beginnt der Aushubprozess. Bei geotechnischer Notwendigkeit werden Anker zur Sicherung der Baugrubenwände eingebracht. Die Wasserhaltung, wenn notwendig, erfolgt entweder durch Pumpen, die den Grundwasserspiegel senken, oder durch die Abdichtung der Sohl- und Seitenwände der Baugrube. Die Gefahr des Aufschwimmens muss berücksichtigt werden. Nach der Fertigstellung der Baugrube kann der Tunnel, wie im Hochbau durch Betonier- und Schalungsarbeiten hergestellt werden. Nach dem Betonieren der Tunnelröhren wird die Baugrube hinterfüllt.

2.1.3. Verwendete Materialien

Die verwendeten Materialien zur Herstellung der Seitenwände und Sohle können je nach Verfahren unterschiedlich sein. Wenn notwendig, werden Injektionen zur Abdichtung der Baugrubensohle verwendet (siehe dazu Kapitel 4.5). Bei der Herstellung von Bohrpfahlwänden kommt eine Bentonit-Suspension zum Einsatz (siehe dazu Kapitel 4.2).

2.1.4. Mengen

Bei der offenen Bauweise werden maximal die Randbereiche, in der zur Sicherung Injektionen erfolgen, mit Ausbruchmaterial vermischt. Dieser Aushub muss abgesondert gelagert und beprobt werden, um die Wiederverwertbarkeit festzulegen. Der Großteil des Aushubes erfährt keine Veränderung, damit bleibt die Wiederverwertungsmöglichkeit erhalten, die aufgrund der ursprünglichen Verhältnisse gegeben sind.

2.2. Geschlossene Bauweise

Die Vortriebsarten der geschlossenen Bauweise lassen sich in zwei Gruppen, dem zyklischen (konventionellen) Vortrieb und dem kontinuierlichen (maschinellen) Vortrieb, einteilen. Die Wahl des Verfahrens wird von Projekt zu Projekt individuell entschieden. Wichtige Faktoren für die Entscheidung sind:

- Geologie (geomechanische Eigenschaften)
- Tunnellänge
- Infrastruktur im Baustellenumfeld
- Platzverhältnisse
- Geometrie des Ausbruches.

Im Allgemeinen steht fest, dass je homogener die geologischen Verhältnisse sind und je länger der Tunnel ist, desto öfter wird der kontinuierliche Vortrieb gewählt, wenn die anderen Voraussetzungen auch eine Verwendung zulassen.

2.3. Zyklischer Vortrieb

Die Einteilung der zyklischen Vortriebe erfolgt nach den Lösungsarten:

- Bohren und Sprengen
- mechanischer Ausbruch (Bagger, Teilschnittmaschine).

Die Ausbruchart wird auf die unterschiedliche Geologie abgestimmt. Die Sprengtechnik kommt bei härteren Gebirgen, mechanischer Ausbruch bei Böden mit geringer Festigkeit zur Anwendung.

2.3.1. Bohren und Sprengen

2.3.1.1. Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich von Bohren und Sprengen liegt bei Fels mit hoher und mittlerer Festigkeit. Unterschieden werden kann an der Ausbruchgeometrie zwischen Vollausbuch und Teilausbuch. Am häufigsten verwendet wird die Teilquerschnittseinteilung mit Kalotte, Strosse und Sohle. Bei der Hohlraumgeometrie sind durch den Sprengvortrieb keine Einschränkungen vorgegeben.

2.3.1.2. Herstellungsablauf

Der zyklische Ablauf beim Sprengvortrieb stellt sich wie in Abbildung 1 dar.

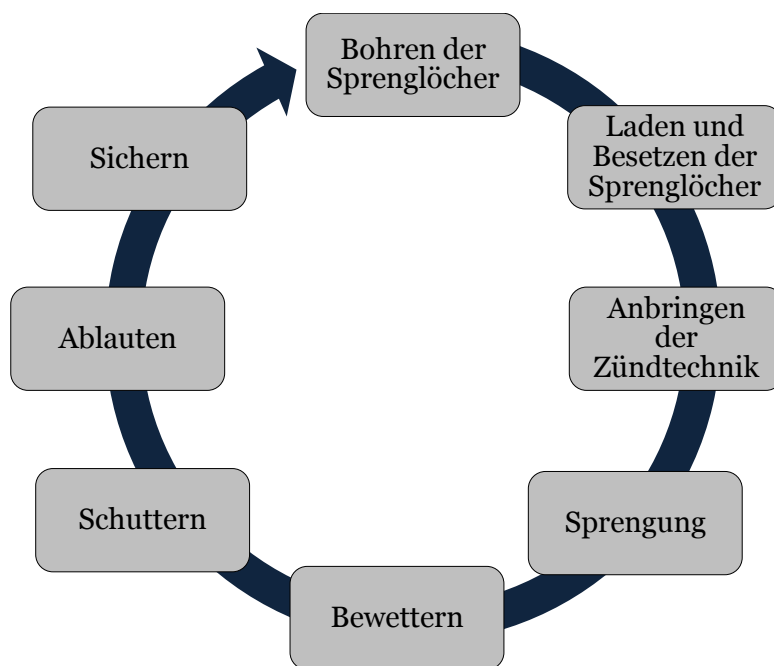


Abbildung 1: Zyklischer Ablauf beim Sprengvortrieb (eigene Darstellung)

2.3.1.3. Verwendete Materialien

Für das Vortriebsverfahren werden, für das Lösen des Gesteins, Sprengstoffe eingesetzt (siehe dazu Kapitel 4.10). Zur Sicherung des Hohlraumes werden Spritzbetone, Anker, Bewehrungsbögen und Bewehrungsmatten laut dem NATM-Verfahren verwendet (siehe dazu Kapitel 4.1 und 4.4).

2.3.1.4. Mengenverteilung

Der Sprengstoff, sowie die Sprengstoffgase verteilen sich aufgrund der Explosion gleichmäßig im gesamten Ausbruchmaterial. Die Menge an Spritzbeton, die sich im Ausbruchmaterial befindet, ist von den jeweiligen Sicherungsmaßnahmen (Stärke der Außenschale, Ortsbrustsicherung, etc.) abhängig.

2.3.2. Mechanischer Ausbruch (Baggervortrieb)

2.3.2.1. Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich für Baggervortrieb liegt bei Lockergestein bis Fels mit geringer Festigkeit. Bei instabilen Gebirgsverhältnissen wird eher auf Teilausbruch als auf Vollausbuch gesetzt. Den Umständen entsprechend kann eine weitere Unterteilung der Teilquerschnitte von Kalotte, Strosse und Sohle in Teilflächen erfolgen (siehe Abbildung 2).

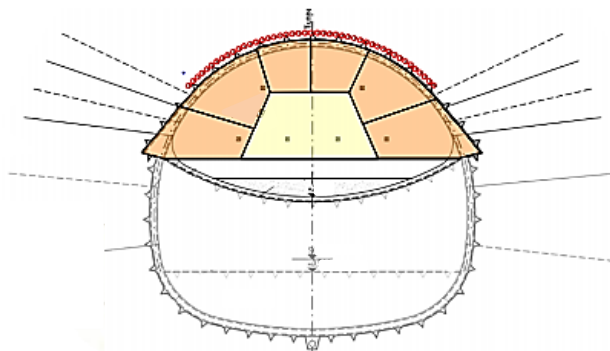


Abbildung 2: Teilflächenausbruch (Galler, 2014)

2.3.2.2. Herstellung

Der grundsätzliche Ablauf ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Lösen bei hoher Festigkeit erfolgt entweder durch die Baggerschaufel oder mithilfe eines Schrämaufsatzes am Bagger. Die Sicherungsmittel hängen vom Gebirge ab. Die zur Sicherung zur Verfügung stehenden Sicherungs-/Stützmittel sind:

- Spritzbeton
- Bewehrungsmatten
- Gitterbögen
- Anker
- Spieße
- Rohrschirme
- Injektionen.

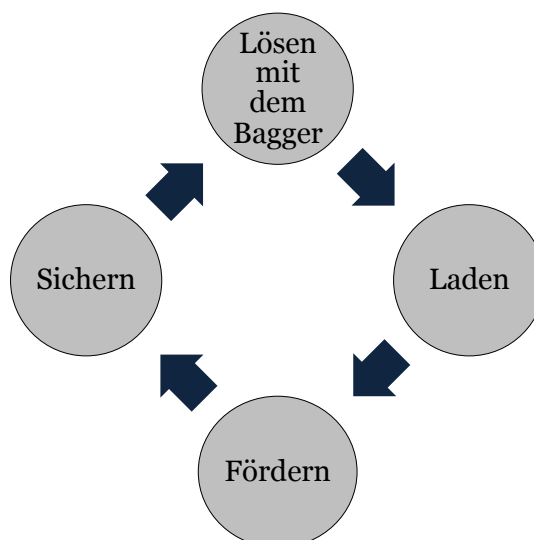


Abbildung 3: Ablauf zyklischer Baggervortrieb (eigene Darstellung)

2.3.2.3. Verwendete Materialien

Sicherungsmittel werden zur Sicherung des Hohlraumes eingebracht. Teile vom eingesetzten Sicherungsmittel kommen mit dem späteren Ausbruchmaterial in Kontakt und werden zusammen als Tunnelausbruchmaterial gefördert. Die Materialien, die für die spätere Verwertung berücksichtigt werden müssen sind:

- Spritzbeton (siehe dazu Kapitel 4.1)
- Anker (siehe dazu Kapitel 4.4)
- Spieße
- Rohrschirme
- Injektionen (siehe dazu Kapitel 4.5 und 4.6).

2.3.2.4. Mengen

Die Mengen der Sicherungs-/Stützmittel, die zur Stützung des Hohlraumquerschnittes eingebracht werden, variieren stark nach Bedarf.

2.4. Kontinuierlicher Vortrieb

Unter dem kontinuierlichen Vortrieb versteht man den Vortrieb mit einer Tunnelbohrmaschine. Die Arbeitsschritte Lösen, Laden, Fördern und Sichern, die im zyklischen Vortrieb nacheinander stattfinden, finden beim kontinuierlichen Vortrieb parallel statt. Ob der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine möglich ist, hängt von folgenden Faktoren ab:

- Homogenität des Gebirges
- Geometrie des Hohlraumquerschnittes
- Länge des Tunnels
- Infrastruktur im Umfeld
- Möglichkeiten der Erkundung.

Der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine hängt von den geotechnischen Eigenschaften der verschiedenen Baugründe (Boden und Felsparameter), sowie von den unterschiedlichen umwelttechnischen Randbedingungen ab. Zu den Randbedingungen, die geklärt sein müssen, zählen:

- wasserrechtliche Vorgaben
- Setzungen und Gebäudeunterführungen
- Arbeitssicherheit. (Maidl et al., 2020, S. 33)

2.4.1. Ablauf zur Ermittlung der geeigneten Tunnelbohrmaschine

Gemäß Empfehlung des DAUB-Arbeitskreises sind folgende Schritte zu durchlaufen, um die Wahl für einen geeigneten TBM-Typ zu treffen:

1. Analyse des geotechnischen Berichtes

Durch den geotechnischen Bericht kann der Längsschnitt in Homogenbereiche aufgeteilt werden. Daraus lassen sich Vortriebsbereiche ableiten.

2. Analyse des Systemverhaltens

In diesem Schritt wird beurteilt, welche Wechselbeziehung zwischen dem Untergrund und der TBM herrscht. Besonderes Augenmerk wird auf die Setzung, die Verschleißprognose, sowie die Stabilität der Ortsbrust gelegt.

3. Einteilung nach Maschinentypen

Aufgrund der ersten zwei Schritte ist eine Vorauswahl der verschiedenen TBM-Typen möglich.

4. Analyse des Materialtransportes

Auswahl des maschinellen Fördermittels.

5. Analyse der Materialentsorgung

Aufgrund der Auswahl des TBM-Typs ist zu eruieren welche Verwertung bzw. Entsorgung des Ausbruchmaterials möglich ist.

6. Festlegung des Maschinentyps

Auf Grundlage der Arbeitsschritte 4 und 5 wird die Auswahl des TBM-Typs optimiert.

7. Verfahrensbezogene Einteilung der Tunnelstrecke in Vortriebsabschnitte

Für die Abrechnung des Tunnelprojekts wird die Längsachse in Vortriebsklassen unterteilt. Die Einteilung erfolgt aufgrund:

- der Homogenbereiche in der Geologie;
- des Betriebsmodus der Tunnelbohrmaschine;
- der Betriebsdruckbereiche der Tunnelbohrmaschine. (Maidl et al., 2020)

In Abbildung 4 wird die Einteilung der verschiedenen Tunnelbohrmaschinen dargestellt. In den nachfolgenden Unterpunkten wird kurz die Funktionsweise der einzelnen Maschinentypen erklärt und ergänzend wird festgehalten welche Materialien für das jeweilige Verfahren eingesetzt werden. Teilschnittmaschinen werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, weil Teilschnittmaschinen in Österreich nicht zum Einsatz kommen.

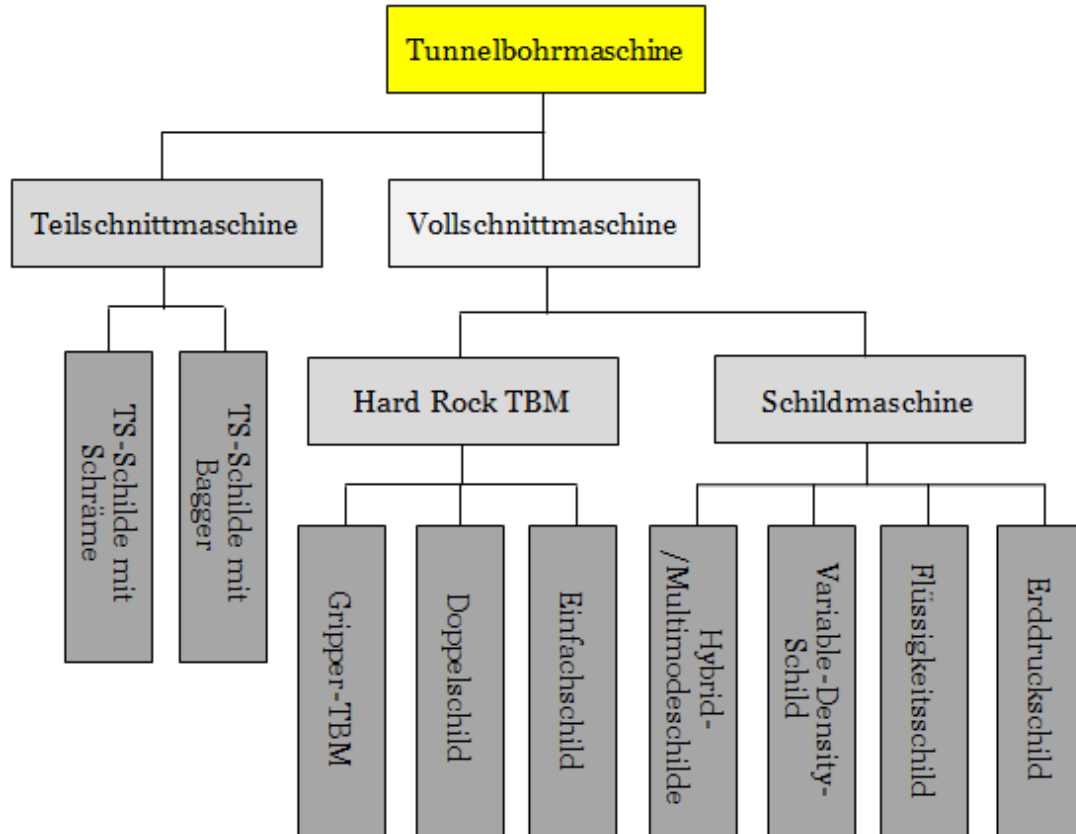


Abbildung 4: Unterteilung von Tunnelvortriebsmaschinen (eigene Darstellung)

2.4.2. Gripper-TBM

Die Gripper-TBM, wie in Abbildung 5 dargestellt, wird in standhaftem Festgestein verwendet, das nur wenig Sicherung für die Stabilität des Gebirges benötigt. Bei der Gripper-TBM kommt keine Ortsbruststützung zum Einsatz. Die Sicherung erfolgt direkt hinter dem Bohrkopfschild nach der Maschine (Fingerschild) mithilfe von Ankern, Bögen und Bewehrung. Spritzbeton wird erst im Nachläuferbereich aufgetragen. Die Vorschubkraft wird mittels den seitlich abgespreizten Grippern erzeugt. Die verwendeten Abbauwerkzeuge sind Rollmeißel (Disken), die auf dem rotierenden Bohrkopf angebracht sind. (Maidl et al., 2020, S. 13–15)

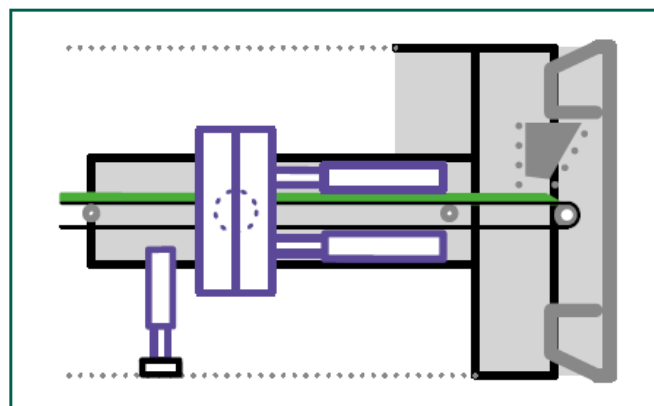


Abbildung 5: Systemskizze Gripper-TBM (Maidl et al., 2020, S. 13)

Verwendete Materialien:

Durch den Vortrieb mit einer Gripper-TBM werden keine Materialien für die Sicherung des Vortriebs eingebracht, die zu einem späteren Zeitpunkt mit dem Ausbruchmaterial gefördert werden. Die natürliche Zusammensetzung des Aushubs bleibt erhalten. Die einzige Quelle der Verunreinigung des Materials sind der Abrieb der Disken. Diese bestehen in den meisten Fällen aus einer Metalllegierung und darin verteilten Wolframcarbid-Teilchen. (Gutberlet)

2.4.3. Einfachschild

Das Einfachschild, wie in Abbildung 6 dargestellt, wird bei einem Untergrund verwendet, der keine Ortsbruststützung benötigt, jedoch zu wenig standfest bzw. zu gebräch für eine Gripper-TBM ist (Gefahr des Grundbruches bei den Grippern; herunterfallende Blöcke). Als Sicherung werden im Schutz des Schildmantels die Tübbingringe montiert. Die Vorschubkraft wird durch die Abstützung auf der Tübbingkonstruktion erzeugt. Als Abbauwerkzeuge dienen die Rollmeißel (Disken), wie bei der Gripper-TBM. Der Ringspalt, der sich zwischen der Tunnellaubung und dem Tübbingring bildet, wird mit Ringspaltmaterial verfüllt. (Maidl et al., 2020, S. 15)

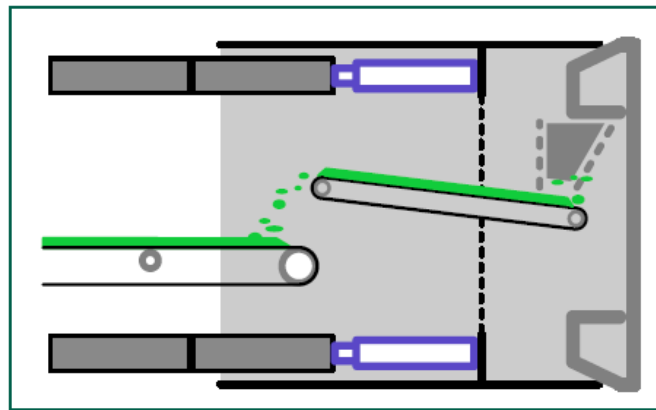


Abbildung 6: Systemskizze Einfachschild (Maidl et al., 2020, S. 15)

Verwendete Materialien:

Der Ringspalt (Hohlraum zwischen Tübbingring und Gebirge) wird mit Ringspaltmaterial (siehe dazu Kapitel 4.3) verfüllt. Das Material wird eingebracht um die Bettung herzustellen und die Kraftübertragung vom Gebirge auf den Tübbingring zu übertragen. Die Vermischung von Ringspaltmaterial mit Ausbruchmaterial soll mit den Schildschwanzdichtungen (Bürsten) an der Innen- und Außenseite, wie in Abbildung 7 dargestellt, verhindert werden. Durch Umwegigkeiten und nicht intakte Bürsten kann jedoch Ringspaltmaterial auch in die Abbaukammer gelangen und dort mit Ausbruchmaterial vermischt werden. Wie bei der Gripper-TBM kommt es zur Abnützung der Rollmeißel und zur Vermischung mit dem Aushub.

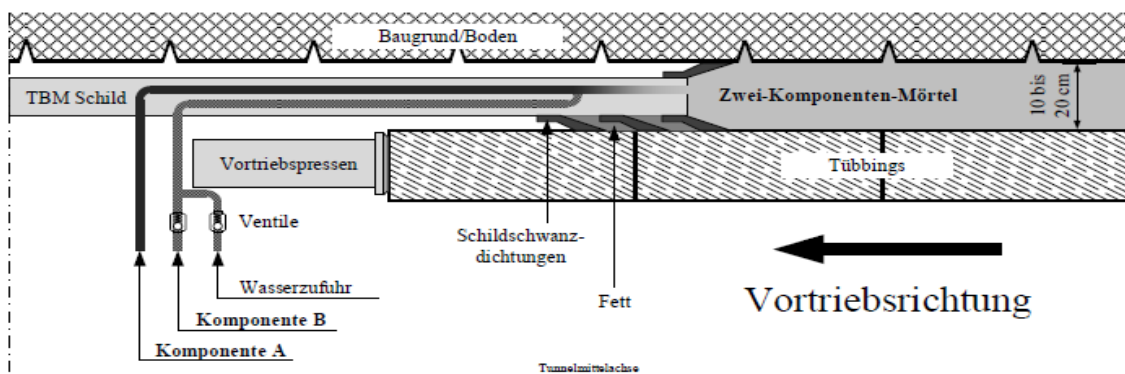


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Ringspaltverpressung durch Lisenen (Schulte-Schrepping, 2020, S. 32)

2.4.4. Doppelschildmaschine

Die Doppelschildmaschine, wie in Abbildung 8 dargestellt, wird bei Gebirgen verwendet, die sowohl standfeste Teilbereiche haben, die eine Gripper-TBM zulassen würden, als auch Teilbereiche, wo das Gebirge gebräch ist und eine Einfeldschild-TBM notwendig ist. Die Sicherung erfolgt mithilfe von Tübbing. Die Vorschubkraft wird entweder durch die Gripper-Einrichtung bei standfestem Gebirge, oder durch die Abstützung auf den Tübbingring bei nicht ausreichend standfestem Gebirge erzeugt. Die Abbauwerkzeuge bleiben, wie bei Einfeldschild und Gripper-TBM, Rollmeißel. (Maidl et al., 2020, S. 15–16)

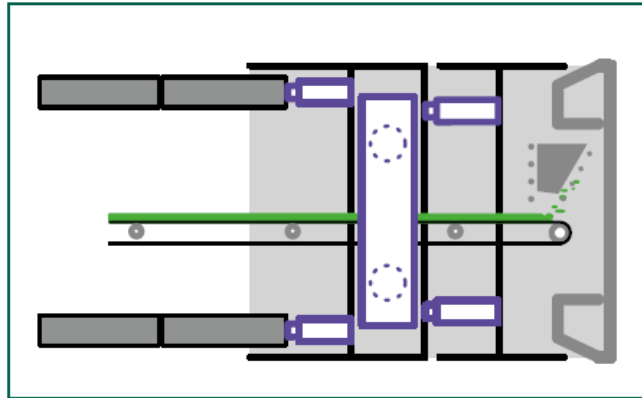


Abbildung 8: Systemskizze Doppelschildmaschine (Maidl et al., 2020, S. 15)

Verwendete Materialien:

Bei der Doppelschildmaschine sind dieselben Materialien, wie bei einer Einfeldschildmaschine im Einsatz.

2.4.5. Flüssigkeitsschildmaschine (Slurry Shield, SLS)

Die Flüssigkeitsschildmaschine, wie in Abbildung 9 dargestellt, wird bei Böden im Korngrößenbereich Sand und Kies mit hoher Wasserdurchlässigkeit eingesetzt. Eine Ortsbruststützung ist notwendig, damit die Ortsbrust nicht versagt. Zum Aufbringen der Stützkraft wird eine Stützflüssigkeit in die Abbaukammer, die durch eine Tauchwand getrennt ist, eingebracht. (Maidl et al., 2020, S. 16) Diese Stützflüssigkeit bildet gemeinsam mit dem Ausbruchmaterial den Filterkuchen und überträgt den Stützdruck auf die Ortsbrust. Ein Luftpolster bleibt hinter der Tauchwand zur Steuerung des Stützdruckes erhalten. (Heinz, 2006, S. 8)

Gefördert wird der Ausbruch durch eine Förderleitung. Die Sicherung erfolgt durch Tübbingringe. Die Vorschubkraft der SLS kommt von der Abstützung auf die Tübbingkonstruktion. Als Abbauwerkzeug werden einerseits Rolldisken, als auch Schällmesser verwendet. Zusätzlich werden Zangenbrecher oder Walzenbrecher in der Abbaukammer verwendet, damit die Förderleitung nicht verstopft. (Maidl et al., 2020, S. 16)

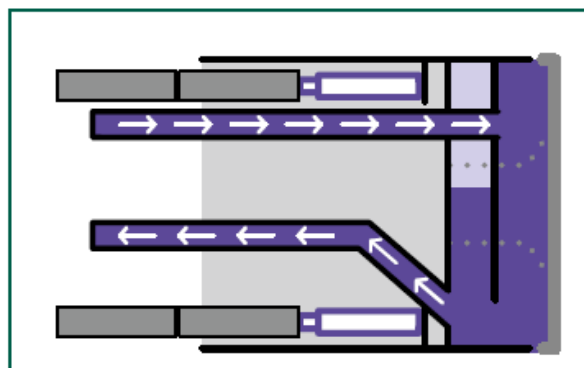


Abbildung 9: Systemskizze Flüssigkeitsschild (Maidl et al., 2020, S. 16)

Verwendete Materialien:

Bei der Slurry-Maschine kommt, wie bei den Hartgesteinsmaschinen mit Tübbing, ein Ringspaltmaterial zum Einsatz. Ein Abrieb von den Disken und Schällmessern ist gegeben. Für die Ortsbruststützung wird bei diesem Vortriebsverfahren zusätzlich eine Stützflüssigkeit benötigt. Die Dichte, sowie die Viskosität der Flüssigkeit werden den Gegebenheiten angepasst. Als dafür geeignet hat sich die Bentonit-Suspension gezeigt (siehe Kapitel 4.2). Bei diesem Verfahren kommt es zur kompletten Durchmischung mit dem Ausbruchmaterial und zur Bildung des Filterkuchens, der durch die Separationsanlagen wieder getrennt wird.

Der Anwendungsbereich von Flüssigkeitsschilden (Abbildung 11) wird von der Durchlässigkeit des Bodens bestimmt (k_f -Wert). An der Obergrenze des Anwendungsbereiches ist die Durchlässigkeit zu hoch und zu viel Material geht im Untergrund verloren. Der Druck an der Ortsbrust wird nicht mehr aufgebaut. An der Untergrenze besteht das Problem der Trennung des Stütz- und Ausbruchmaterials und die Gefahr der Verklebung des Schneidrades besteht. (Hehenberger, 2015)

2.4.6. Erddruckschilde (Earth Pressure Balance Shield, EPB)

Statt externes Material, wie beim Flüssigkeitsschild, wird der abgetragene Boden mithilfe von Konditionierungsmittel, Polymere und Schäume zu einem Erdbrei geformt, der die Ortsbrust stützt. Der Stützdruck wird gesteuert durch das Verhältnis zwischen der entnommenen Menge des Ausbruches, durch die Förderschnecke, und der Vortriebsgeschwindigkeit der TBM (siehe Abbildung 10). Der Einsatzbereich liegt im Schluff und Tonbereich. Der Ausbau wird mit Tübbingringe errichtet und als Abbauwerkzeuge werden Schällmesser eingesetzt. Die Vorschubkraft wird durch die Tübbingkonstruktion abgeleitet. (Maidl et al., 2020, S. 17)

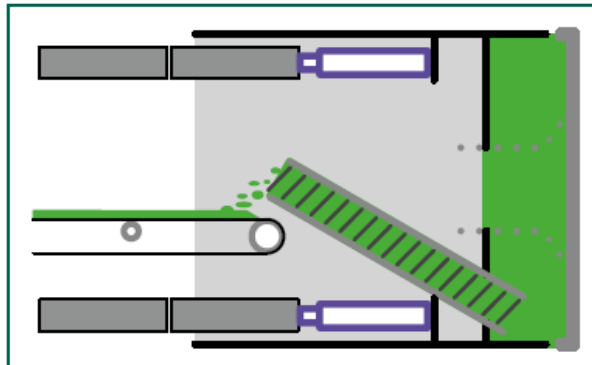


Abbildung 10: Systemskizze Erddruckschild (Maidl et al., 2020, S. 17)

Verwendete Materialien:

Wie bei allen Verfahren mit Tübbingausbau wird Ringspaltverpressmaterial verwendet. Um die Stützung an der Ortsbrust zu erreichen, werden zusätzlich Materialien, für die bevorzugte Konsistenz, zugegeben. Diese lassen sich in folgende Materialgruppen aufteilen:

- Wasser
- Schäume
- Polymere
- Anti-Ton-Additive.

Weitere Ausführungen dazu im Kapitel 4.7.

2.4.7. Einsatzbereiche von Slurry- und EPB-Maschinen

In Abbildung 11 sind die Einsatzbereiche der EPB- und Slurry-(Hydro) Maschinen dargestellt:

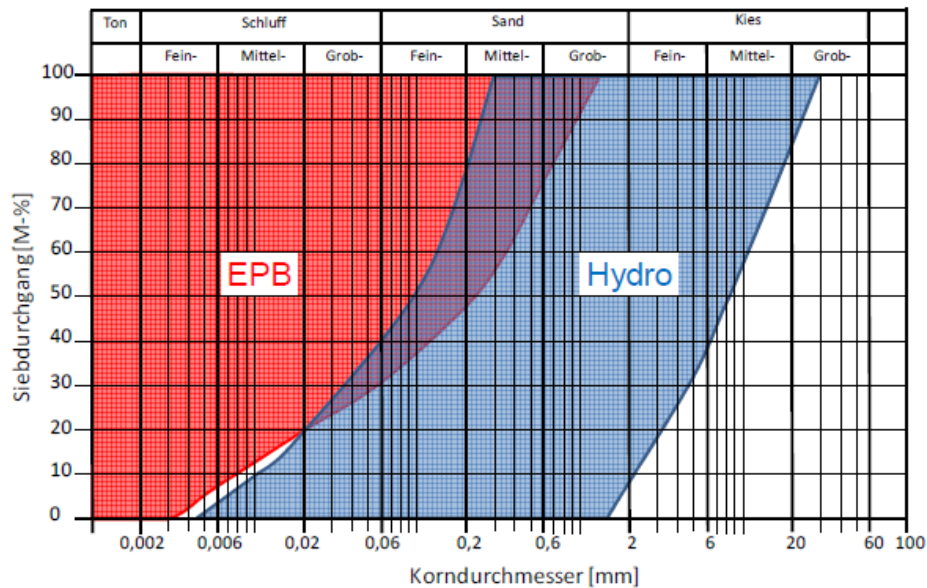


Abbildung 11: Einsatzbereich von EPB- und Slurry-(Hydro) Maschinen (Budach, 2011, S. 46)

2.4.8. Variable-Density-Schild (VDS)

Bei inhomogenen Böden stellt sich die Frage, ob die jeweiligen Einsatzbereiche von Slurry- oder EPB-Maschinen nicht von einem Maschinen-Typ durchfahren werden können. Das Variable-Density-Schild ist eine Kombination von beiden Maschinentypen und ermöglicht somit Einsatzbereiche von Ton bis Kies ohne einen Umbau in der Abbaukammer zu benötigen. Ein stufenloser Übergang der Ortsbruststützung von flüssigkeitsgestützt auf erddruckgestützt ist möglich. VDS besitzt zwei Kammern, die durch Rohre miteinander verbunden sind. Zur Steuerung dienen ein Luftpolster, wie beim Flüssigkeitsschild und ein Schneckenförderer, der je nach Drehzahl den Stützdruck regelt (wie in Abbildung 12 dargestellt). Normalerweise findet die Förderung hydraulisch statt. Im flüssigkeitsgestützten Betriebsmodus werden, wie beim Flüssigkeitsschild, Bentonit-Suspensionen zugegeben. Beim Erddruck-Modus werden Bodenconditionierungsmittel für die Konsistenz zugegeben und auch die Förderung kann auf Band umgestellt werden. Dieser Maschinentyp ermöglicht ein unkompliziertes Wechseln zwischen den Stützverfahren. (Maidl et al., 2020, S. 17–18)

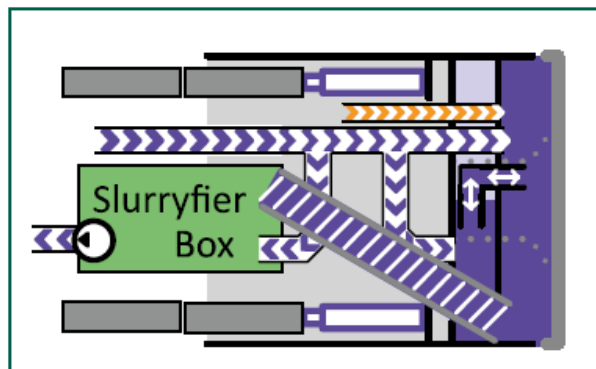


Abbildung 12: Systemskizze VDS (Maidl et al., 2020, S. 17)

Verwendete Materialien:

Der jeweilige Betriebsmodus entscheidet welche Materialien verwendet werden. Beim Flüssigkeits-Modus wird Bentonit-Suspension zugegeben. Beim Erddruckmodus werden Schäume und Polymere als Conditionierungsmittel beigemischt. Auch beim VDS wird Ringspaltmörtel verwendet. Der Abrieb der Schällmesser vermischt sich ebenfalls mit dem Aushubmaterial.

2.4.9. Hybrid-/Multimodeschilde (HYS)

Der Einsatzbereich ist gleich wie beim Variable-Density-Schild (Punkt 2.4.8). Der Unterschied besteht darin, dass kein stufenloser Übergang möglich ist. Ein kurzer Umbau findet zwischen den verschiedenen Modi statt. Die aktive Ortsbruststützung kann während dem Umbau nicht aufrechterhalten werden, weil ein Umbau in der Abbaukammer notwendig ist (siehe Abbildung 13).

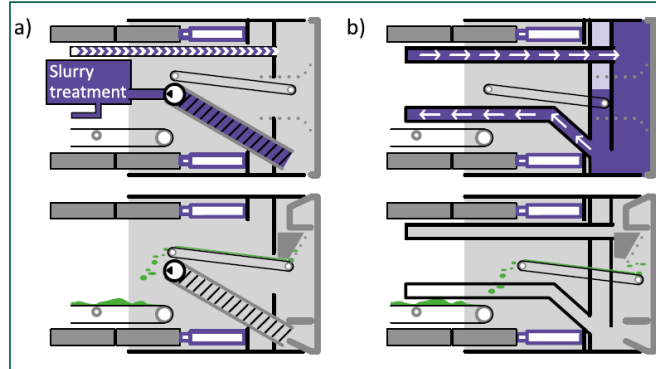


Abbildung 13: Systemskizze HYS (Maidl et al., 2020, S. 18)

Verwendete Materialien:

Die verwendeten Materialien sind ident mit dem Variable-Density-Schild-Verfahren.

2.5. Zuordnung der Materialien zu den Vortriebsverfahren

In Tabelle 1 sind die Vortriebsverfahren aufgelistet und die für das Verfahren notwendigen Materialien, die mit dem Ausbruchmaterial in Berührung kommen, zugeordnet.

Tabelle 1: Vortriebsverfahren und im Ausbruch verbleibende Materialien (eigene Darstellung)

		Materialien													
		Spritzbeton	Bentonit-Suspension	Ringspaltverpressmaterial	Injektionen	Anker	Diskensabtrieb	Schällmesserabtrieb	Schäume	Polymere	Anti-Ton-Additive	Sprenggase	Sprengmittel	Mineralöl / Abgase	
Vortriebsarten	Kontinuierlicher Vortrieb	Gripper-TBM	x			(x)	x	x							
		Einfachschild			x			x							
		Doppelschild			x			x							
		Flüssigkeitsschild		x	x			x	x						
		Erddruckschild			x				x	x	x	x			
		Variable-Density-Schild			x				x	x	x	x			
		Hybrid/Multimodeschild			x			x	x	x	x	x			
	Zyklischer Vortrieb	Sprengvortrieb	x			(x)	x						x	x	x
		Baggervortrieb	x			(x)	x								x
		Offene Bauweise	x			(x)	x								x

x = Einsatz wahrscheinlich

(x) = Einsatz möglich

2.6. Kornform und Korngrößenverteilung von Ausbruchmaterial

Für die Wiederverwertung des Ausbruchmaterials spielt die Kornform und die Korngrößenverteilung, besonders beim Einsatz als hydraulisch gebundene (HG-) und hydraulisch ungebundene (HU-) Gesteinskörnung im Beton, eine wichtige Rolle. Ein wichtiger Punkt sind die geologischen Gegebenheiten. Dazu zählen Trennflächen, Textur des Gesteins und der Gebirgsdruck. Der einzige beeinflussbare Faktor ist die Vortriebsart. Die Verteilung und Kornform wird beeinflusst. Wie in Abbildung 14 dargestellt ist, besteht ein großer Unterschied zwischen dem maschinellen Vortrieb und dem Sprengvortrieb. Das Ausbruchmaterial beim maschinellen Vortrieb hat eine deutlich feinere Korngrößenverteilung. Diese Tatsache hat Auswirkungen auf den Material-Anteil, der zu Beton weiterverarbeitet werden kann. Durch die Veränderung des Diskendruckes und des Schneidspurabstandes an der TBM lässt sich die Korngrößenverteilung verschieben. Eine gröbere Korngrößenverteilung lässt sich durch einen größeren Schneidspurabstand erreichen. (Resch, 2012, S. 37–39)

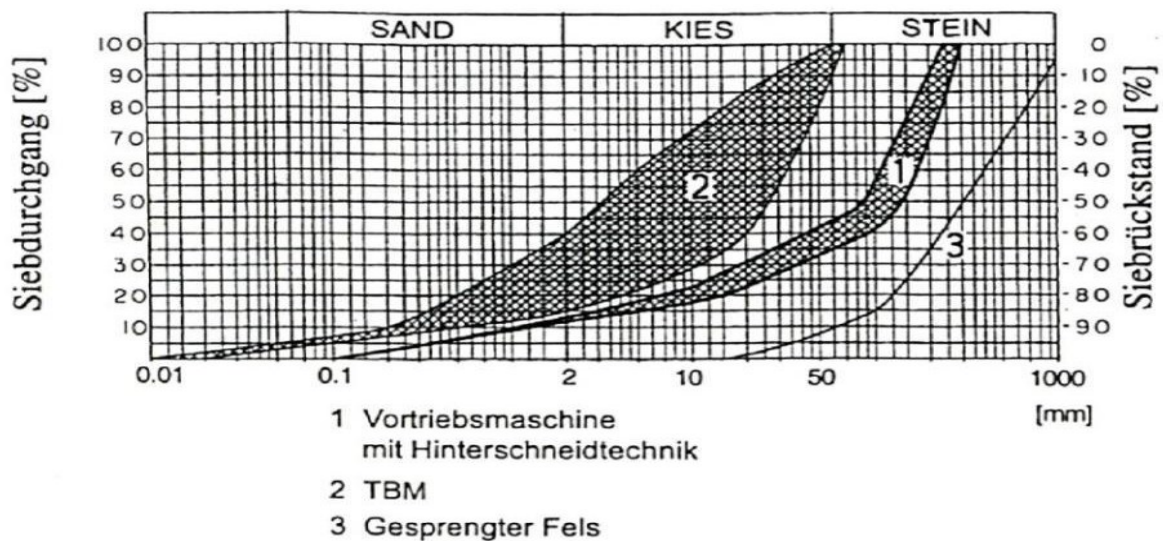


Abbildung 14: Korngrößenverteilung der verschiedenen Vortriebsverfahren (Girmscheid)

Auch die Kornform spielt für die Verarbeitbarkeit des Betons eine wichtige Rolle. Das Verhältnis zwischen dem kleinsten und dem größten Durchmesser wird gemessen. Bei der Verwendung einer TBM entstehen Chips (plattig – längliche Form). Das Schneidkonzept der Disken verursacht diese Form. Diese Kornform neigt beim Transport zur Nachzerkleinerung. Durch geeignete Aufbereitung ist das Material trotz dieser Kornform als Gesteinskörnung nutzbar. (Resch, 2012)

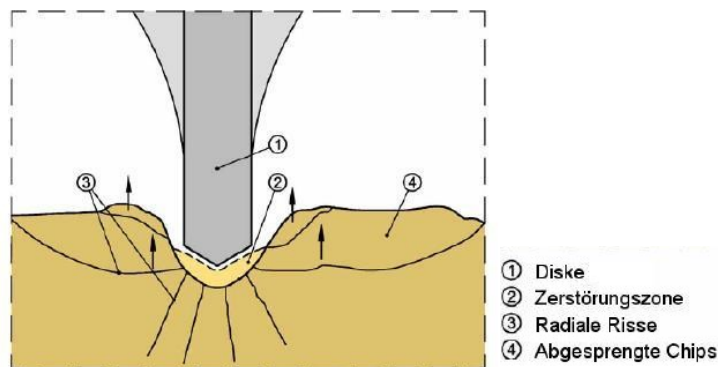


Abbildung 15: Löseprinzip einer Diske (Wittke, 2006)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die Wiederverwertung, besonders als hydraulisch gebundene Gesteinskörnung, die maschinelle Bauweise mit Disken, bezüglich der Kornform und Korngrößenverteilung, sich nachteilig auswirkt.

3. Gesetzliche Regelungen

Die Verwertung und/oder die Entsorgung von Tunnelausbruch ist in folgenden Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien innerhalb des österreichischen Rechtssystems geregelt:

- EU-Abfallrahmenrichtlinie
- Abfallwirtschaftsgesetz
- Deponieverordnung
- Bundesabfallwirtschaftsplan
- Abfallverzeichnisverordnung
- Altlastensanierungsgesetz
- ÖBV-Richtlinie (Österreichische Bautechnik Vereinigung) Verwendung von Tunnelausbruch.

Laut österreichischer Gesetzgebung besitzt jeder Grundstückseigentümer den Untergrund unter seinem Grundstück bis zum Erdmittelpunkt, sofern eine sinnvolle Nutzung möglich ist. Deshalb muss mit dem Grundstückseigentümer ein Vertrag abgeschlossen werden, damit das Grundstück unterirdisch durchfahren werden darf und der Umgang mit dem Ausbruchmaterial geregelt wird (Übergang des Besitzes des Ausbruchmaterials auf die Tunnelbauer).

3.1. EU-Abfallrahmenrichtlinie

Die Abfallrichtlinie 2008/98/EG ist ein Rechtsrahmen für den Umgang mit Abfällen. Dieser Rechtsrahmen dient dem Schutz von Mensch und Natur, indem die negativen Auswirkungen von Abfällen auf den Menschen und die Natur reduziert werden sollen. Dies geschieht durch gezieltes Recycling und Verwertung von Abfällen. Im Zuge dieser Richtlinie wurde folgende Abfallhierarchie festgelegt:

1. Prävention
2. Wiederverwendung
3. Recycling
4. Verwertung für andere Zwecke
5. Entsorgung.

Die Menge von Abfall die entsorgt/deponiert wird, ist so gering wie technisch möglich zu halten. Der Abfallerzeuger hat laut der EU-Richtlinie die Kosten für den Abfall zu tragen. In der Richtlinie sind die Quoten für die Wiederverwertung für Haushaltsabfälle mit 50 % und für Bau- und Abbruchabfälle mit 70 % festgelegt. Der Begriff Abfall wird in der Richtlinie 2008/98/EG wie folgt definiert: „Im Sinne dieser Richtlinie bezeichnet der Ausdruck "Abfall" jeden Stoff oder Gegenstand, dessen sich sein Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss“.

Ausgenommen vom Anwendungsbereich der Richtlinie sind:

- nicht ausgehobene kontaminierte Böden
- Böden, die ausgehoben werden und in ihrem natürlichen Zustand wieder verbaut werden.

Dass Böden in ihrem natürlichen Zustand wieder verwendet werden, ist im Tunnelbau nur in der offenen Bauweise, bei der Hinterfüllung der Tunnelröhren, möglich. Stoffe werden nicht mehr als Abfall angesehen (Ende der Abfalleigenschaft), wenn folgende Punkte erfüllt sind (Richtlinie 2008/98/EG):

- Das Material einen Verwendungszweck besitzt.
- Der Markt und die Nachfrage vorhanden sind.
- Der Stoff die entsprechenden technischen Vorgaben bezüglich des Verwendungszweckes einhält.
- Keine schädliche Wirkung für Gesundheit und Umwelt gegeben sind.

3.2. Abfallwirtschaftsgesetz (AWG)

Die Aufgabe des AWG ist die Europäische Richtlinie 2008/98/EG in ein nationales Recht umzuwandeln und die Abfallwirtschaft nach den folgenden Grundsätzen zu regeln:

- Keine Beeinträchtigung des Menschen und der Umwelt durch Abfälle.
- Klimaschädliche Gase verringern.
- Ressourcen schonen.
- Ersatz von Primärstoffen ermöglichen.
- Verhindern von gefährlichen Abfällen, die für spätere Generationen Gefahren darstellen.

Im nationalen Gesetz sind dieselben Regelungen, bezüglich der Ausnahme für Böden (siehe §3 Abs.1 Z8 AWG), der Abfallhierarchie (siehe §1 Abs.2 Z1 AWG) und dem "Ende der Abfalleigenschaft" (siehe §15 Abs.4a AWG), wie in der EU-Abfallrichtlinie festgelegt.

3.2.1. Begriffe im Abfallwirtschaftsgesetz

Die Begriffe sind im AWG §2 wie folgt definiert:

- Die "Wiederverwendung" ist die Verwendung eines Stoffes, der kein Abfall ist, für den ursprünglichen Zweck.
- Die "Verwertung" ist die Verwendung von Abfällen in der Wirtschaft zum Ersatz von Primärrohstoffen oder die Vorbereitung dazu.
- Das "Recycling" ist ein Teil der Verwertung. Nicht im Begriff enthalten sind die energetische Verwertung sowie die Verwendung als Verfüllungsmaterial.
- Die "Beseitigung" ist alles was nicht der Verwertung eines Stoffes entspricht.
- Der "Abfallerzeuger" ist jene Person, die für die Erzeugung oder Veränderung der Abfälle verantwortlich ist.
- Der "Abfallbesitzer" ist jene Person, die den Abfall erzeugt hat oder die Person, die den Abfall im Moment innehat.
- Ein "Abfallsammler" ist jene Person, die Abfälle von Dritten annimmt.
- Der "Abfallbehandler" ist jede Person, die für die Verwertung oder Beseitigung der Stoffe zuständig ist.

3.2.2. Pflichten des Abfallbesitzers

Im AWG §15 sind folgende Pflichten des Abfallbesitzers festgelegt:

- Die Grundsätze des Gesetzes dürfen nicht verletzt werden.
- Eine Mischung von Abfällen ist nicht gestattet.
- Eine Lagerung darf nur an genehmigten Orten stattfinden.
- Ist der Abfallbesitzer nicht in der Lage eine Verwertung/Beseitigung durchzuführen, hat er den Abfall an Berechtigte zu übergeben.
- Eine Untersuchung vor der Übergabe ist durchzuführen und die Daten sind weiterzugeben.
- Die für den Transport geforderten Daten sind zur Verfügung zu stellen.

Die Lagerung im Baustellenbereich ist laut §2 Abs.7 Z4 AWG 2002 nicht genehmigungspflichtig. Zeitlich ist die Lagerung auf die Baustellentätigkeit beschränkt. Die Lagerungshöchstdauer von 3 Jahren vor der Verwertung darf nicht überschritten werden. Bei notwendiger Beseitigung darf die Lagerdauer ein Jahr nicht überschreiten, bevor das Zwischenlager als Deponie gilt. Die Flächen für die Lagerung sind im Baustelleneinrichtungsplan zu kennzeichnen und die Lagerung darf nur auf geeigneten Flächen laut §15 Abs.3 Z2 stattfinden. Ist kein Verwendungszweck für das Material vorhanden, wird das Material als Abfall deklariert. Eine Untersuchung des Materials muss durchgeführt werden, um die Deponierungsklasse festlegen zu können. (AWG, 2002/16.06.2021)

3.3. Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP)

Um die Ziele des AWG zu erreichen, wird alle sechs Jahre vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) ein Bundesabfallwirtschaftsplan erstellt. Die derzeit geltende Fassung ist von 2017. Den größten Anteil am Gesamtabfall trägt das Aushubmaterial (siehe Abbildung 16). Großprojekte, wie der Brenner-, der Semmering- und der Koralm-Basistunnel tragen einen großen Anteil am Gesamtabfall. Das Aushubmaterial betrug 2015 rund 32,2 Mio. Tonnen. Jene Aushubmaterialien, die direkt am Entstehungsort wieder verwendet werden, werden in der Statistik nicht erfasst. Von den 32,2 Mio. Tonnen Aushubmaterial wurden ca. 1/3 verwertet, der Rest wurde deponiert. Die Zielvorgabe aus der EU-Abfallrichtlinie wird nicht eingehalten (siehe Abbildung 17).

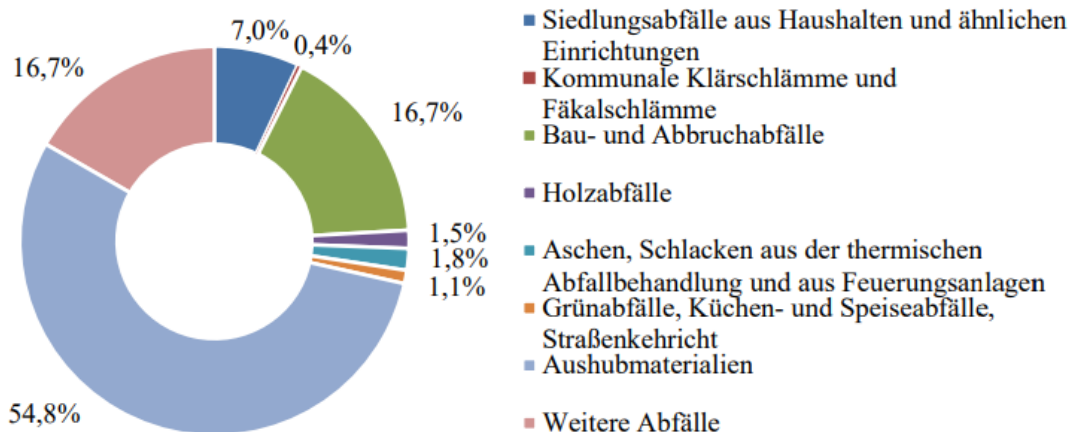


Abbildung 16: Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens 2015 (BAWP, 2017)

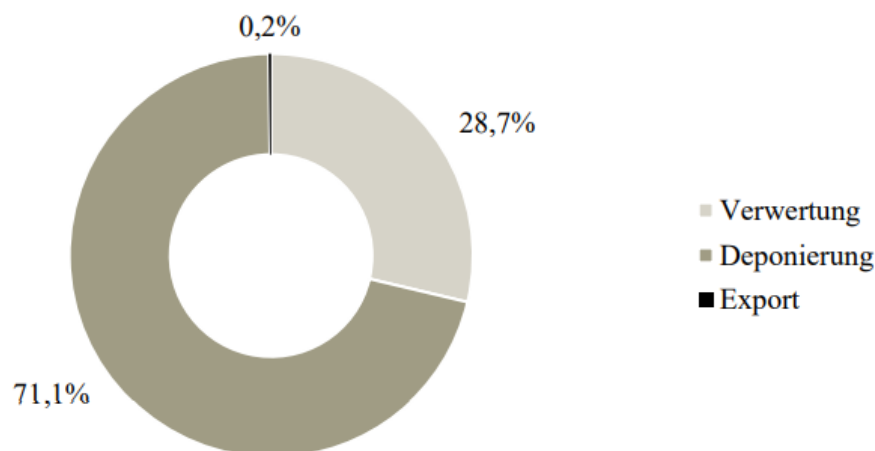


Abbildung 17: Behandlung von Aushubmaterial 2015 (BAWP, 2017)

Unter den Begriff "Bodenaushubmaterial" fällt natürlich gewachsener Boden, der ausgehoben wird. Tunnelausbruchmaterial ist im BAWP dem Bodenaushubmaterial gleichzusetzen. Als nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial gilt jenes Material, das bei der chemischen Untersuchung die Grenzwerte der Deponieverordnung für Bodenaushubmaterial einhält. Zusätzlich dürfen Bodenfremdstoffe, wie z.B. Baurestmassen, nicht mehr als 5 Volumenprozent betragen und der organische Fremdanteil (Kunststoff, Holz, Papier, etc.) darf 1 Volumenprozent nicht überschreiten. Laut BAWP sind für Materialien, die die Grenzwerte einhalten, folgende Verwendungszwecke möglich:

- industrielle Anwendung
- Untergrundverfüllung
- bautechnische Verwendung
- Komposterden. (BAWP, 2017)

Um die Einteilung in die verschiedenen Qualitätsklassen vorzunehmen, hat eine chemische Charakterisierung zu erfolgen. Die Untersuchungsmethoden sind dieselben wie in der Deponieverordnung. Im BAWP wird das Ausbruchmaterial in folgende Qualitätsklassen eingeteilt:

- Qualitätsklasse A1 (landwirtschaftliche Bodenrekultivierung)
- Qualitätsklasse A2 (Untergrundverfüllung)
- Qualitätsklasse A2-G (Untergrundverfüllung im und unmittelbar über dem Grundwasser)
- Qualitätsklasse BA (Bodenaushubmaterial mit Hintergrundbelastung)
- Qualitätsklasse IN (Inertabfallqualität für Recycling-Baustoffe für gebundene Anwendung).

Im Kapitel 7.8.1 des BAWP wird die Verwertung als Untergrundverfüllung oder zur Bodenrekultivierung besprochen. Den jeweiligen Qualitätsklassen (A1/A2/A2-G/BA) werden verschiedene Verwendungszwecke zugeordnet (siehe Tabelle 2) und die notwendigen Vorgaben zur Dokumentation werden erläutert.

Tabelle 2: Anwendungsbereiche der verschiedenen Qualitätsklassen in der Verfüllung (BAWP, 2017)

Qualitätsklasse	landwirtschaftliche Bodenrekultivierung	nicht landwirtschaftliche Bodenrekultivierung	Untergrundverfüllung	Untergrundverfüllung im und unmittelbar über dem Grundwasser
A1	JA	JA	JA	NEIN
A2	NEIN	JA	JA	NEIN
A2-G	NEIN	JA	JA	JA
BA	JA	JA	JA	NEIN

Im Kapitel 7.8.2 des BAWP wird die Verwertung von Aushubmaterial als Baustoff beschrieben. Das Material wird wieder den Qualitätsklassen zugeordnet und erlangt damit die Möglichkeit der Verwertung (siehe Tabelle 3). Für die Verwendung als Recycling-Baustoff sind im Tunnelbau nicht mehr als 10 Volumenprozent Spritzbeton und 1 Volumenprozent organische Bestandteile erlaubt. 30 Volumenprozent von mineralischen Baurestmassen sind für die Wiederverwendung zulässig.

Tabelle 3: Anwendungsbereich der Qualitätsklassen als Baustoff (BAWP, 2017)

Qualitätsklasse	ungebundene Anwendung	ungebundene Anwendung im und unmittelbar über dem Grundwasser	gebundene Anwendung
A1	JA	NEIN	JA
A2	JA	NEIN	JA
A2-G	JA	JA	JA
BA	JA	NEIN	JA
IN	NEIN	NEIN	JA

In Tabelle 4 sind die Grenzwerte für die Feststoffe abzulesen. Die Grenzwerte für Eluate stehen in Tabelle 5. Die Grenzwerte stammen vom BAWP Kapitel 7.8.6. Tabelle 80,81 und 82. Die Grenzwerte der Inertabfälle sind in Tabelle 6 ablesbar und stammen aus der Deponieverordnung (Anhang 1 Tabelle 3 und 4).

Tabelle 4: Grenzwerte Feststoffe (BAWP, 2017)

Parameter [mg/kg TM]	Qualitätsklasse A1	Qualitätsklasse A2-G	Qualitätsklasse A2	Qualitätsklasse BA
Arsen (als As)	20 ⁵	30	30	50/200 ^{5,6}
Blei (als Pb)	100 ⁵	100	150	150/500 ^{5,6}
Cadmium (als Cd)	0,5 ^{1,5}	1,1	1,1	2/4 ^{5,6}
Chrom gesamt (als Cr)	90 ⁵	90	90	300/500 ^{5,6}
Cobalt (als Co)	50 ⁵	30	50	50 ⁵
Kupfer (als Cu)	60 ⁵	60	90	100/500 ^{5,6}
Nickel (als Ni)	60 ⁵	55	60	100/500 ^{5,6}
Quecksilber (als Hg)	0,5 ⁵	0,7	0,7	1/2 ^{5,6}
Zink (als Zn)	150 ⁵	300	450	500/1.000 ^{5,6}
BTEX ⁸	0,5	1	1	1
KW-Index	50/100/200 ^{2,4}	20 ⁷	50/100/200 ²	50/100/200 ^{2,4}
PAK (16 Verbindungen)	2	2	4	4
PAK (Benz[a]pyren)	0,2	0,2	0,2	0,4
PCB (7 Verbindungen) ⁸	0,1	0,1	0,1	1
TOC (als C)	- ³	5.000 ⁷	10.000 ³	10.000 ^{3,4}

¹ 1 mg/kg TM bei einem pH-Wert ≥ 6 ; pH-Wert nach ÖNORM L 1083

² 50 mg/kg TM gilt für Bodenaushub und -material mit TOC ≤ 5.000 mg/kg TM

100 mg/kg TM gilt für Bodenaushub und -material mit TOC > 5.000 mg/kg TM und ≤ 20.000 mg/kg TM

200 mg/kg TM gilt für Bodenaushub und -material mit TOC > 20.000 mg/kg TM

³ Für Material zur Bodenrekultivierung gelten die Kennwerte der Rekultivierungsrichtlinie, wobei sich diese auf den Einbauzustand beziehen.

⁴ Für humus- und torfhaltiges Bodenaushubmaterial können im Einzelfall in Abstimmung mit der zuständigen Abfallbehörde Ausnahmen festgelegt werden.

⁵ Zur Verwertung als landwirtschaftliche Rekultivierungsschicht (Klasse A1) oder als landwirtschaftliche Rekultivierungsschicht in Bereichen vergleichbarer Belastungssituation (Klasse BA) ist für jede Feldprobe zusätzlich der Gesamtgehalt in der Fraktion < 2 mm zu untersuchen.

⁶ Ist für Bodenaushubmaterial der Gehalt eines Schadstoffes geogen bedingt, gilt der höhere Grenzwert.

⁷ Im Einzelfall kann in Abstimmung mit der Behörde ein TOC Gesamtgehalt bis zu 10.000 mg/kg TM festgelegt werden. In diesem Fall beträgt der Grenzwert für den KW-Index 100 mg/kg TM.

⁸ Nur bei Verdacht zu untersuchen.

Tabelle 5: Grenzwerte Eluate (BAWP, 2017)

Parameter [mg/kg TM]	Qualitätsklasse A1	Qualitätsklasse A2-G	Qualitätsklasse A2	Qualitätsklasse BA
pH-Wert ⁵	- ⁴	6,5-9,5	Kennwert: 4,5-9,5 ⁴	Kennwert: 4,5-9,5 ⁴
elektrische Leitfähigkeit ⁵ [mS/m]	50	50	50	150
Abdampfrückstand	- ¹	5.000	- ¹	- ¹
Aluminium (als Al)	- ¹	- ¹	- ¹	- ¹
Antimon (als Sb)	- ¹	0,06	- ¹	- ¹
Arsen (als As)	0,3	0,1	0,3	0,5
Barium (als Ba)	10	5	10	10
Blei (als Pb)	0,3	0,1	0,3	0,5
Cadmium (als Cd)	0,03	0,03	0,03	0,05
Chrom gesamt (als Cr)	0,3	0,3	0,3	0,5
Cobalt (als Co)	1	0,1	1	1
Eisen (als Fe)	- ¹	- ¹	- ¹	- ¹
Kupfer (als Cu)	0,6	0,6	0,6	2
Molybdän (als Mo)	0,5	0,35	0,5	0,5
Nickel (als Ni)	0,4	0,2	0,4	0,4
Quecksilber (als Hg)	0,01	0,01	0,01	0,01
Selen (als Se)	0,1	0,1	0,1	0,1
Silber (als Ag)	0,2	0,2	0,2	0,2
Zink (als Zn)	4	4	4	4
Zinn (als Sn)	2	0,5	2	2
Ammonium (als N)	8	3,5 ⁶	8	8 ³
Cyanide - leicht freisetzbar (als CN)	0,2	0,1	0,2	0,2
Fluorid (als F)	20	15	20	20
Nitrat (als N)	100	70	100	100
Nitrit (als N)	2	0,5 ⁶	2	2 ³
Phosphat (als P)	5	1 ⁶	5	5 ³
Sulfat (als SO ₄)	2.500	1.500	2.500	2.500 ⁷
AOX als (Cl)	0,3 ²	0,3 ²	0,3 ²	0,3 ²
KW-Index	5	1	5	5
Phenolindex	- ¹	0,05	- ¹	- ¹
anionenaktive Tenside (als MBAS) ⁸	1	1	1	1
TOC (als C)	- ¹	100	100 ⁹	100 ⁹

¹ Der Wert ist zu bestimmen und im Analysenbericht anzugeben.

² Gilt auch als eingehalten, wenn der Parameter EOX nicht mehr als 0,3 mg/kg TM beträgt.

³ In Abstimmung mit der Behörde kann im Einzelfall ein dreifach höherer Grenzwert festgelegt werden.

⁴ Für Material zur Bodenrekultivierung gelten für den pH-Wert die jeweiligen Bestimmungsmethoden und Kennwerte der Rekultivierungsrichtlinie.

⁵ Im Falle einer Deponierung eines Bodenaushubmaterials gelten für pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit die entsprechenden Grenzwerte des Anhangs 1 der Deponieverordnung 2008.

⁶ In Abstimmung mit der Behörde können im Einzelfall bei Ammonium bis zu 8 mg/kg TM, bei Nitrit bis zu 2 mg/kg TM und bei Phosphat bis zu 5 mg/kg TM als Grenzwert festgelegt werden.

⁷ Für gipshaltiges Bodenaushubmaterial können im Einzelfall in Abstimmung mit der Behörde Ausnahmen festgelegt werden.

⁸ Nur bei Verdacht zu untersuchen.

⁹ Grenzwert gilt nicht für Material zur Bodenrekultivierung.

3.4. Deponieverordnung (DVO)

Die Deponieverordnung wurde auf der Grundlage des Abfallwirtschaftsgesetzes erstellt und dient dazu negative Auswirkungen auf die Umwelt, durch die Ablagerung von Abfällen, zu verhindern. Eine Verminderung der Gesamtabfallmenge, die deponiert wird, ist anzustreben. Deponien werden in folgende Klassen unterteilt:

- Bodenaushubdeponie
- Inertabfalldeponie
- Deponie für nicht gefährliche Abfälle (definiert in der Abfallverzeichnisverordnung Anhang 1):
 - Baurestmassendeponie
 - Reststoffdeponie
 - Massenabfalldeponie
- Deponie für gefährliche Abfälle (nur als Untertagedeponie).

Für jede dieser Klassen sind in der Deponieverordnung (Anhang 2) Grenzwerte angegeben, die eingehalten werden müssen (siehe Tabelle 6).

3.4.1. Ablauf der Charakterisierung eines Tunnelabschnittes

Durch die Beprobung des Materials, vor und während der Vortriebsarbeiten, ist der Tunnel in Abschnitte zu unterteilen. Die Beprobung erfolgt an Hauptprobeentnahmestellen alle 1.000 Meter und bei Nebenprobeentnahmestellen alle 100 Meter. Bei den Nebenproben werden nicht alle Parameter überprüft. Leitfähigkeit, pH-Wert, Ammonium-Stickstoff, TOC, Nitrat-Stickstoff und Nitrit-Stickstoff im Eluat werden kontrolliert. Bei den Hauptproben erfolgt eine Vollanalyse. Anhand der festgestellten Werte und der Grenzwerte der Deponieklassen wird die zugehörige Deponiekategorie ermittelt. Die Grenzwerte sind bei jeder Probe zu berücksichtigen. Vor Abschluss der Untersuchungen darf das Material nicht deponiert werden. Eine Zwischenlagerung darf die Dauer vor der Verwertung von 3 Jahren nicht übersteigen. Bei der Beseitigung des Materials darf die Zwischenlager-Dauer maximal 1 Jahr betragen, bevor das Zwischenlager als Deponie gilt.

3.4.2. Parameter in der Deponieverordnung

Diese Parameter beziehen sich entweder auf den Feststoff oder auf das Eluat. Das Eluat ist eine Mischung aus Lösungsmitteln und gelösten Stoffen. In der Deponieverordnung gilt Wasser als Lösungsmittel. Die Herstellung von Eluat erfolgt durch verschiedene Verfahren. Schüttel- oder Säulenversuche werden ausgeführt. Nachfolgend die Erklärung einiger Parameter, die durch die unterschiedlichen Vortriebsmethoden verändert werden:

TOC (Total organic carbon/ Gesamter organischer Kohlenstoff)

Dieser Wert dient der Bestimmung des organischen Kohlenstoffanteils im Boden. Festgestellt wird dieser Wert durch die Verbrennungsmethode. Die Probe wird verbrannt und anhand der Verbrennungsgase wird der Kohlenstoffdioxidgehalt gemessen. Eine Rückrechnung auf den organischen Kohlenstoff wird durchgeführt. Die Grenzwerte sind in den verschiedenen Deponieklassen festgelegt. (wikipedia, 2021a)

KW-Index (Kohlenwasserstoff-Index)

Der KW-Index gibt die Summe aller Mineralöl-Bestandteile wieder. Sie werden durch Gaschromatographie-Untersuchungsverfahren (GC-Verfahren) bestimmt. (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, 2004)

Anionenaktive Tenside

Die anionenaktiven Tenside werden mit der Methode 5540 C mithilfe von MBAS (methylene blue active substances) gemessen. Die MBAS werden der Lösung zugegeben. Je nach Ausbildung der Farbe kann auf den Tensid-Gehalt Rückschluss gehalten werden. (National Environmental Methods Index)

Tabelle 6: Grenzwerte der Deponieklassen (DVO, 2008/02.06.2021) Anorganische Stoffe

Parameter [mg/kg TM]	Bodenaushub- deponien		Inertabfall- deponien		Baurestmassen- deponien		Reststoff- deponien		Massenabfall- deponien	
	Feststoff	Eluat	Feststoff	Eluat	Feststoff	Eluat	Feststoff	Eluat	Feststoff	Eluat
Anorganische Stoffe										
Aluminium (als Al)	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-
Antimon (als Sb)	-	-	-	0,06	-	-	-	0,7	-	5
Arsen (als As)	50	0,5	200	0,5	200	0,75	5000	2	500	25
Barium (als Ba)	-	10	-	20	-	20	-	100	10000	300
Blei (als Pb)	150	1	500	0,5	500	2	-	10	5000	50
Bor (als B)	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-
Cadmium (als Cd)	2	0,05	4	0,04	10	0,5	5000	1	30	5
Chrom gesamt (als Cr)	300	1	500	0,5	500	2	-	10	8000	70
Chrom sechswertig (als Cr)	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	20
Cobalt (als Co)	50	1	50	1	100	2	-	5	500	50
Eisen (als Fe)	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-
Kupfer (als Cu)	100	2	500	2	500	10	-	50	5000	100
Molybdän (als Mo)				0,5			-	10	-	30
Nickel (als Ni)	100	1	500	0,4	500	2	-	10	2000	40
Quecksilber (als Hg)	1	0,01	2	0,01	3	0,05	20	0,1	20	0,5
Selen (als Se)	-	-	-	0,1	-	-	-	0,5	-	7
Silber (als Ag)	-	0,2	-	0,2	-	1	-	1	100	10
Zink (als Zn)	500	20	1000	4	1500	20	-	50	5000	200
Zinn (als Sn)	-	2	-	2	-	10	-	20	-	200
Ammonium (als N)	-	8	-	8	-	40	-	300	-	10000
Chlorid (als Cl)	-		-	800	-	5000	-	-	-	-
Cyanide, leicht freisetzbar (als CN)	-	0,2	-	0,2	-	1	-	1	-	20
Fluorid (als F)	-	20	-	10	-	50	-	150	-	500
Nitrat (als N)	-	100	-	100	-	500	-		-	-
Nitrit (als N)	-	2	-	2	-	10	-	15	-	1000
Phosphat (als P)	-	5	-	5	-	50	-	50	-	-
Sulfat (als SO ₄)	-	-	-	1000	-	6000	-	-	-	25000

Tabelle 6: Grenzwerte der Deponieklassen (DVO, 2008/02.06.2021) Organische Summenparameter

Parameter [mg/kg TM]	Bodenaushubdeponien		Inertabfalldeponien		Baurestmassendeponien		Reststoffdeponien		Massenabfalldeponien	
	Feststoff	Eluat	Feststoff	Eluat	Feststoff	Eluat	Feststoff	Eluat	Feststoff	Eluat
Organische Summenparameter										
TOC (als C)	30000	200	30000	500	30000	500	50000	500	50000	2500
Kohlenwasserstoff-Index	50/100/200	5	500	5	1000	50	5000	100	20000	200
PAK (16 Verbindungen)	4	-	20	-	30	-	300	-	300	-
davon Benzo(a)pyren	0,4	-	2	-	-	-	-	-	-	-
PCB (7 Verbindungen)	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
BTEX	6	-	6	-	6	-	6	-	6	-
EOX (als Cl)	-	0,3	-	0,3	-	3	-	30	-	30
POX (als Cl)	-	-	-	-	-	-	-	-	1000	-
anionenaktive Tenside	-	1	-	1	-	5	-	20	-	-
Phenolindex	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1000
pH-Wert und lösliche Anteile										
pH-Wert	-	6,5-11	-	6,5-12	-	6,5-13	-	6,0-12	-	6,0-13
elektrische Leitfähigkeit	-	150 mS/m	-	150 mS/m	-	300 mS/m	-	-	-	-
Abdampfdruckstand	-	-	-	-	-	25000	-	60000	-	100000

3.5. ÖBV-Richtlinie (Verwendung von Tunnelausbruch)

Laut BAWP ist das Bauwesen für 50% des Gesamtabfalles verantwortlich. Um die Zielvorgabe der EU-Richtlinie einzuhalten und Primärressourcen zu schonen, ist die Verwertung von Tunnelausbruch (großer Anteil) ein wichtiger Beitrag. Das Ziel ist eine möglichst hochwertige Verwendung des Ausbruchmaterials. Die Prüfstellen (Labore), die die qualitative Untersuchung des Tunnelausbruches durchführen, müssen entsprechend der ÖNORM EN ISO/IEC 17025 zertifiziert sein.

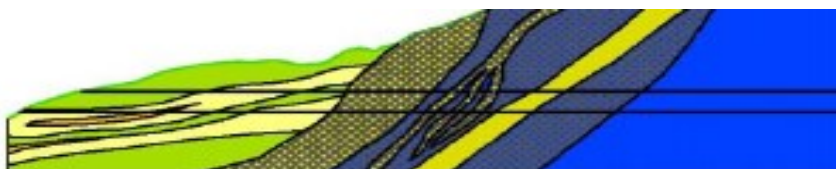
Tunnelausbruch gilt als nicht kontaminiertes Material, wenn die Grenzwerte für die Bodenaushubdeponie der Deponieverordnung eingehalten werden. Eine Untersuchung des Tunnelausbruches ist immer durchzuführen. Tunnelausbruch gilt nicht als Abfall, wenn er in unveränderter Form, am selben Ort wieder verwendet wird, was bei Tunnelbaustellen (offene Bauweise) nur begrenzt möglich ist.

Das Ende der Abfalleigenschaft tritt erst bei der tatsächlichen Verwertung und nicht nach der Aufbereitung ein. Eine Verordnung, die das Ziel hat dies zu ändern, ist in Arbeit. Die zeitliche Lagerung des Tunnelausbruches ist für die Zeit der Baustelle, auf dafür im Baustelleneinrichtungsplan ausgewiesenen Flächen, erlaubt. Die maximalen Lagerzeiten von einem Jahr vor der Deponierung und von drei Jahren vor der Verwertung sind zu beachten. Der Verkauf von großen Mengen aufbereitetes Ausbruchmaterial ist nicht immer möglich und führt zu logistischen Problemen.

Die Abfallhierarchie bleibt wie in der Europäischen Richtlinie 2008/98/EG gleich. Der Abfallsammler unterliegt gewissen Aufzeichnungs- und Meldepflichten (laut AWG).

Die ÖBV-Richtlinie zeigt auf in welchen Phasen Untersuchungen stattfinden müssen und welche Pläne daraus entstehen sollen. Ziel ist, dass bei der Einreichungsplanung ein Längsschnitt des Tunnels vorhanden ist (siehe Abbildung 18), bei dem folgende Punkte über die gesamte Länge des Tunnels prognostiziert werden:

- das Potential bei den verschiedenen Verwertungsklassen
- die voraussichtliche Menge, die in einer Deponieklasse deponiert wird
- die Prognosesicherheit der Planung. Unterteilt in:
 - o die Untersuchungsdichte
 - o die Komplexität
 - o die gesamte Prognosesicherheit.



prognostizierte Verwertungsklassen

HG 1a (Beton)	niedriges Potential	niedriges Potential	mittleres Potential
HG 1b (Beton)	niedriges Potential	mittleres Potential	hohes Potential
HG n (gebundene Tragschichten)	niedriges Potential	mittleres Potential	hohes Potential
HU 1 (ungebundene Tragschichten)	mittleres Potential	niedriges Potential	hohes Potential

prognostizierte Deponieklassen (ohne Berücksichtigung von anthropogenen Beeinträchtigungen durch Vortriebsarbeiten)

DE 1 (Bodenaushub)	30%-60%	0%-20%	80%-100%
DE 2 (Inertabfall)	40%-60%	80%-100%	0%-10%

zugrundeliegende Prognosesicherheit

Untersuchungsdichte	dicht	mittel	gering
Komplexität Gebirgsaufbau	mittel	hoch	gering
Prognosesicherheit gesamt	mittel	gering	mittel

Abbildung 18: Längsschnitt mit Verwertungsklassen (ÖBV-Richtlinie, 2015)

Hier sind sowohl die geogenen Faktoren (Geologie), sowie die anthropogenen Faktoren (Altlasten), aber auch die durch Vortriebsarbeiten entstehenden Verunreinigungen zu berücksichtigen.

Folgende Verwertungsklassen sind in der Richtlinie vorhanden:

- HG = hydraulisch gebundene Gesteinskörnungen
- HU = hydraulisch ungebundene Gesteinskörnungen
- DE = Beseitigung/Deponierung
- G = gefährliche Abfälle
- IP = industrielle Produktion.

In der Folge werden für die unterschiedlichen Verwendungen Tests und Versuche zur Feststellung der Eignung aufgezählt. Die Einteilung erfolgt durch die in der BAWP festgelegten Qualitätsklassen.

Bei der industriellen Verwertung (IP) sind allgemeine Angaben zur Nutzung schwierig, weil die benötigten Parameter für die jeweiligen Produkte unterschiedlich sind. In der ÖBV-Richtlinie wird auf die zukünftige Plattform von MineralBay verwiesen, die durch die Eingabe der Daten (chemische Untersuchung, Korngröße, geotechnische Parameter, Menge, etc.), auf mögliche Verwendungszwecke und Firmen, die diese Materialien benötigen, hinweisen. (Erben et al., 2015)

3.6. Altlastensanierungsgesetz

Die Aufgabe des ALSAG (Altlastensanierungsgesetz) ist die Finanzierung, Sanierung und Erhaltung von Altlasten. Wenn Abfälle auf Deponien gebracht werden, sind ALSAG-Gebühren zu entrichten. ALSAG beitragspflichtig (§3 Ab.1) sind:

- Das Ablagern von Abfällen ober- und unterhalb der Erde.
- Die Lagerung über die maximale Zwischenlagerungszeit hinaus.
- Die Verwendung als Verfüllungsmaterial.
- Die Einbringung von Abfällen in den Deponiekörper.

Keine Beitragspflicht besteht bei (§3 Ab.1a):

- Aushubmaterial von gewachsenen Böden mit unter 30 Volumenprozent mineralischem Fremdanteil und unter 3 Volumenprozent organischem Fremdanteil sofern entweder die Grenzwerte für die Bodenaushubdeponie/ Inertabfalldeponie/Baurestmassendeponie eingehalten werden oder die enthaltenen Verunreinigungen geogen sind. Das Aushubmaterial muss auf einer genehmigten Deponie entsorgt werden.
- Tunnelausbruch mit weniger als 10 Volumenprozent Spritzbeton und weniger als 1 Volumenprozent organischem Fremdanteil am Ausbruchmaterial. Ebenfalls dürfen die Grenzwerte der Baurestmassendeponie nicht überschritten werden und das Ausbruchmaterial muss auf einer dafür genehmigten Deponie entsorgt werden.
- Aushubmaterial, das als Recycling-Baustoff verwendet wird.

Laut ALSAG §4 Abs. 1-2 sind folgende Personen Beitragsschuldner:

- Der Inhaber der Deponie.
- Der Hersteller von Recycling-Baustoffen, wenn die erzeugten Baustoffe den Vorschriften nicht entsprechen.

Die ALSAG-Gebühren sind gestaffelt und von der Deponieklasse abhängig (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: ALSAG-Gebühren der Deponieklassen (ALSAG, 1989/15.06.2021)

Bodenaushub-, Inertabfall- oder Baurestmassendeponien	9,20 €/t
Reststoffdeponien	20,60 €/t
Massenabfalldeponien oder Deponien für gefährliche Abfälle	29,80 €/t

Die Deponiebetreiber sind dazu verpflichtet den zu entrichtenden Beitrag selbst zu berechnen und sich selbständig bei der zuständigen Behörde (Österreichisches Zollamt) zu melden (ALSAG §9). Das Kontrollamt kann Kontrollen durchführen.

Bei unklarer Datenlage kann von der Behörde ein Feststellungsbescheid (ALSAG §10) gefordert werden, um festzulegen in welche Abfallkategorie der Abfall fällt.

Wenn die Deponierung des Ausbruchmaterials durch die Verunreinigungen der Vortriebsmethoden beitragspflichtig wird, besteht die Möglichkeit, dass Projekte nicht finanziert werden können.

4. Im Tunnelbau eingesetzte Materialien

4.1. Spritzbeton

Spritzbeton wurde durch die Weiterentwicklung der Tunnelbaumethoden, von früher gemauerten Tunnelschalen zur Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NATM), zu einer der wichtigsten Komponenten zur Sicherung der Tunnellaibung. Spritzbeton existiert seit 1914. Das Material wurde weiterentwickelt und heute wird Spritzbeton durch zwei Verfahrensarten auf die Tunnellaibung aufgebracht:

- das Trockenspritzen
- das Nassspritzen. (Höfler et al., 2012)

Folgende Eigenschaften des Spritzbetons sind beim Einsatz als Sicherungsmaterial im Tunnelbau wichtig:

- hohe Frühfestigkeit
- anwendungsgerechte Verarbeitungszeit
- gute Pumpbarkeit
- gute Spritzbarkeit
- minimaler Rückprall. (Höfler et al., 2012)

4.1.1. Verarbeitung von Spritzbeton

Aktuell wird im Tunnelbau das Nassspritzverfahren, wegen der höheren Förderleistung und dem geringeren Rückprall, bevorzugt angewandt. Der Spritzbeton wird im Mischwerk hergestellt und wie normaler Beton zur Baustelle transportiert. Mithilfe des Spritzbüffels wird der Spritzbeton beschleunigt und durch Leitungen gepresst. Bei der Spritzdüse wird das Gemisch durch Zusatzmittel, die den Erstarrungsbeginn einleiten, ergänzt und direkt durch den Aufprall auf der Wand verdichtet.

4.1.2. Spritzbetontechnologie

Die Standardkomponenten von Spritzbeton sind dieselben wie bei Beton. Die drei Standardkomponenten sind: Zement, Zuschlagstoffe und Wasser. Zu diesen drei Bestandteilen werden dann noch sogenannte Zusatzstoffe und Zusatzmittel zugegeben, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen. (Höfler et al., 2012)

4.1.3. Zement

Der Zement ermöglicht einen schnellen Erstarrungsbeginn. Der Zementanteil im Spritzbeton beträgt generell zwischen 300-450 kg/m³. Zement trägt zur Festigkeit bei und bildet bei der Förderung einen Zementfilm im Rohr aus, der den Transport erleichtert. (Höfler et al., 2012)

4.1.4. Wasser

Im Wasser dürfen sich keine Fremdstoffe befinden, die die Hydratation beschleunigen oder verlangsamen können. Natürlich vorkommendes Wasser entspricht den Erfordernissen. (Höfler et al., 2012)

4.1.5. Zusatzstoffe

Zusatzstoffe regulieren die erforderlichen Eigenschaften des Spritzbetons und können unterschiedlicher Art sein. Die zugesetzten Mengen an Zusatzstoffen sind deutlich größer als die Mengen an Zusatzmittel und sind bei einer Stoffbilanz zu berücksichtigen. Die am häufigsten verwendeten Zusatzstoffe sind:

- Hochofenschlacke (Hüttensand)
- Flugasche
- Mikrosilikat (Silikafume)
- Steinmehl
- Fasern. (Höfler et al., 2012)

Hochofenschlacke (Hüttensand)

Schlacke entsteht bei der Stahlproduktion als Nebenprodukt und ist daher relativ günstig zu erwerben. Die Schlacke dient als hydraulisches Zusatzmittel beim Beton und wirkt sich besonders gut auf die Dauerhaftigkeit und die Endfestigkeit aus. Zusammensetzung der Hochofenschlacke:

- CaO 30-45%
- SiO₂ 30-45%
- Al₂O₃ 5-15%
- MgO 4-17%
- Schwefel 0,5 – 1%
- und Spuren anderer Elemente. (Thienel, 2017)

Flugasche

Flugasche wird beim Filtern von Verbrennungsprozessen von Kohle durch elektrostatische und mechanische Abscheidung gewonnen. Der Korngrößenbereich bewegt sich zwischen 1 µm bis 1 mm. Die genauen Bestandteile hängen von der Art und Herkunft des Verbrennungsmaterials (Kohle) ab. Hauptbestandteile sind SiO₂ und Al₂O₃. Sie müssen mindestens zwei Drittel der Flugasche ausmachen. Der CaO-Anteil wird auf ein Maximum von 10 % und der Aschenanteil auf ein Maximum von 30 % begrenzt. Flugasche verbessert die Verarbeitbarkeit von Spritzbeton. (Kampen & Richter, 2014)

Mikrosilikat (Silikafume)

Mikrosilikat entsteht als Nebenprodukt bei der Siliziumherstellung und besteht zu sehr hohem Anteil aus Siliciumoxid. Die Korngröße bewegt sich im Bereich von 0,1 µm und ist damit kleiner als Zement. Mikrosilikat hat durch die große Oberfläche einen positiven Einfluss auf die Frühfestigkeit. Gut geeigneter Zusatzstoff für Beton, aber sehr teuer. (Höfler et al., 2012)

Steinmehl

Unter Steinmehl versteht man fein zerriebenes Gestein (kleiner als 0,125 mm). Steinmehl besteht meist aus Kalkstein, aber grundsätzlich sind alle Gesteinsarten möglich. Generell wird Kalkstein, wegen der leichten Mahlbarkeit, verwendet. Der Zusatzstoff wird als Füllstoff verwendet, um die Poren zwischen den Zementpartikeln zu füllen. Im Spritzbeton wird Steinmehl zur Verbesserung der Verarbeitung zugefügt. (Stark & Wicht, 2013, S. 46)

Tabelle 8 zeigt die Veränderung der Eigenschaften von Spritzbeton durch die Zugabe der verschiedenen Zusatzstoffe auf einen Blick.

Tabelle 8: Veränderung der Eigenschaften durch Zusatzstoffe (Höfler et al., 2012, S. 18)

Charakteristik	Zement	Silikafume	Flugasche	Schlacke	Steinmehl
Frischbeton					
Handling	++	++	+++	+	+++
Wasserrückhaltekapazität	++	+++	+	+	++
Festigkeitsentwicklung					
Frühfestigkeit bis 4 h	+++	+	-	-	±
Druckfestigkeit bis 12 h	++	++	-	-	±
Endfestigkeit	++	+++	++	++	±
Dauerhaftigkeit					
Wassereindringwiderstand	++	+++	++	++	+
Sulfatwiderstand	-	++	±	+++	±
ASR Widerstand	-	±	±	+++	±
+ verbessernd - vermindernd					

Fasern

Durch die Zugabe von Fasern, die entweder aus Stahl bestehen, damit eine Erhöhung der Zugfestigkeit entsteht, oder aus Kunststoff, welche zur besseren Brandbeständigkeit beitragen, kann eine Netzbewehrung ersetzt werden. Der Gehalt liegt im Bereich von 30 kg/m³. Die Fasern besitzen ca. eine Länge von 4 mm und einen Durchmesser von 0,5 mm. Die gleichmäßige Verteilung der Fasern im Spritzbeton stellt das größte Problem dar. (Girmscheid, 2001, S. 31)

4.1.6. Zusatzmittel

Der Anteil für Zusatzmittel liegt nur im Promillebereich (bis zu 32 kg/m³). Aufgrund ihrer geringen Menge werden sie im Gegensatz zu den Zusatzstoffen nicht in der Stoffbilanz berücksichtigt. Die Mengen werden in Massenprozent bezogen auf das Zementgewicht angegeben. Die Zusatzmittel, die bei Spritzbeton häufig zum Einsatz kommen, sind:

- Abbindebeschleuniger
- Betonverflüssiger
- Konsistenzstabilisierer / Abbindeverzögerer
- Mischungsstabilisatoren. (Höfler et al., 2012, S. 20)

Abbindebeschleuniger

Da Spritzbeton sofort Festigkeit entwickeln muss, einerseits um das Auftragen an der Tunnellaibung in der gewünschten Schichtdicke zu ermöglichen und andererseits um sofortigen Schutz zu bieten, werden Abbindebeschleuniger zugegeben.

Aus ökologischen Gesichtspunkten werden heutzutage alkalifreie Abbindebeschleuniger verwendet. Sie bestehen aus Aluminiumsulfat und Aluminiumhydroxid-Sulfaten. Gleichzeitig wird die Arbeitssicherheit erhöht, da alkalifreie Abbindebeschleuniger nicht ätzend sind. Zusätzlich haben alkalifreie Abbindebeschleuniger positive Auswirkungen auf die Endbetonhärte und Wasserundurchlässigkeit und somit auf die Langlebigkeit des Betons. Zu beachten ist, dass noch ältere Beschleunigertypen im Umlauf sind, die nicht alkalifrei sind und die vorher erwähnten Vorteile nicht besitzen (siehe Tabelle 9). Sie sind für die Umwelt schädlicher. Der Dosierbereich für Abbindebeschleuniger liegt bei 4-7 % des Zementgewichtes. (Höfler et al., 2012, S. 22–26)

Tabelle 9: Abbindebeschleuniger und ihre Eigenschaften (Höfler et al., 2012, S. 25)

Eigenschaften	Beschleunigertyp		
	Alkalisch Aluminatbasis	Alkalisch Silikatbasis	Alkalifrei
Dosierbereich	3-6 %	12-15 %	4-7 %
pH-Wert	13-14	12-13	3
Frühfestigkeit bei gleicher Dosierung	++++	++++	++
Endfestigkeit	+	--	+++
Wasserdichtigkeit	++	--	+++
Auslaugverhalten	---	--	-
Arbeitshygiene	---	-	+++
Sicherheit bei Arbeit und Transport	--	-	+++
		+ verbessernd	- vermindernd

Betonverflüssiger

Der Verflüssiger ist ein essentieller Bestandteil von Spritzbeton. Er dient der Verarbeitbarkeit von Spritzbeton. Zur Erreichung eines niedrigen W-Z-Wertes, notwendig um eine hohe Festigkeit zu erreichen, wird der Verflüssiger benötigt, der trotz des niedrigen W-Z-Wertes die Fließfähigkeit erhält. Die mögliche Interaktion von Betonverflüssiger mit dem Abbindebeschleuniger ist zu beachten. Betonverflüssiger bauen auf folgender chemischen Basis auf:

- Naphthalin und Melamin (gut kompatibel mit Abbindebeschleunigern).
- Polycarboxylate. Sie können den benötigten Wasserzusatz weiter verringern. Die Interaktionen mit dem Abbinde Mittel sind schwierig vorherzusagen. (Höfler et al., 2012, S. 27–30)

Konsistenzstabilisierer / Abbindeverzögerer

Wenn zeitliche Verzögerungen bis zur Verarbeitung des Betons eintreten und der Spritzbeton nicht sofort verwendet werden kann, müssen Abbindeverzögerer zugemischt werden. Eine zeitliche Steuerung ist durch die Dosis der Konsistenzstabilisierer möglich (Höfler et al., 2012, S. 31). Laut Kustermann werden folgende anorganischen und organischen Wirkstoffe dafür eingesetzt:

- Phosphate
- Saccharose
- Hydroxycarbonsäuren
- Ligninsulfonate. (Kustermann, S. 8–9)

Der Wirkungsmechanismus von Verzögerern unterbindet die Hydratation des Zements und somit den Erstarrungsbeginn. Der Beginn des Erhärtungsprozesses kann folgend ausgelöst werden:

- warten bis die Wirkung des Verzögerers nachlässt;
- durch die Zugabe eines Aktivierers, der die Schutzschicht des Verzögerers zerstört.

Mischungsstabilisatoren

Ein Stabilisator wird zugegeben, um eine bessere Fließfähigkeit, sowie Pumpbarkeit des Spritzbetons herzustellen, wenn es durch die anderen Bestandteile des Spritzbetons nicht gelungen ist. (Höfler et al., 2012, S. 32–34)

4.1.7. Interaktion von Spritzbeton mit Ausbruchmaterial

Spritzbeton gelangt durch verschiedene Prozesse in gefördertes Ausbruchmaterial. Die drei größten Verursacher sind:

- der Rückprall des Spritzbetons;
- Spritzbetonkonstruktionen, die im späteren Verlauf des Vortriebs ausgebrochen werden (z.B. Ortsbrustversiegelung);
- Auslaugung des Spritzbetons;

4.1.7.1. Rückprall

Unter Rückprall versteht man den nicht haftenden Teil des Spritzbetons beim Auftragen auf die Tunnellaibung. Der Rückprall ist von vielen Faktoren abhängig und die Reduzierung ist eine komplexe Aufgabe. Die Reduzierung der Rückprallmenge ist aus wirtschaftlichen und umwelttechnischen Gründen anzustreben. Das Nassspritzverfahren ist das mit dem deutlich geringeren Rückprallanteil. Wichtige Faktoren beim Auftragen des Spritzbetons sind die Erfahrung des Aufbringers, die Richtung der Aufbringung, die Leistungsparameter des Spritzbüffels, die Rezeptur des Spritzbetons und die Untergrundbeschaffenheit.

Um so wenig wie möglich Rückprall zu erzeugen, wird im rechten Winkel und mit einem Abstand von 1-2 Metern aufgetragen. Schnell erhärtende Spritzbetone erzeugen mehr Rückprall. In den Versuchen von Dipl. Ing. Volker Stein zeigt sich durch die Zugabe von Micro Silika, durch die kohäsive Eigenschaft des Materials, ein besserer Rückprallwert.

Zu Beginn prallen die großen Körner vermehrt zurück, später alle gleichermaßen. Die Rückprallmenge liegt beim Nassspritzverfahren laut dem Sika Handbuch zwischen 5-15 % der aufgetragenen Spritzbetonmenge. Beim Trockenspritzverfahren liegt der Wert der Rückprallmenge zwischen 20-30 % des aufgetragenen Spritzbetons. (Höfler et al., 2012)

4.1.7.2. Spritzbetonkonstruktionen

Die Ortsbrustversiegelung wird aufgebracht um sich von der Ortsbrust ablösende Blöcke sichtbar zu machen und/oder zur Sicherung der Ortsbrust. Beim späteren Ausbruch der Ortsbrust wird Spritzbeton mit Ausbruchmaterial vermischt.

4.1.7.3. Auslaugung des Spritzbetons

Durch Rückstände von Spritzbeton im Ausbruchmaterial und dessen Auslaugung werden der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit des Ausbruchmaterials erhöht. Der lösliche Anteil des Kalkhydrats und die löslichen Salz-Ionen sind hauptverantwortlich für diesen Anstieg. Die gelösten Calcium-, Magnesium-, Natrium- und Kaliumverbindungen sind auch für die Versinterung der Tunneldrainagen verantwortlich. Einen großen Einfluss bei der Erhöhung des pH-Wertes und der Versinterung besitzen die Natrium- und Kaliumkonzentrationen, genauso wie die Ca-Ionen aus dem Zement. Die Natrium- & Kaliumverbindungen entstehen durch die Erstarrungsbeschleuniger, besonders durch die alkalihaltigen Beschleuniger. Diese Na- und Ka-Verbindungen sind besonders leicht auszulaugen. (V. Stein, 2004, S. 95–104)

Die Versuchsergebnisse aus der Dissertation von Dipl. Ing. Volker Stein zeigen eine höhere elektrische Leitfähigkeit bei alkalihaltigen Beschleunigern, als bei alkalifreien. Ebenso ist der pH-Wert im Vergleich zum alkalifreien Beschleuniger erhöht. Durch die Zugabe von Mikrosilika bei Spritzbeton werden die Werte in den Auslaugungsversuchen reduziert. Die SiO₂-Stoffe binden die Ionen, sodass die Auslaugung reduziert wird. In Österreich (ZTV ING Teil 5 Absatz 5.2.2.) ist der Einsatz von alkalihaltigen Beschleunigern aufgrund der hohen Auslaugung und aus arbeitssicherheitstechnischer Sicht (Reizung der Schleimhäute) nicht mehr erlaubt. Die Erreichung von Frühfestigkeit und Endfestigkeit stellt mit alkalifreien Beschleunigern kein Problem dar. (V. Stein, 2004, S. 95–104) In der Dissertation von Maria Thumann wurden die Einflussfaktoren der Auslaugung von Spritzbeton untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auslaugung von folgenden Faktoren abhängt:

- Klinkergehalt im Bindemittel (Zementreduktion);
- Porosität der Proben (Auffüllung durch Mikrofüller führt zu einer erhöhten Packungsdichte);
- Chemisch reaktive Zusatzstoffe (Hüttensande, Metakaolin, Feinstkalzit).

Durch die Verminderung des Zementklinkergehaltes wird die Auslaugung reduziert. Je niedriger der Wassergehalt und je weniger Poren, durch die Zugabe von Mikrofüllern (z.B. Mikrosilika), desto niedriger ist die Auslaugung. Die Grenze für immer weniger Zement und mehr Zusatzstoffe ist dann erreicht, wenn entweder die Pumpbarkeit des Spritzbetons darunter leidet, oder die Festigkeitsparameter nicht mehr erreicht werden. (Thumann, 2019) Die Auslaugung von Chromat VI spielt keine Rolle mehr, weil Grenzwerte bei der Zementproduktion gegeben sind. (ÖBV-Richtlinie, 2015)

4.1.7.4. Wiederverwertung von Spritzbeton

Die Wiederverwertung von, vom Ausbruchmaterial getrenntem Spritzbeton ist prinzipiell möglich. Ein Anteil von 10-20 % kann als Betonzuschlagstoff ohne eine Verschlechterung der Betonqualität zugegeben werden. (Höfler et al., 2012, S. 68) Herr Christoph Ehrensberger (Ehrensberger, 2021) (BeMo, Bauleitung) wies im Gespräch am 19.07.2021 darauf hin, dass: „Bei der hochkomplexen Zusammensetzung von Spritzbeton, bringt die Zugabe von Spritzbetonrückprall eine große Qualitätsunsicherheit (unbekannte Zusammensetzung des Rückpralls) und kommt deshalb nur selten zum Einsatz. Die sortenreine Trennung von Spritzbeton und Ausbruchmaterial im laufenden Vortrieb ist nicht kostendeckend umsetzbar, wenn keine Sonderpositionen in der Ausschreibung vorhanden sind.“

Wenn Spritzbeton mit Ausbruchmaterial vermischt, gelten die Grenzwerte für die verschiedenen Verwendungszwecke in Form von maximalen Volumenprozent von Spritzbeton im Ausbruchmaterial laut BAWP (BAWP, 2017, S. 264–269). Sollte der Grenzwert von 10 Volumenprozent Spritzbeton im Tunnelausbruch überschritten werden, ist die Herstellung von Recyclingbaustoffen nicht mehr gestattet. Nicht mehr als 5 % mineralische Baurestmassen sind bei der Verwendung als Verfüllungsmaterial gestattet. Derselbe Grenzwert gilt für die Deponieklasse Bodenaushubmaterial. Der häufigste Verwendungszweck von Spritzbetonresten mit oder ohne Ausbruchmaterial ist laut Ehrensberger die Verwendung als Untergrundverfüllung/Schüttmaterial.

4.2. Bentonit-Suspension

Eine Suspension ist eine Mischung aus einer festen und einer flüssigen Komponente, die miteinander ein heterogenes Stoffgemisch bilden bzw. nicht vermischbar miteinander sind. Bei einer Suspension ist eine Sedimentation im Gegensatz zur Lösung möglich (wikipedia, 2021b).

Bentonit ist ein Gemisch aus mehreren Mineralien (polymineralisches Gestein). Bentonit entsteht durch die Verwitterung von vulkanischem Gestein und Asche. Hauptbestandteil mit 60-80 % ist das Tonmineral Montmorillonit. Die restlichen 20-40 % sind Quarz, Calcit, Pyrit, Illit, Glimmermineral, Biotit und Feldspat. (Purle)

Die besonderen Eigenschaften des Bentonits ergeben sich aus den Eigenschaften des Montmorillonit. Der Aufbau von Montmorillonit setzt sich aus einem Dreier-Schichtpaket zusammen. Außen liegen die Siliziumtetraeder- und dazwischen die Aluminiumoktaederschichten. Die Oberflächen der Schichtpakete weisen eine geringe negative Spannung auf. Dies führt einerseits zu einer möglichen Anbindung von Wassermolekülen (Quellen) und andererseits dazu, dass sich die Bentonit-Suspension, durch die abstoßenden Kräfte, nicht entmischt. (Heinz, 2006, S. 5–6)

Aufgrund der Eigenschaften des Montmorillonit besitzt die Bentonit-Suspension die Eigenschaft der Thixotropie. Dies bedeutet, dass im Ruhezustand eine Verfestigung entsteht (Scherfestigkeit), die bei Bewegung der Suspension verloren geht. (Babendererde, 2017, S. 1)

Bei zu hoher Durchlässigkeit des anstehenden Bodens, im Bereich $\geq k_f = 10^{-3}$, dringt eine reine Bentonit-Suspension zu tief in den Boden ein. Zusätze (Polymere und Füllstoffe) werden verwendet um den Einsatz trotzdem zu ermöglichen. In der Arbeit von Frau Anja Heinz wird darauf hingewiesen, dass brauchbare Ergebnisse mit Bentonit, Wasser und geschreddertem Papier erreicht wurden. (Heinz, 2006, S. 1)

Laut Frau Anja Heinz sind folgende Füllstoffe in Verwendung:

- Vermex: Vermiculit ist ein Schichtsilikat, das sich mit Wasser aufbläht und zu Vermex wird.
- Papier: Besteht aus Cellulose, Füllstoffe (Kaolin, Stärke, Gips, Titanoxid). (Heinz, 2006, S. 82)

Gemäß Frau Anja Heinz sind folgende Polymere in Verwendung:

- Polyacrylamid
- PolyDADMAC
- Polyamin
- Polyethyleniminacetat. (Heinz, 2006, S. 77–79)

4.2.1. Interaktion Bentonit-Suspension mit Ausbruchmaterial

Die großen Einsatzgebiete von Bentonit-Suspensionen im Tunnelbau sind einerseits die Baugrubenverbauten mit Bohrpfahlwänden und Schlitzwänden und andererseits, der zweite große Einsatzbereich, der maschinelle Vortrieb (Slurry-Maschine), wo für die Ortsbruststützung eine Bentonit-Suspension benötigt wird. Bei der Baugrubensicherung werden nur kleine Teile der Ausbruchmasse mit der Bentonit-Suspension vermischt.

Bei Einsatz der Slurry-Maschine kommt es zu einer kompletten Vermischung der Bentonit-Suspension mit dem auszubrechenden Material. Trotz einer Separationsanlage sind die Bentonit-Suspension und das Ausbruchmaterial nicht vollständig voneinander trennbar.

4.2.2. Separationsanlage

Der Aushub, sowie die Bentonit-Suspension werden aus dem Tunnel gefördert. Danach findet eine Trennung zwischen dem Aushub und der Bentonit-Suspension statt, damit die Bentonit-Suspension wieder dem Bentonit-Kreislauf zugeführt werden kann, um Rohstoffe aus Kostengründen zu sparen.

Wenn zu viel Ausbruchmaterial in der Bentonit-Suspension ist, wird die Suspension zu dick und zu dicht. Die Separation wird durch verschiedene Stufen erreicht. In der ersten Stufe werden Partikel größer als 4 mm ausgesiebt. In der zweiten Stufe werden Hydro-Vakuum-Zyklonen verwendet um Partikel größer 20 µm zu trennen. In der letzten Stufe werden Dekanterzentrifugen/Flockungsstationen eingesetzt um Tonpartikel, die kleiner sind als 1 µm sind auszusortieren. Die Feianteile führen zur sogenannten Alterung der Bentonit-Suspension, weil die Dichte der Suspension steigt. Übrig bleiben nur die Bentonit-Partikel, weil die Partikel im Größenbereich von 5 µm liegen (Herrenknecht AG).

In der DAUB-Empfehlung zur Auswahl der Tunnelbohrmaschinen wird erwähnt, dass 5 % der Grob- und Mittelstufe Bentonitreste sind. Dies kann durch Siebung mit einer Wasserbedüsung reduziert werden.

Herr Gino Vogt (Division Manager Slurry Treatment Plants, Herrenknecht AG) erläutert am 10.6.2021, dass eine Trennung von Bentonit und Ausbruch von den geologischen Eigenschaften des Gesteins, zum Beispiel von der Rauigkeit der Oberfläche, abhängt. Die Korngrößenverteilung des Aushubmaterials ist ein entscheidender Faktor. Je feiner und je ähnlicher die Korngröße der Bentonit-Teilchen zum Ausbruchmaterial ist, desto schlechter funktioniert die Trennung. Die Trennung von Grobgut (> 4 mm) vom Bentonit wird mit einer Bedüsung durch Wasser mit 5–10 bar und den hohen Fliehkräften in der Siebanlage oder einem Waschtrommelsieb mit bis zu 9 m Länge voneinander getrennt. Eine Konzentration von nahezu 0 % Bentonit in der Kornfraktion > 4 mm sind möglich. (Vogt, 2021)

Im Sandbereich (20 µm < x < 4 mm) ist keine ideale Trennung mehr möglich. Die Trennschnitte der Zyklo sind nicht scharf genug. Nur mit sehr großem Aufwand, mit zusätzlichen Sandwaschungs- und Entwässerungssieben, ist eine Trennung möglich. Die Kosten steigen dadurch stark an. (Vogt, 2021)

Die Reste der Bentonit-Suspension werden in der Kammerfilterpresse entwässert und dann auf die Deponie gebracht. Projekte, in denen das Ausbruchmaterial für die Herstellung von Beton wiederverwendet worden ist, sind Herrn Vogt nicht bekannt.

4.2.3. Wiederverwertung von Ausbruchmaterial einer Slurry-TBM

Der Grenzwert laut DVO für die Deponieklasse Bodenaushubmaterial von 5 Volumenprozent mineralischem Fremdanteil könnte bei feinen Untergründen ein Problem darstellen. Die Verwendung als Recycling-Baustoff ist durch den Grenzwert von 30 Volumenprozent mineralischem Fremdanteil nicht gefährdet.

Das Vorhandensein von Bentonit im Ausbruchmaterial stört die Wiederverwertung von Aushubmaterial für die Herstellung von Beton. Die Abbindezeit des Betons wird verlängert und die Betonfestigkeit wird reduziert (dies wird in der Arbeit von Herrn Patrick Pratter von der Industrie berichtet). Ab welcher Bentonit-Konzentration Verschlechterungen der Betoneigenschaften auftreten, ist nicht bekannt. Das Verhältnis zwischen Bentonitanteil und der Verschlechterung der Eigenschaften, sowie die Konzentration je Fraktionsgröße, müssen ermittelt werden, bevor eine abschließende Aussage, ob der Einsatz als Betonzuschlagstoff vorstellbar ist, getätigt werden kann. Laut Herrn Christoph Ehrensberger (Ehrensberger, 2021) ist der größtmögliche Einsatz, das wirtschaftlichste und technische Best-Case-Szenario die Verwendung des Ausbruches als Füllmaterial auf der Tunnelbaustelle. Bei einem Projekt im Raum Hannover wurde laut Herrn Ehrensberger eruiert, ob das Aushubmaterial aus einer Slurry-Maschine für die Zementproduktion geeignet ist. Obwohl das Ausbruchmaterial (ohne Verunreinigungen) den technischen Standards für die Zementproduktion entsprach, wurde aufgrund der Unwirtschaftlichkeit, durch die hohen Transport- und Trennungskosten (Ausbruchmaterial von Bentonit-Suspension), dieses Vorhaben nicht verwirklicht.

4.3. Ringspaltverfüllung

Zwischen der Tunnellaubung und der Außenhaut des Tübbings entsteht ein Spalt. Dieser Spalt wird durch das Ringspaltmaterial verfüllt (wie in Abbildung 19 dargestellt). Der Tunnelring wird durch das Material eingebettet und ermöglicht somit die Kraftübertragung von der Schale auf das Gebirge. Unter Wasserdruck, bei einem einschaligen Ausbau, dient die Ringspaltverfüllung auch zur Abdichtung des Tunnels. (Maidl et al., 2020, S. 32)

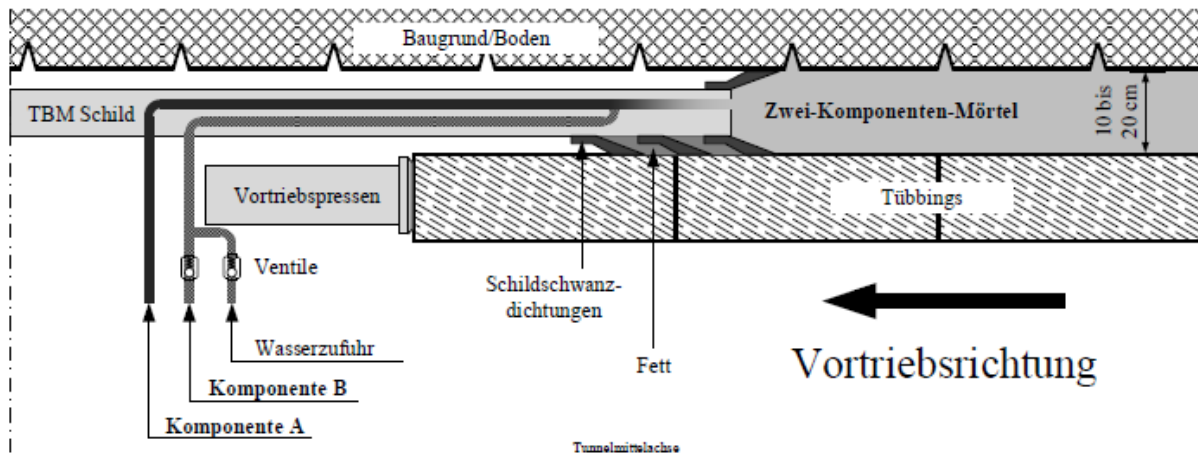


Abbildung 19: Ablauf Ringspaltverfüllung mit Zwei-Komponenten-Mörtel (Schulte-Schrepping, 2020, S. 32)

Die verschiedenen Ringspaltmaterialien lassen sich in drei Kategorien zusammenfassen:

- Perlkies
- Ein-Komponenten-Mörtel
- Zwei-Komponenten-Mörtel.

4.3.1. Perlkies

Perlkies wird bei Festgestein verwendet und führt zur sofortigen Bettung. Er wird eingesetzt, wenn nur eine Kraftübertragung notwendig ist. Perlkies besteht aus gewaschenem und zu 95 % Prozent gerundetem Kies mit einem Körnungsdurchmesser zwischen 4-16 mm (ohne Feinkornanteil). Mithilfe von Druckluft wird der Perlkies eingeblasen. Bei drainierten Tunnelbauwerken und der Gefahr der Versinterung der Rohre ist auf den Calciumcarbonat-Gehalt (CaCO_3) zu achten. Die Nachverpressung mit einer Zementsuspension, zur Herstellung der dauerhaften Bettung ist möglich. (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik [ÖVBB], 2011, S. 62–63)

4.3.2. Ein-Komponenten-Mörtel

Der Ein-Komponenten-Mörtel lässt sich in verschiedene Kategorien aufteilen. Das Kategorisierungsmerkmal ist der Zementgehalt. Der Zementgehalt liegt zwischen zementfrei und über 200 kg/m^3 . Die Verfestigung erfolgt deshalb entweder aufgrund der Hydratation des Zementes oder durch die druckbedingte Entwässerung. Zementfreie Mörtel sind nur bis zu einer Durchlässigkeit des Untergrundes von $k_f \geq 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ anwendbar. Das Ziel des Ringspaltmaterials bleibt die Ermöglichung der schnellen Kraftübertragung und Bettung. Für diesen Zweck werden folgende Bestandteile im Ein-Komponenten-Mörtel verwendet:

- Zement
- Wasser
- Gesteinskörnung (Kies/Sandbereich $\leq 8 \text{ mm}$)
- Bentonit (Zugabe für die Verarbeitbarkeit)
- Flugasche (Zugabe für die Verarbeitbarkeit)
- Gesteismehl (Zugabe für die Verarbeitbarkeit). (Schulte-Schrepping, 2020)

4.3.3. Zwei-Komponenten-Mörtel

Zwei-Komponenten-Mörtel sind individuell auf ein Projekt anpassbar. Die Zusammensetzung kann stark variieren. Beide Komponenten sind flüssig und gut mit der Pumpe förderbar. Wenn die Vermischung in der Verpressleitung im Schild stattfindet (siehe Abbildung 19, S.31), bildet sich sofort ein gelartiges Material. Danach weist der Mörtel ähnliche Eigenschaften wie der Ein-Komponenten-Mörtel auf. Die Komponente A ist ähnlich wie eine Zementsuspension aufgebaut. Zusätzlich enthält sie Verzögerer, um die Hydratation des Zements zu verhindern. Andere Zusatzstoffe werden zugegeben um die Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit zu gewährleisten. Folgende Stoffe sind in der Komponente A enthalten:

- Wasser
- Zement
- Verzögerer
- Bentonit
- Flugasche
- Hüttensande. (Schulte-Schrepping, 2020, S. 11)

Die Komponente B besteht in der Regel aus einem Aktivator, um den Erstarrungsbeginn zu starten, und Wasser. Im Gemisch laufen zwei unterschiedliche Prozesse ab. Der erste Prozess ist die physikalische Aktivierung. Die physikalische Aktivierung ist für die Frühfestigkeit (Gelfestigkeit) verantwortlich. Bei der physikalischen Aktivierung wird mit Hilfe von superabsorbierenden Polymeren (SAP) eine Entwässerung des Ringspaltmaterials erreicht. Dies führt zur schnellen Zunahme der Viskosität. Aus dem Ringspaltmaterial bildet sich schlagartig ein gelartiger Körper. (Schulte-Schrepping, 2020, S. 44–48)

Der zweite Prozess ist für die Endfestigkeit des Materials verantwortlich. Die Endfestigkeit beruht zum großen Teil auf dem Prozess der alkalischen Aktivierung. Durch den alkalischen Aktivator werden Löse- und Reaktionsprozesse mit den latent-hydraulischen und puzzolanischen Stoffen in der Komponente A ausgelöst. Die eingesetzten alkalischen Aktivatoren sind:

- Alkalihydroxide (MOH)
- Aluminate ($M_2O \cdot nAl_2O_3$)
- Alumosilikate ($M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$)
- Alkali-Silikate ($M_2O \cdot nSiO_3$) (Wassergläser). (Schulte-Schrepping, 2020, S. 39–44)

4.3.4. Interaktion von Ringspaltmaterial mit dem Ausbruchmaterial

Das Ringspaltmaterial kommt mit dem Ausbruchmaterial bei idealen Einsatzbedingungen nicht in Kontakt. Die Schildschwanzdichtungen (Bürsten) an der Außenseite verhindern die Interaktion mit dem Ausbruchmaterial. Durch die Abweichung von den geplanten Bedingungen, zum Beispiel bei einer zu geringen Deformation (zu große Überschneidung), oder durch die Abnutzung der Bürsten (die Bürsten schließen nicht mehr ordentlich mit dem Gebirge ab), kann Ringspaltmaterial in die Abbaukammer gelangen und sich dort mit dem Ausbruchmaterial vermischen.

4.3.5. Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung von Ausbruchmaterial

Bei planmäßiger Umsetzung gelangt wenig Ringspaltmaterial in das Ausbruchmaterial. Der Grenzwert von 5 Volumenprozent von Baurestmassen in der Deponiekategorie Bodenaushubmaterial wird nicht überschritten werden und somit hat das Ringspaltmaterial im Ausbruchmaterial keine rechtlichen Auswirkungen bei der Deponierung. Laut BAWP steht einer Verwertung des Ausbruchmaterials durch das Ringspaltmaterial nichts im Wege. Ob für einen industriellen Verwertungszweck Auswirkungen bestehen, muss im Einzelfall geprüft werden.

4.4. Anker

Unter Anker oder Gebirgsanker wird im Tunnelbau jedes Objekt verstanden, das in ein Bohrloch gegeben wird um Zug- und Schubkräfte aufzunehmen. In der NATM spielen Anker eine entscheidende Rolle für die Sicherung und Stabilität des Gebirges. Sie dienen zur Absicherung von Blöcken und erhöhen die Gebirgsfestigkeit. Die Wirkung der Anker kann bei der Berechnung vereinfacht als Erhöhung der Kohäsion dargestellt werden. Unterscheidungsmerkmale bei Ankern:

- Verwendungszweck
- Wirkungsmechanismen
- Länge
- Einsatzdauer
- Einbaustelle
- Art des Gebirges
- Vorspannung
- Art des Verbunds (mechanisch, chemisch, physikalisch). (Kainrath-Reumayer & Dolsak)

4.4.1. Verwendete Materialien bei Ankern

Das Zugglied des Ankers besteht, abgestimmt auf die Erfordernisse, entweder aus Stahl oder aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Der Einsatzbereich von GFK-Ankern beschränkt sich auf den Einsatz als Ortsbrustanker. Ein entscheidender Vorteil ist die leichte Rückschneidbarkeit des Ankers. Für die anderen Bereiche werden verschiedene Stahlliegierungen bevorzugt.

Glasfaserverstärkte Kunststoffe sind eine Mischung von Kunststoff und Glasfasern. Für die Komponente Kunststoff können sowohl duroplastische Kunststoffe (Polyesterharz, Epoxidharz) als auch thermoplastische Kunststoffe (Polyamid) verwendet werden. Der Werkstoff bietet eine hohe Bruchdehnung und ist relativ preisgünstig. Als Entsorgungsmöglichkeit kann der Werkstoff als Ersatzbrennstoff bei Zementwerken dienen. (Wikipedia, 2021b)

4.4.2. Verwendete Materialien beim Verbund

Der Verbund wird je nach Ankerart unterschiedlich hergestellt. Bei Swellex-Ankern erfolgt die Herstellung des Verbundes durch die Reibung zwischen dem Gebirge und dem Stahlanker selbst. Es werden keine Materialien injiziert. Bei den anderen Verfahren wird meist ausinjiziert. Dort wird der Verbund mit dem Gebirge entweder durch Zementankermörtel oder durch Kunstharzpatronen hergestellt.

4.4.2.1. Mörtel als Verbundmaterial

Die Aufgabe des Mörtels ist es schnell den Verbund zwischen Zugglied und Gebirge herzustellen. Benötigt werden kurze Abbindezeiten, weil auch das Material über Kopf eingebracht wird. Die wichtigsten Bestandteile sind Zement, Wasser, Zuschlagstoffe, sowie Zusatzstoffe (siehe dazu Kapitle 4.1).

4.4.2.2. Kunstharzmörtel als Verbundmaterial

Der Kunstharzmörtel besteht aus einem Harz und einem Härter. Harz und Härter werden durch das Aufbohren miteinander vermischt. Sie erreichen eine schnellere Aushärtung als Ankermörtel. Die verschiedenen Kunststoffharze sind:

- ungesättigtes Polyesterharz (UP)
- Methacrylatharz
- Epoxidharz. (Wikipedia, 2018)

Als Härter kommen zum Einsatz:

- Peroxide (bei Polyester und Methacrylatharz)
- Polyamine (bei Epoxidharz). (Wikipedia, 2018)

Kunstharzpatronen werden für Daueranker verwendet und bringen somit keine Verunreinigung in das Ausbruchmaterial mit ein.

4.4.3. Interaktion mit Ausbruchmaterial

In den überwiegenden Fällen werden Anker zur Sicherung des Hohlraumes rund um den Hohlraum in das bestehenbleibende Gebirge eingebracht. Dort kommt es grundsätzlich zu keiner Interaktion mit dem auszubrechenden Material.

Bei den Ortsbrustankern ist dies nicht der Fall, dort kommt es zu einer Vermischung und die Auswirkung auf das Ausbruchmaterial ist zu berücksichtigen.

4.4.4. Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung von Ausbruchmaterial

Die Stahlanker oder GFK-Anker werden direkt beim Lösen vom Ausbruchmaterial getrennt oder später durch einen Magnet aussortiert. Die Stahlanker können als Schrott wiederverwendet werden. Die GFK-Anker sind als Ersatzbrennstoff wiederverwertbar. Der Mörtel für den Verbund gelangt in das Ausbruchmaterial. Damit keine Einschränkungen bei der Deponierung sowie beim Recycling als Baustoff drohen, muss das Volumen der mineralischen Baurestmassen unter 5 % bleiben. Bei den üblichen Ankerrastern und der dadurch benötigten Mörtelmenge wird der Grenzwert nicht überschritten.

4.5. Injektionen

Bei Injektionen werden natürliche oder künstliche Hohlräume mit oder ohne Druck verfüllt. Das Ziel einer Injektion ist die Veränderung folgender Eigenschaften eines Untergrundes:

- Die Durchlässigkeit des Körpers soll verringert werden.
- Die Festigkeit des Bodens soll erhöht werden.
- Die Hohlräume sollen verfüllt werden. (Schnitter, 1968, S. 96)

Die wichtigsten Voraussetzungen, die für eine erfolgreiche Injektion ausschlaggebend sind:

- die Bodeneigenschaften (Fels oder Lockergestein)
- die Eigenschaften des Injektionsgutes
- die Einbringungsbedingungen (Druck und Geschwindigkeit). (Schnitter, 1968, S. 96)

Injektionen werden unterteilt in Injektionen mit Baugrundverdrängung (Verdichtungs- und Kompensationsinjektion) und Injektionen ohne Baugrundverdrängung. Die Unterteilung der verschiedenen Verfahren laut EN 12175 ist in Abbildung 20 zu sehen:

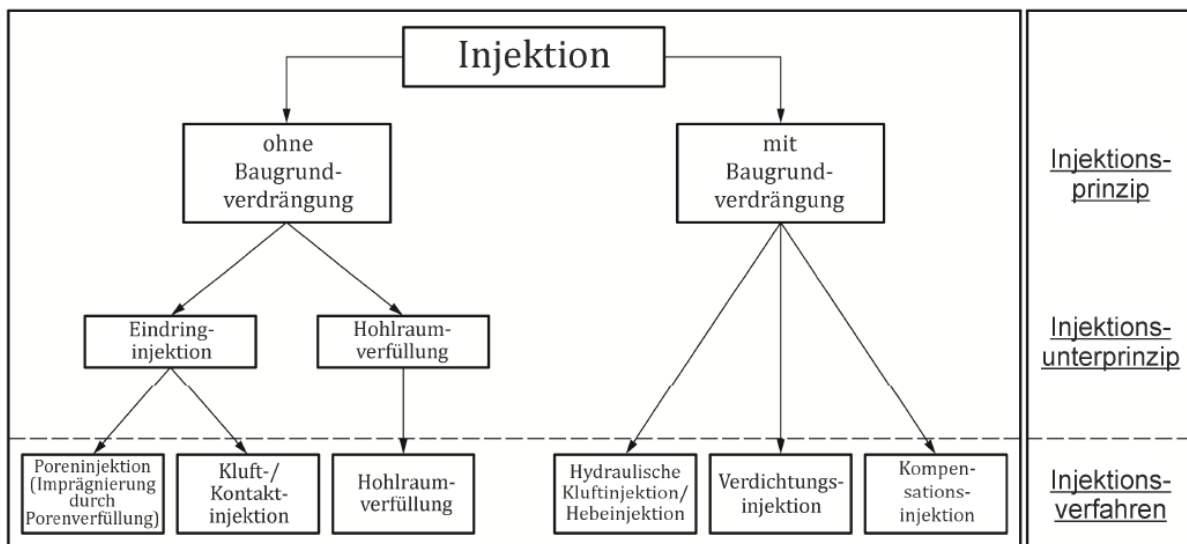


Abbildung 20: Injektionsverfahren nach ÖNORM EN 12715

Eine weitere Unterteilung der Injektionen erfolgt aufgrund der Bodenart:

- Fels-Injektion
- Boden-Injektion.

Das Ziel der Fels-Injektion ist die Verschließung von Klüften und somit die Reduzierung der Durchlässigkeit eines Felsens. Dafür bietet sich die Zementsuspension an. Eine Verfüllung oder Verpressung mit Zementsuspension ist nur bei einer Kluftbreite von über 0,2 mm möglich. Die Zementsuspension führt sonst, durch die Korngröße der Zementpartikel, zur Verstopfung der Klüfte. (Schnitter, 1968)

Für die Verteilung des Materials spielt die Kluftgeometrie (Richtung, Abstand, Weite, Verbundenheit) eine große Rolle. Laut EN 12715 kommen für die Fels-Injektion die Verfahren: Hohlraumverfüllung bei größeren Hohlräumen (zum Beispiel im Karstgebiet) und die Kluft-/Kontaktinduktion bei Klüften zum Einsatz. (Europäisches Normungsinstitut, 2021)

Bei Lockergestein werden Poreinjektionen angewandt, welche ohne eine Bodenverdrängung bis zu einer bestimmten Korngröße (Sand-/Schluffgrenze) funktionieren. Mithilfe von chemischen Injektionsmaterialien und Bentonit-Suspensionen sind Injektionen mit kleineren Korngrößen, als im Sandbereich, möglich. (Schnitter, 1968)

Unter diesem Korngrößenbereich (< 0,02 mm) ist eine Injektion nur mit Bodenverdrängung möglich. Zu diesen Verfahren gehört einerseits die hydraulische Rissbildung, bei der sich

neue Risse und Poren bilden und diese sofort verfüllt werden. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt und führt zur Erhöhung der Festigkeit. (Lazarova, S. 13–17)

Ein anderes Verfahren ist die Verdichtungsinjektion, die das umliegende Material, mithilfe des Injektionsmaterials durch Verdrängung verdichtet.

Eine besondere Methode stellt das Düsenstrahlverfahren oder Hochdruckinjektionsverfahren (HDI) dar. Durch die komplette Zerstörung der Bodenmatrix gehört das Düsenstrahlverfahren nicht zur klassischen Injektionstechnik (siehe dazu Kapitel 4.6). (Lazarova, S. 13–17)

Die Mittel, die als Injektionsmaterial verwendet werden, richten sich nach der jeweiligen Korngrößenverteilung des Bodens. In Abbildung 21 von Kolymbas Dimitrios sind die Anwendungsbereiche dargestellt. Im Schluff- und Ton-Bereich sind nur mehr HDI-Verfahren möglich.

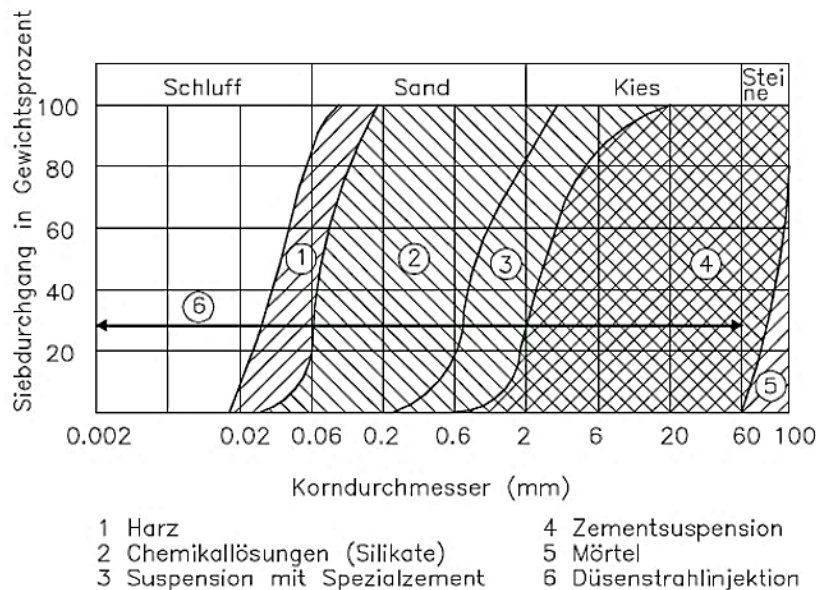


Abbildung 21: Anwendungsbereiche von Injektionsmitteln (Kolymbas, 2011, S.379)

4.5.1. Injektionen als Abdichtung

Bei einer Injektion wird die Durchlässigkeit immer durch das Füllen des Porenraumes verringert. Die Festigkeit muss sich aber nicht immer erhöhen. Beim Tunnelbau werden folgende Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Abdichtung eingesetzt:

Dichtsohle

Verhindert das Eindringen von Grundwasser in die Baugrube. Verwendung findet dieses Verfahren bei der offenen Tunnelbauweise, wo eine Grundwasserabsenkung nicht möglich ist und deshalb eine dichte Baugrube gebaut wird.

Abdichtung beim Tunnelvortrieb

Wassereintritte beim Vortrieb sind durch geeignete Maßnahmen zu verhindern bzw. zu vermindern bis ein wirtschaftlicher Vortrieb möglich ist. Ob Injektionsmaßnahmen in der geschlossenen Bauweise notwendig sind, hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- hydrologische Verhältnisse
- geologische Verhältnisse
- Höhe des Wasserdruckes
- Bauweise
- Tunnelnutzung. (Lazarova, S. 67–69)

Die Ausbildung eines Injektionsschirmes kann eine Abdichtung bewältigen. Eine vorausseilende Injektion wird notwendig, wenn hoher Wasserdruck und große Wassermengen drohen und eine Grundwasserabsenkung nicht realisierbar ist. Dies tritt in Störungszonen auf. In der Planung ist festzulegen welches Raster, Länge und Richtung die Injektionen aufzuweisen haben. Im Allgemeinen wird ein Injektionsschirm rund um den Tunnel „Injektionszwiebel“, wie in Abbildung 22 dargestellt, gebildet. Auch Bereiche, die später gefördert werden, werden injiziert und die Injektionsmittel sind somit bei der Wiederverwertung des Ausbruchmaterials zu berücksichtigen. (Lazarova, S. 67–69)

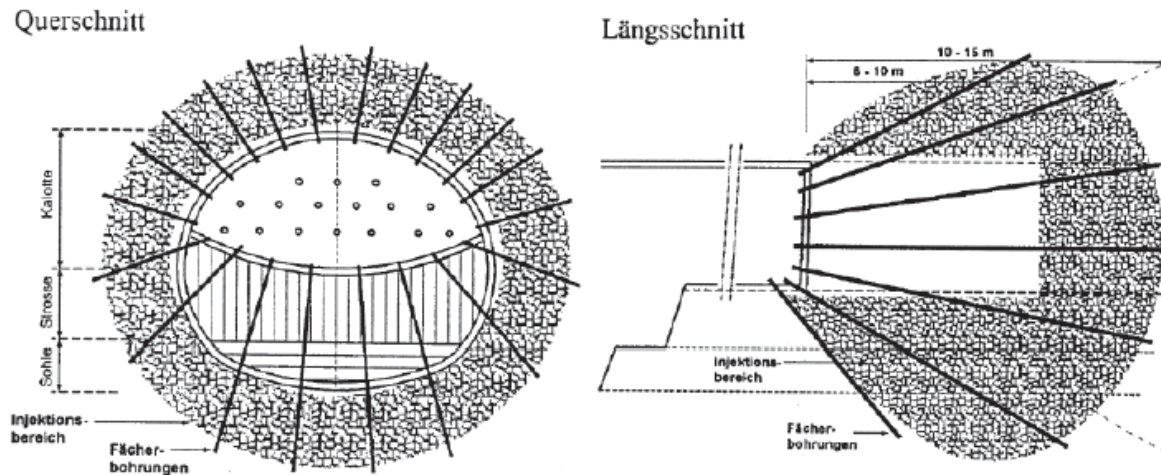


Abbildung 22: Injektionsschirm für Abdichtung (Girmscheid, 2008, S. 263)

Quellendes Gebirge

Bei Problemen mit quellendem Gebirge (Anhydrit und Ton) wird versucht das Wasser fern zu halten und den Boden nicht aufquellen zu lassen, damit kein Sohlldruck, der die Innenschale zerstört, entstehen kann. Im unberührten Zustand besitzen quellfähige Gebirgsformationen eine geringe Wasserdurchlässigkeit, wodurch der Quellvorgang gestoppt wird. Durch den Vortrieb des Tunnels kommt es aber zu Spannungsumlagerungen und zur Auflockerung rund um den Tunnel, was wiederum die Durchlässigkeit erhöht. Um den Wasserzutritt aus umliegenden Formationen entlang der Tunnelachse zu verhindern, werden Abdichtungsbauwerke errichtet. Diese bestehen aus Injektionen rund um den Tunnel, die die Wasserläufigkeit entlang der Tunnelachse verhindern sollen. (Wittke & Wittke, 2014)

4.5.2. Injektionen für die offene Bauweise

Die offene Bauweise bietet eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für Injektionen. Einerseits zur Baugrubensicherung andererseits zur Abdichtung von Wand und Sohle (siehe dazu Kapitel 2.1):

- Injektionswand mit Düsenstrahlverfahren oder Manschettenrohrverfahren
- Injektionssohle (Hoch- und Tiefsohle)
- Bohrpfahlwand. (Lazarova, S. 97–105)

4.5.3. Injektionen zur Verfestigung

Zur Verfestigung wird nicht nur Injektionsmaterial eingebracht, oft wird das Injektionsmaterial mit Stahlgliedern (Anker) kombiniert. Grundsätzlich können somit auch viele Ankerarten zu den Injektionen gezählt werden (siehe dazu Kapitel 4.4). Auch die räumliche Verteilung kann variieren. Vom Einbringen rund um den Tunnel, oder nur im Gewölbereich ist alles möglich. Laut Lazarova werden im Tunnelbau folgende Injektionsmethoden (außer Anker) zur Gewölbesicherung eingesetzt:

- Gebirgsinjektionen (nur Injektionsmaterial kein Stahlglied)
- HDI-Schirme (siehe Kapitel 4.6)
- Spieße
- Rohrschirme.

4.5.3.1. Gewölbesicherung mittels Spieße

Die Gewölbesicherung mittels Spieße findet Anwendung, wenn im Arbeitsbereich an der Ortsbrust die Gefahr von herunterfallenden Blöcken besteht. Befinden wir uns im Lockergestein werden Selbstbohranker verwendet, die nach der Bohrung ausinjiziert werden. Bei Festgestein werden hingegen SN-Anker verwendet. Die Einbaulänge der Spieße beträgt, abhängig von der Geologie, 3-5 m. (Lazarova, S. 112–113)

4.5.3.2. Gewölbesicherung mittels Rohrschirm

Bei wenig standfesten Lockergestein-Geröllfeldern werden, zur Absicherung eines kaminartigen Versagens, Stahlrohre mit einer Länge von 12-20 m in Längsrichtung in die Firste eingebracht. In den Rohren sind Löcher vorhanden, die eine Ausinjizierung durch die Rohre ermöglichen. Der Druckbereich liegt bei ca. 3-7 bar und als Injektionsmittel dient Zementsuspension. (Lazarova, S. 113–114)

Weitere Einsatzbereiche für Injektionen: Nachinjektionen, Rissabdichtungen, Firstspaltverpressung, Injektionsschleier. Diese führen zu keiner Vermischung mit späterem Ausbruchmaterial und besitzen somit keine Auswirkungen auf die Wiederverwertung.

4.5.4. Verwendete Materialien bei Injektionen

Die Wahl, welches Injektionsmaterial eingesetzt wird, hängt von der Kluft und der Porengröße des Festgesteins oder von der Korngrößenverteilung des Bodens ab (siehe dazu Abbildung 21). Das Injektionsmaterial für die gröberen Bereiche (Mörtel- / Zementinjektion) ist preislich deutlich günstiger.

Wichtige Eigenschaften für die problemlose Durchführung eines Injektionsvorganges sind das Fließverhalten, das Durchdringungsvermögen und die Reaktionszeit des Injektionsstoffes. Diese Parameter sind wiederum von der Viskosität und der Kohäsion abhängig und müssen exakt bestimmt werden. (Lazarova, S. 26–28)

4.5.4.1. Zement-Suspension

Eine Suspension ist eine Flüssigkeit mit fein verteilten Feststoffen. In der Zement-Suspension befinden sich Zement, Ton, Bentonit und weitere Zusatzstoffe (Verflüssiger, Abbindebeschleuniger, Abbindeverzögerer und luftporenbildende Mittel (siehe dazu Kapitel 4.1). (Lazarova, S. 29)

Die Eigenschaften, die für eine Zement-Suspension relevant sind, sind das Fließverhalten, die Festigkeit nach der Erhärtung, die Erhärtungszeit und die Stabilität der Suspension. Der W/Z-Wert besitzt großen Einfluss auf das Fließverhalten. Mit einer Erhöhung des W/Z-Wertes wird die Fließfähigkeit verbessert. Andererseits wird durch diese Erhöhung die Endfestigkeit reduziert (Lazarova, S. 29). Laut Donel liegt der durchschnittliche W/Z-Wert im Bereich von 0,7-2,0. (Donel, 1995)

Für die Reaktionszeit und die Stabilität der Suspension ist die Korngröße des Zements ein ausschlaggebender Parameter. Die Stabilität wird in der EN 12715 durch die Sedimentationsgeschwindigkeit der Suspension beschrieben. Zum Einhalten des Grenzwertes für die Stabilität der Zement-Suspension wird in den meisten Fällen Bentonit als Zusatzstoff zugegeben.

4.5.4.2. Silikatgele (Chemikallösungen)

Silikatgel besteht aus in Wasser gelöstem Natriumsilikat (Wasserglas) und einem Härter, der aus organischem oder anorganischem Material bestehen kann. Der Härter, der zum Einsatz kommt, kann Salzsäure (MgCl, CaCl, NaCl) sein. Aufgrund der Aushärtungsendhärte lassen sich Hartgel und Weichgel unterscheiden. Das Weichgel dient nur zur Abdichtung. Das Hartgel erhöht die Stützfestigkeit. Wegen der toxischen Wirkung auf Pflanzen werden diese Chemikallösungen nur mehr sehr selten zum Einsatz gebracht. (Lazarova, S. 31)

4.5.4.3. Kunstharz-Injektionen

Der Einsatzbereich für Kunstharzinjektionen liegt durch die geringe Viskosität und die gute Fließeigenschaft, wie in Abbildung 21 dargestellt, im schluffigen Bereich. Sie werden eingesetzt um die Durchlässigkeit zu verringern, sowie die Festigkeit des Bodens zu verbessern. Grundsätzlich wird unterschieden in Ein- oder Zwei-Komponenten-Mischungen. Ein-Komponentenharze reagieren mit dem im Boden vorhandenen Wasser. Im Gegensatz zum Zwei-Komponentenharz, wo durch die Zugabe von einem Härter die Harze erstarren (Lazarova, S. 31–33). In der EN 12715 sind folgende Harze für Injektionen eingetragen:

- Silikatharz
- Acrylharz
- Polyurethanharz.

Silikatharze

Silikatharz sind aus zwei Komponenten aufgebaut. Wie beim Silikatgel besteht die erste Komponente aus Wasserglas. Die zweite Komponente ist das polyfunktionelle Isocyanat. Aufgrund der Rezeptur bildet sich einerseits entweder ein geschäumter oder unaufgeschäumter Festkörper. Silikatharze und Silikatharzschaume eignen sich besonders gut, wenn neben der Abdichtung auch die Festigkeit erhöht werden soll. Die giftige Komponente Isocyanat bildet bei der Vermischung Polyharnstoff und ist somit nicht mehr wasserlöslich und nicht mehr schädlich. (D. Stein, 1999; Wittke & Wittke, 2014)

Acrylharz/Acrylatgel

Acrylatgel wird durch eine Zwei-Komponenten-Mischung hergestellt. Als Grundstoff des Gels dient die Acryl- und Methacrylsäure. Als Katalysator und als Initiator wird Natriumpersulfat und Triethanolamin (TEAG) verwendet. Eine Erhärtung tritt nach wenigen Sekunden bis einige Stunden je nach Mischung ein. Die Bildung von Weichgelen und Hartgelen ist möglich. Das eingebrachte Wasser wird in dem Gel fest gebunden. Ein Austausch mit einer Kunststoff-Dispersion ist möglich, was eine Verbesserung des Verbundes und der Viskosität mit sich bringt. (D. Stein, 1999; Wittke & Wittke, 2014)

Polyurethanharze

Polyurethanharze sind für Ein- oder Zwei-Komponenten-Injektionen. Bei der Ein-Komponenten-Injektion dient das natürlich vorkommende Wasser als Reaktionsmittel. Bei Zwei-Komponenten-Injektionen wird die erste Komponente Polyol als Polymerbasis verwendet. Die zweite Komponente Isocyanat dient als Härter. Sowohl Harze als auch Schäume sind mit unterschiedlicher Konzentration möglich. Das Anwendungsgebiet liegt bei größeren Hohlräumen und dient dort zur Abdichtung und Verfestigung. (D. Stein, 1999; Wittke & Wittke, 2014)

Die Kunstharze, die für die Bodenverbesserung verwendet werden, müssen Versuchen unterzogen werden, um die Umweltverträglichkeit zu prüfen. Einerseits sind die Auswirkungen auf das Grundwasser zu prüfen und Versuche für die Ökotoxizität mit Algen, Leuchtbakterien und Danphien (wie in Kapitel 4.7.10) durchzuführen. (URETEK Injektionstechnik GmbH)

Laut der Firma Uretek sind die Harze ein dauerhafter Kunststoff und werden nach der Erhärtungsphase nicht mehr ausgewaschen und stellen keine unmittelbare Gefahr für die Ökologie dar.

4.5.5. Interaktion mit Ausbruchmaterial

Generell werden Injektionen nur in Teilbereichen der Tunnelstrecke eingesetzt. Bei den unterschiedlichen Injektionsverfahren/-methoden sieht nur ein geringer Anteil eine planmäßige Injektion des Ausbruchquerschnittes vor. Ein Anwendungsfall, bei der die Injektion auch im aufzubrechenden Querschnitt verwendet wird, ist die Injektionszwiebel. Eine mögliche Vermischung in den Randbereichen, durch ungenaue Steuerung oder Wegigkeiten im Gebirge, ist zu beachten.

4.5.6. Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung von Ausbruchmaterial

Wird der Grenzwert von 5 Volumenprozent mineralischer Baurestmassen und einem Volumenprozent organischer Fremdanteil (Kunststoff) im Ausbruchmaterial eingehalten, gibt es keine rechtlichen Auswirkungen, weder auf die Verwertung noch Deponierung des Aushubmaterials. Bei einer geogenen Eignung des Ausbruchmaterials als Recyclingbaustoff (HG- und HU-Gesteinskörnung) stellen Werte unterhalb des Grenzwertes von Zementsuspension kein Hindernis dar.

In der Literatur wurde kein Beispiel gefunden, wo Ausbruchmaterial mit Kunststoffinjektionen als Recyclingbaustoff verwendet wurde. Dieses Ausbruchmaterial wird in der Regel deponiert. Beim Semmeringbasistunnel wurde laut Herrn Wolfgang Bacher (3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH), um den Vortrieb mit einer Hartgesteinsmaschine in einer Störungszone zu ermöglichen, eine Kunststoffinjektion mit einer Zwei-Komponenten-Silikatharz-Mischung durchgeführt. Die Injektion wurde, der TBM vorseilend, im Firstbereich eingebracht. Die Injektion erfolgte durch vorgesehene Schlitze im TBM-Schild, aus der TBM-Maschine heraus. Aufgrund der geringen Menge der Fremdanteile, die Grenzwerte wurden nicht erreicht, und weil der Kunststoff in seiner verfestigten Form keine unmittelbare Gefahr für die Ökologie darstellt, wurde die Deponierungsklasse durch die Kunstharz-Injektion nicht verändert. (Bacher, 2021)

Ab 1 Volumenprozent organischer bodenfremder Bestandteile sind ALSAG-Gebühren fällig. Zur Wiederverwertung von Kunstharz-Bodengemischen gibt es keine Literatur. Aus technischen und besonders wirtschaftlichen Gesichtspunkten scheint die Verwertung nicht möglich. Eine Trennung von Bodengemisch und Kunstharz müsste erfolgen, was technisch schwierig umzusetzen ist. Erschwerend kommt hinzu, dass ausgehärtete Kunstharze zurzeit noch nicht technisch wiederverwertbar sind. (Wehnert, 2019) Daher sind Kunstharz-Injektionen nur in Ausnahmefällen anzuwenden.

4.6. Düsenstrahlverfahren / HDI (Hochdruckinjektionen)

Hochdruckinjektionen kommen bei seicht liegenden Tunneln, sowie bei Tunneln mit hohem Wasserdruck zum Einsatz, um die Stabilität und Dichtheit des Untergrundes zu verbessern. Das Material wird mit einer Stahllanze eingebracht, die später drehend wieder gezogen wird. (Lazarova, S. 114–118). Dieses Verfahren läuft laut der Bauer Maschinen GmbH wie folgt ab: Mit hohem Druck, entweder durch das Medium Wasser oder Luft wird der Boden aufgeschnitten und danach mit einer Bindemittelsuspension vermischt. Mit im Verhältnis kleinen Bohrungen (ca. 15 cm) können große Durchmesser an Bodenkörpern verbessert werden. Hochdruckinjektionen haben einen sehr großen Anwendungsbereich und sind von bindigen bis zu nicht bindigen Böden möglich. (Bauer Maschinen GmbH, 2021)

Verwendung findet das Düsenstrahlverfahren im Tunnelbau bei:

- Schirminjektionen
- Dichtwänden
- Dichtsohlen.

Der erste Schritt im Arbeitsablauf ist bei allen Verfahrens-Varianten gleich. Eine Bohrung wird bis zur Endtiefe abgeteuft. Im nächsten Schritt wird das Rohr drehend gezogen, während mit hohem Druck, durch eine seitlich montierte Druckdüse, unterschiedliche Flüssigkeiten eingebracht werden, um den Boden spiralförmig aufzuschneiden. Gleichzeitig wird der entsprechende Hohlraum mit Bindemittelsuspension verfüllt. (Bauer Maschinen GmbH, 2021)

Vier verschiedene Verfahren stehen laut EN 12716 zur Verfügung. Der Unterschied der verschiedenen Verfahren besteht in den verschiedenen eingebrachten Flüssigkeiten, sowie in der Anzahl der Phasen (Arbeitsschritte). Die Auswahl erfolgt abhängig vom jeweiligen Bodentypen.

1-Phasensystem: Das Aufschneiden und die Verfüllung erfolgen mit derselben Bindemittelsuspension.

2-Phasensystem: Das Aufschneiden des Bodens erfolgt entweder mit Luft oder mit Wasser (Verfahren 2 und 3). Danach wird mit der Bindemittelsuspension verfüllt.

3-Phasensystem: Das Aufschneiden des Bodens erfolgt mit Luft und Wasser. Danach wird mit der Bindemittelsuspension verfüllt. (Europäisches Normungsinstitut, 2001)

Zur Festlegung der Parameter der Anlage, sowie zur Feststellung des Injektionsergebnisses müssen Probeinjektionen stattfinden. Anhand der ausgegrabenen Probesäulen lassen sich dann Festigkeit und erzielter Durchmesser im Realfall feststellen und notwendige Veränderungen an den HDI-Parametern festlegen. Einfluss auf den erzielbaren Durchmesser haben:

- Lagerungsdichte
- Bodenart
- und HDI-Parameter. (Bauer Maschinen GmbH, 2021)

4.6.1. Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung von Ausbruchmaterial

Durch die Verdrängung des Bodenmaterials (hoher Volumengehalt an mineralischen Baurestmassen) werden die Grenzwerte für die Bodenaushubdeponie sowie für die Verwertung als Recyclingbaustoff oder Verfüllungsmaterial überschritten. Die Deponierung auf der Baurestmassendeponie ist möglich.

Bei der Tunnelbaustelle Wasserkraftanlage Öztaler Ache (Baulos 4: Druckstollen Tumpen-Habichen) wurde laut Herrn Christoph Ehrensberger der Portalbereich mit einer HDI ausinjiziert. Der Injektionskörper, der durch den späteren Vortrieb gelöst wurde, wurde als Betonabbruch eingestuft. Das Ausbruchmaterial findet deshalb vor Ort als Verfüllungsmaterial Verwendung. Die Klassifizierung (Schlüsselnummer) entscheidet, ob eine Verwertung möglich ist.

4.7. Bodenkonditionierungsmittel

Bodenkonditionierungsmittel werden bei EPB-Maschinen eingesetzt, um die Eigenschaften des vorhandenen Bodens zu ändern, sodass die Stützung der Ortsbrust möglich ist. Durch diese Mittel können Eigenschaften erreicht werden, bei denen die Abbaukammer vollgefüllt ist, der Drehwiderstand nicht zu hoch ist und die Werkzeuge keinen zu hohen Verschleiß erfahren. Damit ein störungsfreier Vortrieb möglich ist, müssen die geomechanischen Eigenschaften des Untergrundes in folgenden Punkten an die Idealbedingungen für ein Erddruckschild angepasst werden:

- die Fließeigenschaft
- die Wasserdurchlässigkeit
- die Kompressibilität des Stützmediums
- die Verringerung der Reibung
- die Homogenität des Bodens. (Maidl et al., 2020)

Die Fließeigenschaften werden mit dem Setzmaß nach DIN EN 12360-2 bestimmt. In der Literatur wird ein Setzmaß von 10-20 cm als idealer Wert angesehen.

Die Bodenkonditionierungsmittel lassen sich in fünf Gruppen aufteilen, die jeweils ihren eigenen Aufgabenbereich besitzen:

- Schäume
- Anti-Ton-Additive
- Polymere
- Wasser
- Feinstoffsuspension.

4.7.1. Schäume

Die Aufgabe von Schäumen ist eine Homogenisierung und Plastifizierung des Bodens zu erreichen. Die dadurch vorhandenen Luftblasen regeln auftretende Druckschwankungen. Darüber hinaus werden die Abrasion und das Drehmoment reduziert. (Egli & Langmaack, 2008)

Für die Bodenkonditionierung kommen physikalische Schäume zum Einsatz, die unmittelbar nach der Herstellung den maximalen Schaumfaktor aufweisen und ab diesem Moment der sukzessive Zerfall des Schaumes beginnt. Eine andere Methode ist die Erzeugung eines chemischen Schaumes mit Treibmittel. Sie bilden Poren, die durch gleichzeitige Erhärtung erhalten bleiben und kommen bei Injektionen zum Einsatz. (Maidl, 1995)

Zur Herstellung eines physikalischen Schaumes werden Tenside, Wasser und Luft benötigt. Tenside besitzen im molekularen Aufbau jeweils ein hydrophobes (wassermeidend) und ein hydrophiles (wasserliebendes) Ende. Die Bildung von Schaum wird erleichtert, indem sich die Oberflächenspannung durch die Tenside herabsetzt. Die Schaumblasen bilden sich, sodass die hydrophilen Enden der Tenside zusammenstehen und die hydrophoben Enden der Tenside die Außenschicht bilden (siehe dazu Abbildung 23). (Bhairi & Mohan, 2001)

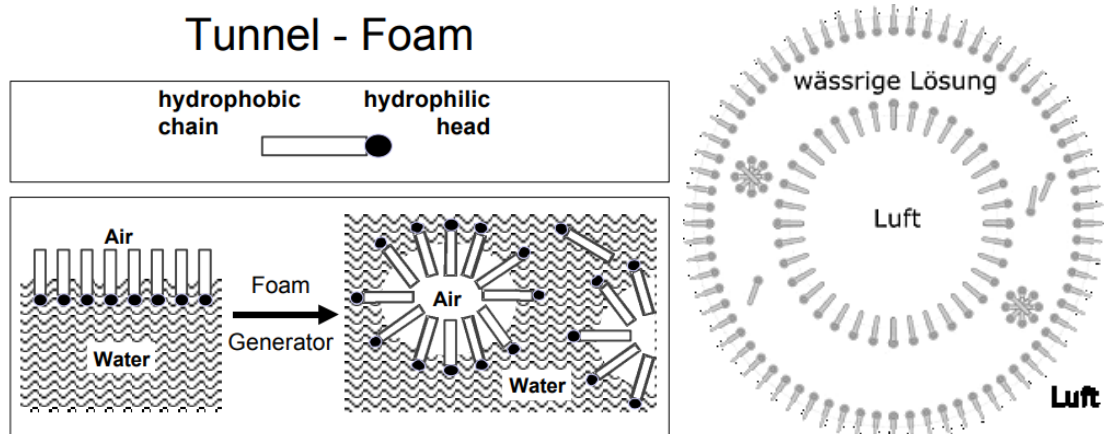


Abbildung 23: Schaumbildung (Langmaack, 2001; Willig, 2020)

Tenside lassen sich in vier Untergruppen aufteilen:

- anionische Tenside (ANS)
- nichtionische Tenside
- kationische Tenside und
- amphotere Tenside. (Firouzei et al., S. 46)

Die laut Firouzei am häufigsten verwendete Gruppe zur Bodenkonditionierung für EPB-Maschinen sind die anionischen Sulfate (ANS) und dort speziell die Untergruppe der Natriumdodecylpoly(oxyethylen)sulfate / Sodium lauryl ether Sulphate (SLES).

Die Lebensdauer von physikalischem Schaum wird vom Verlust der Flüssigkeit bestimmt und hängt von den Faktoren Blasengröße und Herstellungsprozess ab. Laut Dr. Ulrich Maidl werden folgende Zusatzstoffe zur Schaumstabilisierung verwendet:

- Stärke
- synthetische Polymere aus der Gruppe der Acrylamide
- halbsynthetische Polymere aus der Gruppe der Polysaccharide.

Weitere mögliche Zusatzstoffe im Schäumungsmittel sind:

- Biozide
- Frostschutzmittel und
- Farbstoffe zur Markenerkennung.

Stärke ist ein natürlicher Stoff und kann abgebaut werden. Bei synthetischen Polymeren ist dies vom jeweiligen Produkt abhängig. Die halbsynthetischen Polymere sind grundsätzlich abbaubar. Die Dauer variiert sehr stark. (Maidl, 1995, S. 68–70)

Bei der Zugabe der Konditionierungsmittel im Bohrkopf der TBM sind folgende Parameter festzulegen, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen (Condat):

- 1) Der erste Parameter, der von Bedeutung ist, ist der Foam Expansion Ratio (F.E.R.). Dieser zeigt an, wie groß das Aufschäumverhältnis zwischen Schaum und Lösung ist.

$$F. E. R. = \frac{\text{Volumen des Schaums } V_{\text{Schaum}} (l)}{\text{Volumen der Schaumlösung } (l)} \quad (\text{Gl.1})$$

Die Wahl der Größe des Parameters wird vor Ort gewählt und kann im Bedarfsfall geändert werden. Wie in Abbildung 24 dargestellt: Je größer der Körnungsdurchmesser des Ausbruchmaterials desto größer wird das F.E.R. Verhältnis.

F.E.R. DEPENDING ON THE GEOLOGY												
			SILTY SAND									
			MARL				COARSE SAND/GRAVEL					
	CLAY				SAND LIMESTONE							
F.E.R.	5	8	10	12	14	16	18	20	22	24	25	

Abbildung 24: Wahl des F.E.R. (Condat)

- 2) Der zweite Parameter ist die Konzentration. Dieser Parameter gibt das Verhältnis zwischen dem Volumen des Schäumungsmittels zu dem Volumen des Wassers, die gemeinsam die Schaumlösung bilden, an. Die Konzentration ist im direkten Zusammenhang mit dem F.E.R.. Das bedeutet, dass die Konzentration steigt, wenn sich der F.E.R. erhöht. Der Wert liegt laut der Firma Condat im Bereich von 0,4–4 %.

$$\text{Konzentration } C = \frac{\text{Volumen des Schäumungsmittel } (l)}{\text{Volumen des Wassers } (l)} \quad (\text{Gl.2})$$

- 3) Der dritte Parameter ist der F.I.R. (Foam Injection Ratio). Er gibt das Verhältnis zwischen dem Volumen des Schaumes und dem Volumen des Grundes an.

$$F.I.R. = \frac{\text{Volumen des Schaumes } V_{\text{Schaum}} (l)}{\text{Volumen des Grundes } V_{\text{Grund}} (l)} \quad (\text{Gl.3})$$

Der Bereich, in dem sich der Parameter im normalen Fall bewegt, korreliert mit der Porenzahl des Bodens. (Thewes et al.) Die Porenzahl ist das Verhältnis zwischen dem Porenvolumen und dem Feststoffvolumen. Der F.I.R. liegt im Bereich von 0,3 – 0,6.

Um auf den Gehalt des Schäumungsmittels im Boden zu kommen, muss mithilfe der Parameter rückgerechnet werden. Ziel der Umformung ist den Volumenanteil des Tensides in 1 m³ Ausbruchmaterial zu berechnen.

$$\text{Gehalt an Schäumungsmittel } \% = \frac{F.I.R}{F.E.R} * \frac{C}{1 + C} \quad (\text{Gl.4})$$

Die anionenaktiven Tenside sind nur ein Inhaltsstoff der Schäumungsmittel. Der Prozentgehalt muss für die Berechnung bekannt sein und liegt im Bereich von 10-50 %. Um die Ergebnisse mit den Grenzwerten der DVO und des BAWP vergleichen zu können, wird in mg/kg TM umgewandelt. Für die Umrechnung wurde folgende Vereinfachung angenommen:

- Die Dichte des Untergrundes wurde mit 2,0 t/m³ angenommen.
- Die Dichte des Tensidmittels wurde mit 1,05 t/m³ angenommen.

Tabelle 10: Tensid-Konzentration im Ausbruchmaterial min. Ansatz (eigene Berechnung)

Minimaler Ansatz		
Parameter	Wert	Einheit
F.I.R.	0,3	[-]
F.E.R.	10	[-]
C	0,4	[%]
Prozentgehalt Tenside im Schäumungsmittel	25	[%]
Tensid-Konzentration	0,0030	[%]
Tensid-Konzentration im Boden	0,0299	[l/m ³]
Tensid-Konzentration im Boden	15,7	[mg/kg TM]

Tabelle 11: Tensid-Konzentration im Ausbruchmaterial max. Ansatz (eigene Berechnung)

Maximaler Ansatz		
Parameter	Wert	Einheit
F.I.R.	0,6	[-]
F.E.R.	25	[-]
C	4	[%]
Prozentgehalt Tenside im Schäumungsmittel	50	[%]
Tensid-Konzentration	0,0923	[%]
Tensid-Konzentration im Boden	0,9231	[l/m ³]
Tensid-Konzentration im Boden	242,5	[mg/kg TM]

Wie in Tabelle 11 und Tabelle 10 ersichtlich ist, sind Werte von ca. 10 bis 250 mg/kg TM möglich. Diese Werte sind deutlich über den Grenzwerten, die in der Deponieverordnung und im BAWP festgeschrieben sind. Wird der Grenzwert für die Baurestmassendeponie (5 mg/kg TM) überschritten sind ALSAG-Gebühren fällig. Deshalb spielt die biologische Abbaubarkeit eine wichtige Rolle, um die geforderten Grenzwerte einhalten zu können. In Abbildung 25 ist physikalischer Schaum, der zur Bodenkonditionierung verwendet wird, abgebildet.



Abbildung 25: Schaum (Freimann et al., 2017)

4.7.2. Anti-Ton-Additive

Die Aufgabe von Anti-Ton-Additiven ist die Klebrigkeit des Bodens und somit den Verschleiß der TBM zu verringern. Die Wirkungsweise beruht darauf, dass sich das Mittel mit den Tonpartikeln verbindet und diese keine andere Bindung mehr eingehen können. (Egli & Langmaack) Die von BASF verwendeten Produkte bestehen ebenfalls aus Polymeren. Die Konzentration von Anti-Ton-Additiven, die sich nach der Verwendung im Ausbruchmaterial befindet, ist im gleichen Bereich, wie der Schaumgehalt.

4.7.3. Polymere

Das Ziel der Zugabe von Polymere ist eine plastische Konsistenz poröser Böden zu erreichen. Durch die Zugabe von Polymere wird Kohäsion erzeugt und die Durchlässigkeit des Bodens wird verringert. Polymere finden entweder Anwendung als Zusatz zum Schäumungsmittel, zur Stabilisation des Schaumes, oder als einzelne Bodenkonditionierungsmaßnahme. Im Einsatz sind die unterschiedlichsten Arten von Polymere. Sie lassen sich in folgende zwei Hauptgruppen unterteilen:

- aus Erdöl hergestellte Polymere
- aus biologischen Rohstoffen hergestellte Polymere.

Ob Polymere biologisch abbaubar sind, ist von Polymer zu Polymer verschieden. Ein in der Bodenkonditionierung oft eingesetztes Polymer ist Carboxymethylcellulose (CMC). CMC gehört zur Gruppe der anionischen halbsynthetischen Polymere und wird aus natürlichem Zellstoff, Natronlauge und Monochloressigsäure hergestellt. CMC hat ein starkes hydrophiles Verhalten und bildet Fadenmoleküle im Wasser aus, die sich bei ausreichender Konzentration verbinden und eine gelartige Substanz bilden. (Maidl, 1995, S. 56) CMC ist nicht leicht biologisch abbaubar. Die Menge an Polymerkonzentrat bewegt sich laut BASF zwischen 0,3–4 % des Volumens der Schaumlösung. Der Gehalt im Ausbruchmaterial bewegt sich daher im selben Mengenbereich, wie die Schäumungsmittel. Laut Sicherheitsdatenblatt ist das Polymere von BASF (MasterRoc SLP2) nach den geltenden OECD-Regelungen leicht biologisch abbaubar (siehe Tabelle 12).

4.7.4. Wasser

Bei Böden im Tonbereich, mit niedriger Konsistenzzahl, führt die Erhöhung des Wassergehalts zur Reduzierung der Kohäsion und des inneren Reibungswinkels. Durch die Zugabe der richtigen Wassermenge, abhängig von der Korngröße, sowie vom bereits vorhandenen Wassergehalt, werden nur mit Hilfe des Wassers als Bodenkonditionierungsmittel die benötigten Eigenschaften erreicht. Der Wasserbedarf wird durch vorhergehende Erkundung geklärt. (Budach, 2011, S. 15–16)

4.7.5. Feinstoffsuspension

Die Aufgabe einer Feinstoffsuspension ist die Wasserdurchlässigkeit zu verringern und die Konsistenz (Reibungswinkel und Reibungswiderstände) zu optimieren. Als Feinstoff werden Bentonit, Kaolin, Illit, Kalkstein und Quarzmehl verwendet. Bentonit wird wegen der hohen Kosten vermieden. Aufgrund der höheren Dichte, als bei einer Bentonit-Suspension werden sie oft als „High Density Slurries“ bezeichnet. Feinstoff besitzt eine Korngröße von unter 0,063 mm und wird deshalb oft als Füller bezeichnet. Die Parameter der Konzentration (C) und der Suspension Injection Ration (S.I.R.) steuern den Gehalt im Boden. Sie geben das Verhältnis zwischen "Füller und Suspension" und "Suspension und Boden" an. (Budach, 2011)

4.7.6. Auswahl der Bodenkonditionierungsmittel

Der Ablauf zur Wahl eines passenden Bodenkonditionierungsmittels stellt sich wie folgt dar:

1. Korngröße und Durchlässigkeit des Bodens bestimmen.
2. Den Maschinentyp festlegen.
3. Die Möglichkeit von Wasserzutritt bestimmen.
4. Festlegen des Druckbereiches.
5. Bestimmen der Gefahr durch Abnützung.

Anhand dieser Vorinformationen wird das Bodenkonditionierungsmittel gewählt. In Abbildung 26 sind die Einsatzbereiche der jeweiligen Konditionierungsmittel dargestellt. Je weiter die Korngrößenverteilung Richtung Grobkies rückt umso mehr Konditionierungsmittel werden benötigt.

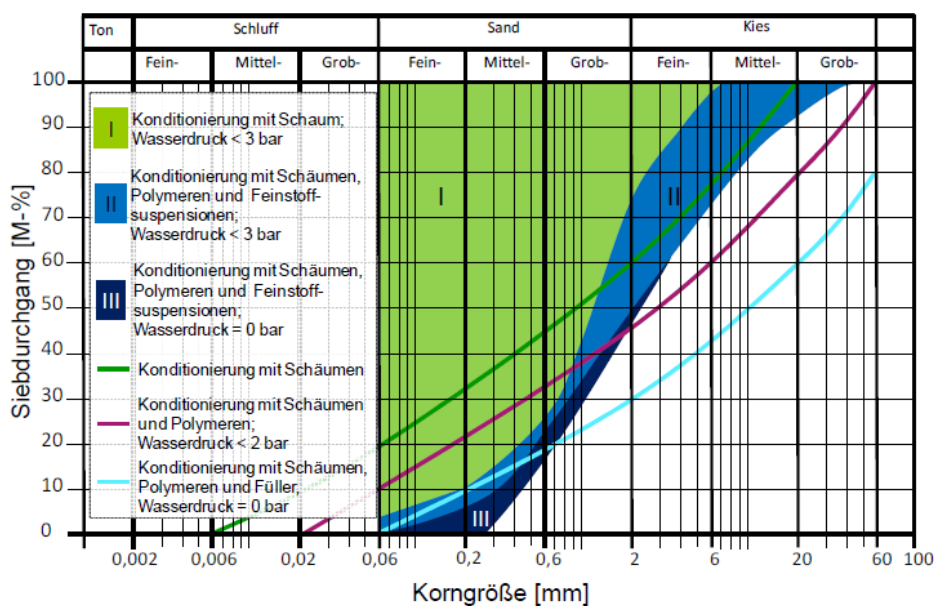


Abbildung 26: Einsatzbereich der Konditionierungsmittel (Budach, 2011, S. 222)

Für die Wiederverwertung ist zu berücksichtigen, dass das Material auch nach der Förderung die Eigenschaften durch die Bodenkonditionierung zumindest für eine Zeit beibehält. Die jeweilig verwendeten Mittel müssen an den Boden angepasst werden. Eine Verschlechterung der Deponieklassen soll verhindert werden. (Maidl et al., 2020) Es ist zu empfehlen, dass die Stoffe:

- nicht akut toxisch sind.
- biologisch, durch Licht oder im Wasser, abbaubar sind.
- sich im Körper nicht anreichern können. (Egli & Langmaack, 2008, S. 4)

Um diese Punkte sicherzustellen, sind Untersuchungen und Versuche an den verwendeten Konditionierungsmittel vorzunehmen. Die durchzuführenden Tests sind:

- Feststellen der Wassergefährdungsklasse.
- Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit (min. 80 % primäre Abbaubarkeit und min. 60 % biologische Abbaubarkeit).
- Untersuchung der Toxizität. (Maidl et al., 2020, S. 24)

4.7.7. Bestimmung von Tensid- und Polymer-Gehalten (chemische Analysen)

Um Tenside und Polymere messen zu können, müssen sie in Lösung gebracht werden, beziehungsweise muss ein Stoff angereichert werden. Ursprünglich wurde dies mit der Soxhlet-Extraktion gelöst. Aus Gründen der Zeitersparnis und des Lösungsmittelsparens werden folgende Verfahren vermehrt verwendet, um die Stoffe in Lösung zu bringen:

- Microwave-assisted extraction (MAE)
- Accelerated solvent extraction (ASE)
- Pressurized liquid extraction (PLE). (Olkowska et al., 2013)

Nach der Herstellung der Lösung wird diese chemisch analysiert. Dies geschieht durch das Verfahren der Flüssiggaschromatographie mit Massenspektrometer-Kopplung (LC/MS) (Firouzei et al., S. 53). Auch die MBAS-Methode zur Messung des Gehaltes der Tenside, wie in der Deponieverordnung beschrieben, kann angewandt werden. Bei der MBAS-Methode wird eine kolorimetrische Analyse durchgeführt. Lösungen, die Tenside enthalten, verfärben sich durch die Zugabe von Methylenblau. Die Farbsättigung gibt Aufschluss über die Konzentration.

4.7.8. Regelung für Tenside und Polymere in Gesetzen und Verordnungen

Eine Regelung für den Gehalt von SLES in Ausbruchmaterialien ist in Europa nicht vorhanden. Jedoch die Übergruppe der anionenaktiven Tenside ist in der österreichischen Deponieverordnung geregelt. Die Grenzwerte liegen zwischen 1 bis 20 mg/kg TM in den verschiedenen Deponieklassen (siehe Tabelle 6). Im Abfallwirtschaftsplan sind für die Wiederverwendung in den verschiedenen Qualitätsklassen Werte unter 1 mg/kg TM gefordert. Polymere sind in der DVO und im BAWP nicht direkt erwähnt, werden aber durch die Grenzwerte von TOC, dem Kohlenwasserstoff-Index und dem maximal organischen Fremdanteil im Ausbruchmaterial geregelt.

4.7.9. Wassergefährdungsklasse (WGK)

Die "Verordnung über Anlagen im Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)", die vom deutschen Umweltbundesamt stammt, teilt die Stoffe in folgende Klassen auf:

nwg	=	nicht wassergefährdend
awg	=	allgemein wassergefährdend
WGK1	=	schwach wassergefährdend
WGK2	=	deutlich wassergefährdend
WGK3	=	stark wassergefährdend.

In der Datenbank (Rigoletto) sind die verschiedensten Stoffe mit der zugehörigen WGK aufgelistet. Bei Gemischen verschiedener Stoffe liegt ein geregelter Ablauf vor, wie der Hersteller des Produktes, die WGK feststellen kann. Dieser Ablauf ist firmenintern zu dokumentieren und der Behörde auf Verlangen vorzulegen. Die WGK ist in den Sicherheitsdatenblättern auszuweisen. (Lulei)

4.7.10. Methoden zur Prüfung der Toxizität

Von den Autoren Firouzei et al. wird hingewiesen, dass vor Verwendung der einzelnen Konditionierungsmittel unbedingt Tests zur Toxizität durchzuführen sind und in Zukunft Standard-Testverfahren entwickelt werden müssen, um die Auswirkung auf die Umwelt zu überprüfen. In Italien gibt es eine Vielzahl an verschiedenen Tests um den Toxizitätsgrad der eingesetzten Mittel zu bestimmen. Folgende Test werden durchgeführt:

- Acute immobilization test (Danphientest) (OECD 202)
- Fischembryotoxizitäts-Test (FET) / fish embryo acute toxicity test (OECD 236)
- Vibrio Fischeri Test
- Algal growth inhibition test (OECD 201)
- Seed germination test. (Firouzei et al., S. 6–9)

Bei jedem einzelnen Verfahren kommen jeweils Kontrollgruppen zum Einsatz, indem derselbe Versuch mit sauberem Wasser durchgeführt wird. Bei diesen Test-Verfahren wird die sofortige Wirkung des Mittels festgestellt, die biologische Abbaubarkeit spielt keine Rolle. Die Ergebnisse der Verfahren werden zur Vergleichbarkeit in EC_{50} -Werten angegeben. Diese Werte zeigen die Konzentration an, bei der 50 % der Testobjekte eine vorgegebene Reaktion (Bewegungsunfähigkeit, etc.) zeigen. (Firouzei et al., S. 6–9)

Der LD_{50} -/ LC_{50} -Wert (Letale Dosis/Letale Konzentration) stellt jene Konzentration dar, bei der 50 % der Testobjekte sterben.

4.7.10.1. Acute immobilization test / Danphientest (OECD 202)

Die Testtiere sind Danphien, die zu den Kleinkrebsen gehören (siehe Abbildung 27). Die Chemikalien werden in das Wasser zu den Danphien gegeben und nach einer festgelegten Zeit wird die Beweglichkeit und die Lebendigkeit der Tiere, untersucht. Die Konzentration der Chemikalien werden solange erhöht bis ein EC_{50} -Wert erreicht wird, das bedeutet dass 50 % der Danphien bewegungsunfähig sind. (OECD Test No. 202)



Abbildung 27: Daphnia magna (Ebert, 2011)

4.7.10.2. Fischembryotoxizitäts-Test (FET) (OECD 236)

Die Fischeier des Zebrafisches (Abbildung 28) werden 96 Stunden einem Eluat ausgesetzt um die Reaktion der Chemikalien auf die Fischeier aufzuzeigen. Das Ergebnis ist die Sterblichkeitsrate der Fischeier, die durch Beobachtung von Indikatoren der Letalität (z.B. Mangel an Herzschlag) bestimmt wird. Durch unterschiedliche Konzentrationen kann auf den LD_{50} -Wert rückgerechnet werden. (OECD Test No. 236)

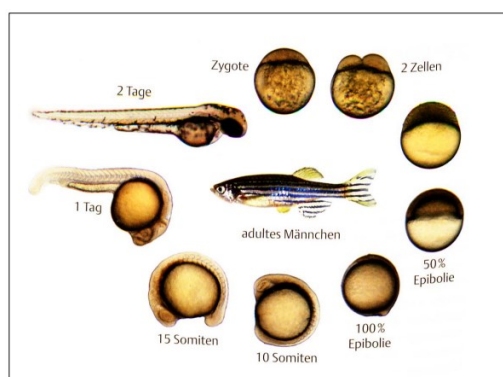


Abbildung 28: Stadien der Zebrafiscentwicklung (Janning & Knust, 2008)

4.7.10.3. Vibrio Fischeri Test

Dieses Testverfahren wird an einem Meeresbakterium durchgeführt. Das Bakterium besitzt eine natürliche Lumineszenz (wie in Abbildung 29 dargestellt). Wenn das Bakterium mit giftigen Stoffen in Kontakt kommt, reduziert sich die natürliche Lumineszenz. Der Unterschied der Lumineszenz wird gemessen. Der Vibrio Fischeri Test ist einer der sensibelsten Tests um die Toxizität eines Stoffes festzustellen. (Firouzei et al., S. 50–51)

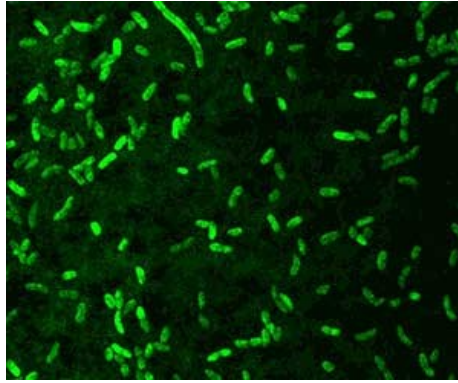


Abbildung 29: Lumineszenz
(Environmental Bio-Detection Products Inc., 2021)

4.7.10.4. Alga growth inhibition test

Bei diesem Test wird die Wirkung auf das Wachstum von Algen beurteilt. Die Ergebnisse der Kontrollgruppe, die nicht behandeltes Wasser bekommen, werden mit den Ergebnissen der Probe, die mit Chemikalien vermischt wurde, verglichen. Die Toxizität wird anhand der Zunahme der Biomasse im Verhältnis zur Kontrollgruppe beurteilt. (OECD Test No. 201)

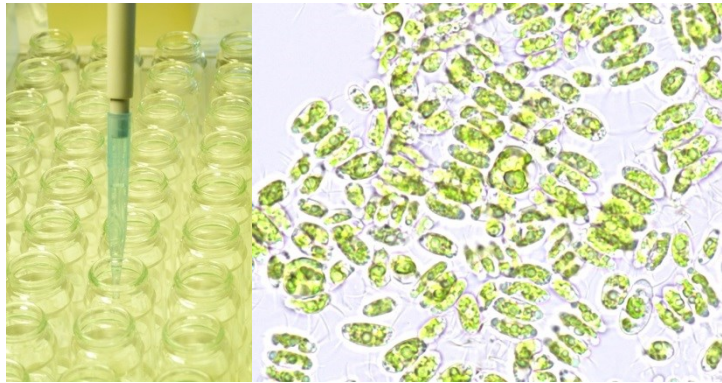


Abbildung 30: Alga growth inhibition test (GOBIO GmbH, 2021)

4.7.10.5. Seed germination test

Bei diesem Testverfahren wird die Auswirkung auf das Pflanzenwachstum untersucht. Zehn Samen von einer Pflanzenart (z.B. Cucumis sativus, Sorghum saccharatum oder Lepidium sativum) werden mit dem Gemisch aus destilliertem Wasser und dem Versuchsstoff gegossen. In der Kontrollgruppe wird mit reinem destilliertem Wasser gegossen. Die Parameter, die für die Beurteilung der Toxizität des Stoffes bei diesem Test nach 72 Stunden herangezogen werden, sind die Keimung und die Verlängerung der Wurzeln (Hypocotyl und Epicotyl). (US EPA, 1996)

4.7.10.6. Zusammenfassung Toxizität

Der empfindlichste Test im Bereich der Toxizität (LD₅₀) ist der FET-Test. Wird eine Konzentration über 100 mg/l bei den Testverfahren erreicht, geht von diesem Stoff keine akute Gefahr für die getesteten Lebewesen aus. Beim FET-Test von Schäumen wird dieser Wert selten erreicht. (Egli & Langmaack, 2008, S. 4)

4.7.11. Prüfungsmethoden für die biologische Endabbaubarkeit

Als "abbaubar" gelten laut Verordnung EG Nr. 907/2006 jene Stoffe, die zu 60 % biologische Abbaubarkeit und zu 80 % primäre Abbaubarkeit in den folgenden Tests aufweisen.

Beim primären Abbau werden die Stoffe zersetzt, müssen aber nicht ungiftig oder komplett zersetzt sein. Beim biologischen Abbau wird der Ausgangsstoff in CO₂, Wasser und Biomasse zersetzt. (Rohrbach, 2013; Verordnung (EG)/Nr. 907/2006)

Gemäß der Europäischen Kommission muss für Tenside, die in Umlauf gebracht werden, die biologische Abbaubarkeit bestimmt werden. Für den Nachweis, dass Polymere abbaubar sind, werden dieselben Testverfahren verwendet. Dazu sind in der Verordnung EG Nr. 907/2006 und in der OECD Test No. 301 - Richtlinie (Ready Biodegradability) folgende Testverfahren festgelegt worden:

- CO₂-Entwicklungstest - Modifizierter Sturm Test
- DOC Die-Away-Test
- Modifizierter Miti-Test
- Geschlossener Flaschentest
- Modifizierter OECD-Screening-Test
- Manometrischer Respirationstest
- CO₂-Headspace-Test.

Grundsätzlich sind Tenside abbaubar. In den wenigen Studien über die Abbaubarkeit von Tensiden wurde eine Zeitspanne für den Abbautätigkeit von 7 Stunden – 30 Tage festgestellt, wobei diese stark von der chemischen Zusammensetzung (Alkylkettenlänge oder welche Ethoxylatgruppe) abhängt. (Firouzei et al., S. 47–48) In Abbildung 31 ist der beispielhafte Verlauf eines Testergebnisses dargestellt.

Zukünftig könnten gezielt Bakterien zugesetzt werden, die mithilfe von Bioaugmentation den Abbau noch weiter beschleunigen können (siehe dazu 4.7.13). Der Einsatzbereich von Bioaugmentation beschränkt sich nicht nur auf den Abbau von Tensiden (z.B. Polymere). Polymere müssen in jedem Fall einzeln beurteilt werden, ob sie biologisch abbaubar sind. Die Test-Verfahren messen unterschiedliche Testparameter bei unterschiedlichen Konzentrationen des Teststoffes. In den nächsten Punkten wird auf die einzelnen Testverfahren eingegangen.

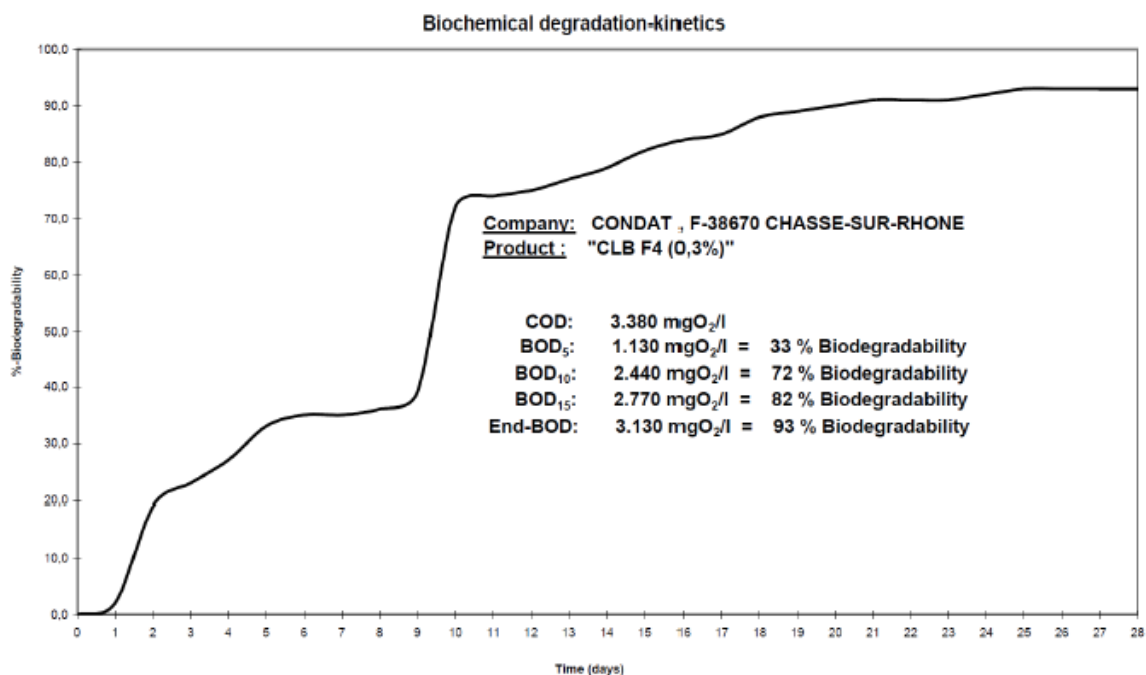


Abbildung 31: Beispiel Verlauf von biologischer Abbaubarkeit (Condat S. A., 2011)

4.7.11.1. CO₂-Entwicklungstest - Modifizierter Sturm Test

Die Testsubstanz darf wasserlöslich oder wasserunlöslich, aber nicht flüchtig sein. Eine festgelegte Menge der Testsubstanz (die einzige Kohlenstoffquelle im Testverfahren) und 30 mg/l Belebtschlamm einer Kläranlage werden der Lösung (Wasser mit aufgelösten Mineralien) zugegeben. Die Lösung wird bei abgedunkelten Verhältnissen für 28 Tage mit kohlenstofffreiem Sauerstoff versorgt. Testparameter ist der durch den biologischen Abbau frei werdende Kohlenstoff. CO₂ wird an Natronlauge gebunden. Der Gehalt kann dann mit Titration festgestellt werden. Das Verhältnis zwischen dem gemessenen und dem theoretischen Kohlenstoffgehalt bildet den Prozentwert der biologischen Abbaubarkeit (siehe Abbildung 32). (Hydrotox - Labor für Ökotoxikologie und Gewässerschutz GmbH, 2021a; OECD Test No. 301, S. 18–24)



Abbildung 32: CO₂-Entwicklungstest - Modifizierter Sturm Test (Hydrotox - Labor für Ökotoxikologie und Gewässerschutz GmbH, 2021a)

4.7.11.2. DOC (dissolved organic carbon) Die-Away-Test

Dieses Testverfahren wird bei wasserlöslichen, nicht flüchtigen Substanzen angewandt. Die Testsubstanz wird mit einer relativ hohen Konzentration von 10–40 mg DOC/l und der Belebtschlamm mit einer Konzentration von 3–5 mg/l der Lösung zugegeben. Wie beim CO₂-Entwicklungstest wird kohlenstoffdioxidfreier Sauerstoff über einen Zeitraum von 28 Tagen beigefügt, wobei die Probe im dunklen Raum gelagert wird. Der DOC-Gehalt der Proben wird in regelmäßigen Abständen gemessen und mit den ursprünglichen Werten verglichen. (OECD Test No. 301, S. 9–17)

4.7.11.3. Modifizierter Miti-Test

Die Testsubstanz, leicht lösliche Substanzen, wird der Lösung von Wasser und gelösten Mineralien zugegeben und mit 30 mg/l Belebtschlamm versetzt. Der Probe wird für 28 Tage in einem abgedunkelten Raum reiner Sauerstoff zur Verfügung gestellt. Der Testparameter ist der Sauerstoffverbrauch der gerührten Lösung. Die biologische Abbaubarkeit wird aus dem Verhältnis zwischen dem gemessenen biologischen Sauerstoffbedarf (BOD) und dem theoretischen Sauerstoffbedarf (THOD) errechnet. Zum Schluss werden mithilfe der DOC-Analyse die Ergebnisse überprüft. (OECD Test No. 301, S. 25–31)

4.7.11.4. Geschlossener Flaschentest

Dieses Testverfahren wird bei flüchtigen Substanzen eingesetzt. Eine Flasche wird mit der Prüfsubstanz (2–5 mg/l), dem Belebtschlamm (5 mg/l) und einem mineralischen Medium vollgefüllt und verschlossen. Der Testparameter ist der gelöste Sauerstoff in der Lösung. Dieser wird in regelmäßigen Abständen gemessen. Damit erfolgt die Ermittlung des verbrauchten Sauerstoffes (BOD) und dieser Wert wird dem theoretischen Sauerstoffbedarf (THOD), durch den biologischen Abbau, gegenübergestellt. (OECD Test No. 301, S. 32–40)

4.7.11.5. Modifizierter OECD-Screening-Test

Der modifizierte OECD-Screening-Test ist im Aufbau und im Ablauf gleich wie der DOC Die-Away-Test. Der Unterschied besteht in der Konzentration der Testsubstanz. Statt 10-40 mg DOC/l werden nur mehr 0,5 mg DOC/l zugegeben. (OECD Test No. 301, S. 41–47)

4.7.11.6. Manometrischer Respirationstest

Bei diesem Testverfahren sind sowohl flüchtige, als auch wasserunlösliche Teststoffe möglich. Die Testsubstanz, der Belebtschlamm aus der Kläranlage (30 mg/l) und das mineralische Medium werden mit einem bekannten Gasvolumen (Sauerstoff) verschlossen. Das durch den Abbau entstehende CO₂ wird durch ein adsorbierendes Mittel (Natriumhydroxid) gebunden. Der dadurch entstehende Druckunterschied kann gemessen werden und auf den Sauerstoffverbrauch sowie auf die biologische Abbaubarkeit rückgeschlossen werden. (OECD Test No. 301, S. 48–55)



Abbildung 33: Manometrischer Respirationstest (Hydrotox - Labor für Ökotoxikologie und Gewässerschutz GmbH, 2021b)

4.7.11.7. CO₂-Headspace-Test

Die zu testende Substanz kann aus flüchtigen, wasserlöslichen und nicht wasserlöslichen Substanzen bestehen. Testsubstanz, Belebtschlamm (4 mg/l) und mineralisches Medium werden in die Flaschen gegeben und diese verschlossen. In der Flasche verbleibt ein Hohlraum, der mit Luft gefüllt ist (Headspace). Das durch den Abbauprozess entstehende CO₂ wird durch die Zugabe von Natronlauge zu Carbonat umgewandelt. Die biologische Abbaubarkeit wird aus der Zunahme des Carbonats errechnet. (OECD Test No. 310)

4.7.12. Feststellung der biologische Abbaubarkeit in Feldversuchen

Das Problem bei diesen Versuchen, bezüglich der biologischen Abbaubarkeit gemäß der OECD-Richtlinie, sind die nicht hundertprozentig übereinstimmenden Randbedingungen im Versuch und der Realität. Im realen Fall wird kein Belebtschlamm mit Mikroorganismen hinzugefügt und die Probe befindet sich nicht in Wasser. Deshalb wurden in der Studie von (Barra Caracciolo et al., 2019) Versuche an Proben (Gesteinskörnungen) aus realen Vortrieben mit Tensiden durchgeführt. Die biologische Abbaubarkeit findet bei den beprobten Böden, mit einer Konzentration von 85,0 mg/kg TM statt. Nach 28 Tagen ist das Aushubmaterial von Tensiden befreit und wieder verwendbar (siehe Abbildung 34). Bei feinkörnigen Böden stellt sich eine schnellere Abbaugeschwindigkeit, als bei grobem Material ein. Das Wachstum von Bakterien konnte nachgewiesen werden, obwohl die Vermehrung der Bakterien zum großen Teil, den neuen Verhältnissen geschuldet ist (Licht, Lockerung des Bodens). Einzelne Gattungen von Bakterien konnten entdeckt werden, die sich aufgrund der Nahrungsquelle (Bodenkonditionierungsmittel) besonders schnell vermehrten. (Barra Caracciolo et al., 2019)

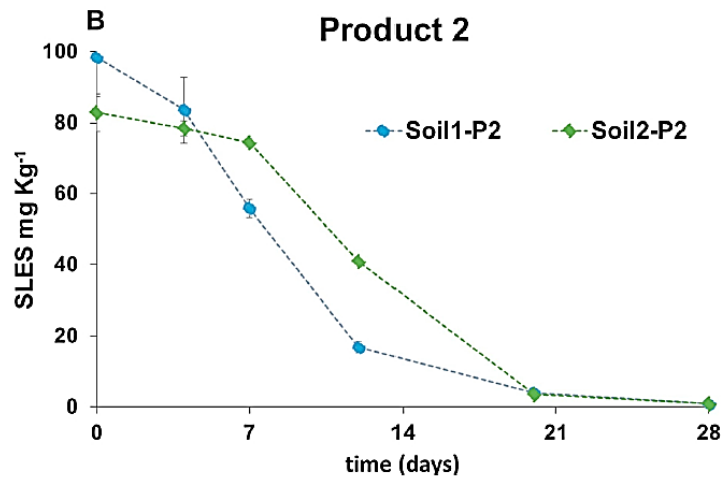


Abbildung 34: Biologische Abbaubarkeit Feldversuch (Barra Caracciolo et al., 2019)

4.7.13. Bioaugmentation von Tensiden

Um die Grenzwerte der DVO und des BAWP für Tenside einzuhalten, muss der Aushub zwischengelagert werden. Die Abbaudauer ist abhängig vom Tensid selbst und beträgt zwischen 7 und 28 Tage. Sind keine Lagerungsflächen vorhanden, muss der Ausbruch als Abfall entsorgt werden. Um das zu verhindern, zielt die Studie von Rolando et al. darauf ab, Bakterien zu finden, die in der Lage sind SLES schneller abzubauen und sie gezielt für die Bioaugmentation der Konditionierungsmittel einzusetzen. Das Verfahren zur Auswahl der richtigen Bakterien, funktioniert wie folgt: Die Bakterien, die bei der Zersetzung in unbehandelten Böden, bei durchgeführten EPB-Projekten, sich am erfolgreichsten vermehrten, wurden eruiert und weiter vermehrt. Nach mehreren Zyklen, wobei immer die sich am stärksten vermehrenden Bakterien entnommen wurden, haben sich folgende Bakterien-Gattungen hervorgetan: Proteobacteria und Pseudomonas. In den Ergebnissen ist ersichtlich, dass durch die Zugabe dieser Bakterien-Gattungen der Abbau massiv beschleunigt wird. Innerhalb von 9 Stunden wurden 94 % der Tenside abgebaut. In Abbildung 35 ist der Verlauf der biologischen Abbaubarkeit im Vergleich zu einer Probe ohne Bakterienzusatz zu sehen. Bis jetzt wurde die Bioaugmentation für den Tensid-Abbau von Ausbruchmaterial bei Tunnelprojekten noch nicht eingesetzt. (Rolando et al., 2020)

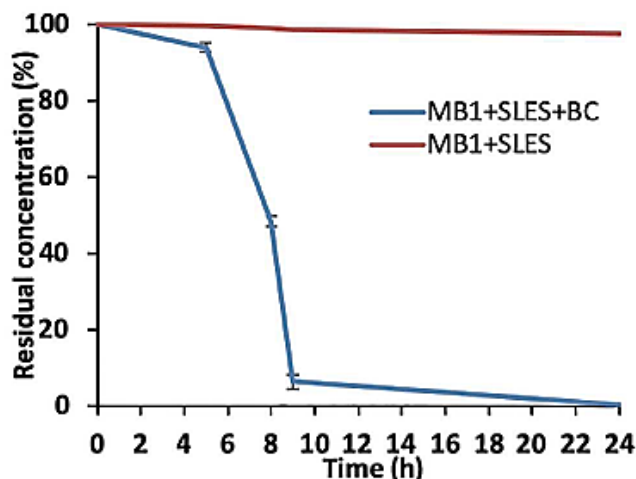


Abbildung 35: Biologische Abbaubarkeit mit Bakterienzugabe (Rolando et al., 2020, S. 6)

In Tabelle 12 sind von verschiedenen Herstellern von Bodenconditionierungsmittel für EPB-Maschinen, aus den Sicherheitsdaten- und technischen Daten-Blättern, Informationen über die Toxizität und die biologische Abbaubarkeit zusammengetragen worden. Dies stellt nur einen beispielhaften Ausschnitt über die Mittel am Markt dar.

Tabelle 12: Verschiedene Hersteller und ihre Angaben zur Toxizität und der biologischen Abbaubarkeit aus SDS und TDS (eigene Darstellung)

Hersteller	Art der Konditionierung	Mittel		Biologische Abbaubarkeit	Methode	Toxizität	Toxizität	Toxizität
						Fish/LC50 (96 h)	Daphnia/EC50 (48h)	Algen/EC50 (48 h)
BASF	Anti-Ton-Additive	MasterRoc ACP 127		81 - 82 %	Geschlossener Flaschentest	> 100 mg/l	> 100 mg/l	-
	Polymer	MasterRoc SLP 2		leicht biologisch abbaubar (nach OECD-Kriterien)		> 100 mg/l	-	-
	Schaum	MasterRoc SLF 50		nicht leicht biologisch abbaubar		-		
	Schaum	MasterRoc SLF 47		81 - 82 %	Geschlossener Flaschentest	> 100 mg/l	> 100 mg/l	-
Condat	Schaum	CLB F5/AC		leicht biologisch abbaubar		10 - 48,8 mg/l	48,8 mg/l	142 mg/l
Normet	Anti-Ton-Additive	TamSoil 287AC		77,60%	Manometrischer Respirationstest	3.000 mg/l	500 mg/l	500 mg/l
	Polymer	TamSoil 267CF		78,60%	Manometrischer Respirationstest	3.000 mg/l	1.100 mg/l	550 mg/l
	polymerisierter Schaum	TamSoil 260CF		86,00%	Manometrischer Respirationstest	70 mg/l	75 mg/l	70 mg/l
	Polymer	TamSoil 600CP		79,60%	Manometrischer Respirationstest	>10.000 mg/l	>30.000 mg/l	>30.000 mg/l
MC-Bau-chemie	Anti-Ton-Additive	MC-Montan Drive LB 02		keine Angaben		>1.000 mg/l	>100 mg/l	-
	Schaum	MC-Montan Drive FL 06	Komponente A	keine Angaben		-	7,2 mg/l	-
			Komponente B	keine Angaben		3 mg/l	1,04 mg/l	0,068 mg/l
	Schaum	MC-Montan Drive FL 04	Komponente A	keine Angaben			7,2 mg/l	
			Komponente B	keine Angaben		3 mg/l	1,04 mg/l	0,068 mg/l
	Schaum	MC-Montan Drive FL 03	Komponente A	keine Angaben		-	7,2 mg/l	-
			Komponente B	keine Angaben		3 mg/l	1,04 mg/l	0,068 mg/l
	Schaum	MC-Montan Drive FL 02	Komponente A	keine Angaben		-	7,2 mg/l	-
Komponente B			keine Angaben		3 mg/l	1,04 mg/l	0,068 mg/l	
Schaum	MC-Montan Drive FL 01	Komponente A	keine Angaben		-	7,2 mg/l	-	
		Komponente B	keine Angaben		3 mg/l	1,04 mg/l	0,068 mg/l	

4.7.14. Änderung der Bodeneigenschaften durch Bodenkonditionierungsmittel

Die Konsistenz, der Wassergehalt, die Wasserdurchlässigkeit und der TOC-Gehalt ändern sich durch die Zugabe von Bodenkonditionierungsmittel. Wenn die Bodenkonditionierungsmittel gut gewählt sind, kommt es bei der Bodenbeschaffenheit zu keiner dauerhaft schädigenden Verunreinigung. Die Konsistenz bleibt langfristig durch den veränderten Wassergehalt verändert. Der TOC-Gehalt legt zu, obwohl sich der Gehalt durch den biologischen Abbau der Mittel wieder reduziert. Schaum baut sich mit der Zeit ab. Um den Wassergehalt im Ausbruchmaterial zu verringern, müssen Bodenkonditionierungsmittel (Tenside, Polymere) zugefügt werden. (Langmaack, 2017)

Bei der Wasserdurchlässigkeit des Bodens stellt sich nach einer gewissen Zeit wieder die ursprüngliche Wasserdurchlässigkeit ein (siehe Abbildung 36). Eine Ausnahme stellt die Konditionierung mit Feinstoffsuspension dar. Hier ist mit einer Senkung der ursprünglichen Wasserdurchlässigkeit zu rechnen (Budach, 2011, S.162–165). Wenn eine industrielle Verwendung des Ausbruchmaterials vorgesehen ist, muss der Füllerstoff kompatibel mit dem Verwendungszweck sein, oder der Verwendungszweck ist nicht möglich.

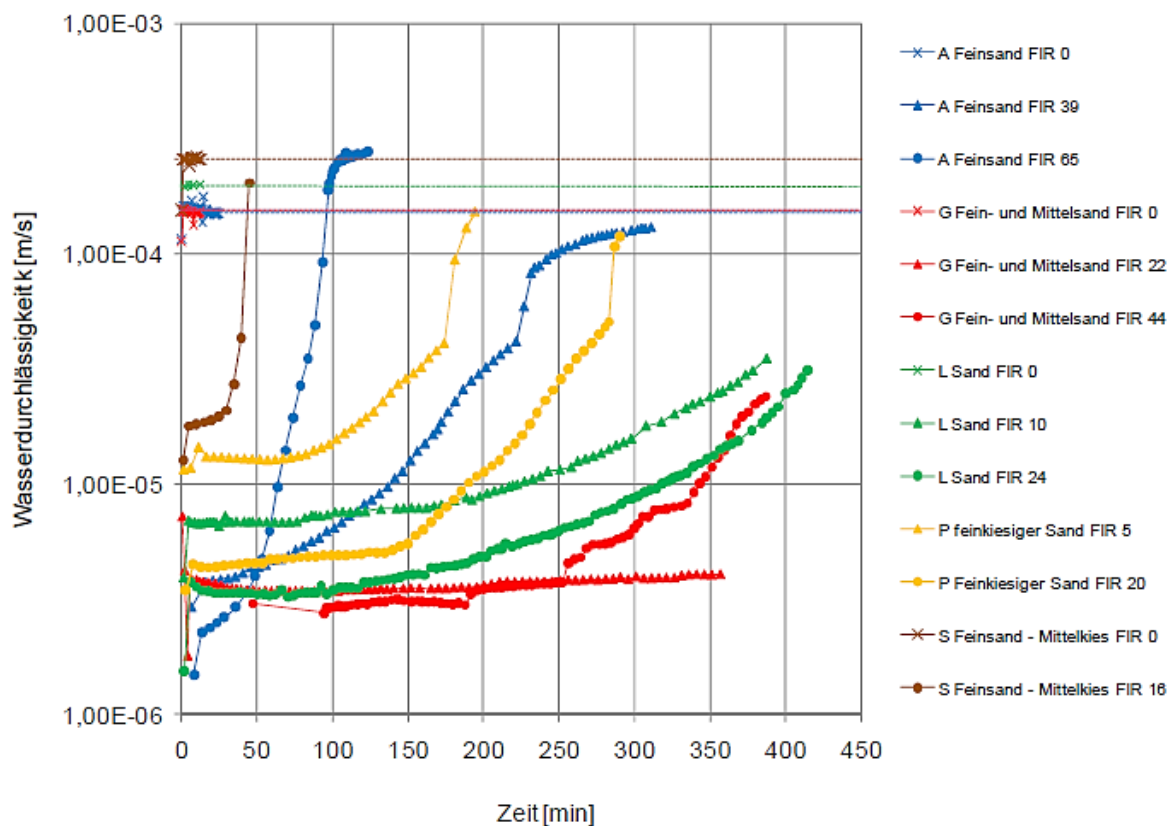


Abbildung 36: Wasserdurchlässigkeit nach Schaumkonditionierung (Budach, 2011, S. 163)

4.7.15. Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung von Ausbruchmaterial

Die festgestellten Auswirkungen sind abhängig vom Zeitpunkt der Probennahme und von der biologischen Abbaubarkeit der verwendeten Bodenkonditionierungsmittel. Ist ein Zwischenlager vorhanden und die Probennahme erfolgt erst nach einem gewissen Zeitraum (ca. 28 Tagen) sind keine rechtlichen Auswirkungen aufgrund der Grenzwerte aus der DVO und des BAWP zu erwarten, wenn die Stoffe biologisch abbaubar sind. Der Wassergehalt des Ausbruchmaterials bleibt erhöht.

Ist eine Zwischenlagerung nicht möglich, das Bodenkonditionierungsmittel nicht biologisch abbaubar, oder die Probennahme erfolgt direkt nach der Förderung, sind die Grenzwerte für anionenaktive Tenside nicht einhaltbar. Übersteigt der Gehalt an anionenaktiven Tensiden 5 mg/kg TM sind ALSAG-Gebühren zu entrichten und das Ausbruchmaterial muss laut der DVO in die Reststoffdeponie/Massenabfalldeponie entsorgt werden.

4.8. Stickoxide

Die zwei Quellen für anthropogene Stickoxide sind die Verbrennung von fossilem Brennstoff im Tunnel und der Einsatz von Sprengstoffen.

4.8.1. Verbrennung von fossilem Brennstoff

Im Tunnelbau ist eine Vielzahl von Maschinen, vom jeweiligen Vortriebsverfahren abhängig, im Einsatz. Ein Großteil dieser Baumaschinen wird mit Dieselmotoren betrieben. Die am häufigsten verwendeten Maschinen sind: Bohrgeräte, Hydraulikbagger, Radlader, Mulde, Spritzbüffel usw.. Die Dieselmotoren stoßen Abgase aus. Die modernen Motoren besitzen einen guten thermischen Wirkungsgrad, aber ein Ausstoß von Schadstoffen bleibt erhalten. Schadstoffe, die durch die Verbrennung entstehen:

- Stickoxide (NO_x),
- Kohlenwasserstoffe (HC),
- Kohlenmonoxid (CO) / Kohlendioxid (CO₂),
- Partikel (PM),
- sichtbare Emissionen (Abgastrübung). (Tschöke et al., 2007)

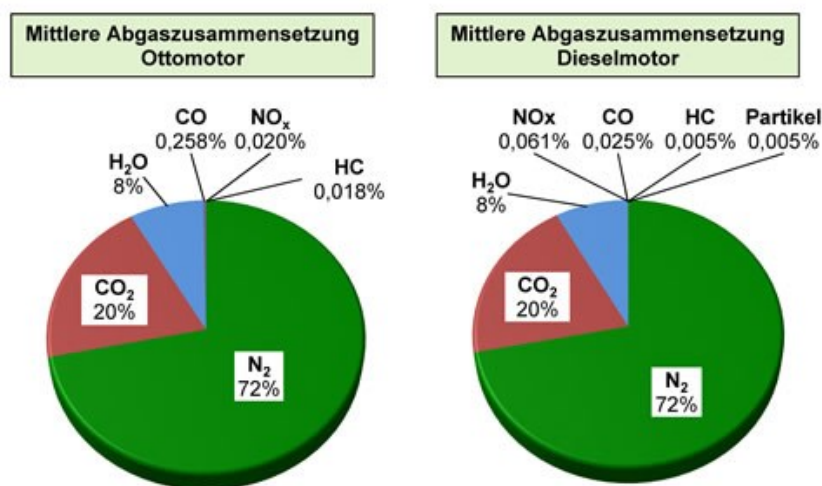


Abbildung 37: Abgaszusammensetzung
(VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik & Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, 2004)

Die Tunnelbewetterung sorgt dafür, dass der Großteil der Abgase automatisch aus dem Tunnel geblasen wird. Stickoxide können laut Herrn Thorsten Keil eine Reaktion mit mineralischen Stäuben hervorrufen und zur Nitratbildung führen. Nitrit entsteht als Zwischenprodukt bei der Denitrifikation von Nitrat durch Bakterien, die diese zur Sauerstoffgewinnung benötigen (Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2019). In der Dissertation von Keil (2015) wird ein Aufnahmekoeffizient definiert, der den Anteil der Stöße (Zusammenprall von Gas und Staub) wiedergibt, welcher zu einer Reaktion führt. Für Stickoxide mit Saharastaub sind das 0,3-1,4 %. (Keil, 2015) Zu berücksichtigen ist, dass der Großteil der Abgase nicht im direkten Umfeld der Ortsbrust und des Ausbruchmaterials entsteht und durch die Bewetterung schnell aus dem Tunnel entfernt wird.

Die gesetzliche Regelung für Abgase von Baumaschinen steht in der Verordnung (EU) 2016/1628. Die Baugeräte, die im Tunnelbau Verwendung finden, fallen in die Klasse NRE. Die Grenzwerte für die Motorenklasse NRE sind in Abbildung 38 bei Emissionsstufe V ersichtlich. Die Motorenunterklasse richtet sich nach der Motorenleistung. Die Baumaschinen befinden sich im Bereich 100-300 kW und somit in der Klasse NRE-v-6. Der erlaubte Grenzwert liegt bei 0,4 g/kWh.

Tabelle II-1: Emissionsgrenzwerte der Stufe V für die Motorenklasse NRE laut Definition in Artikel 4 Absatz 1 Nummer 1

Emissionsstufe	Motorenunterklasse	Leistungsbe- reich	Art der Zündung	CO	HC	NO _x	PM Masse	PN	A
Stufe V	NRE-v-5 NRE-c-5	56 ≤ P < 130 kW	alle	g/kWh 5,00	g/kWh 0,19	g/kWh 0,40	g/kWh 0,015	#/kWh 1 × 10 ¹²	1,10
Stufe V	NRE-v-6 NRE-c-6	130 ≤ P ≤ 560	alle	3,50	0,19	0,40	0,015	1 × 10 ¹²	1,10
Stufe V	NRE-v-7 NRE-c-7	P > 560	alle	3,50	0,19	3,50	0,045	—	6,00

(¹) 0,6 für luftgekühlte Motoren mit Direkteinspritzung und Handstarter.

Abbildung 38: Grenzwerte NO_x Ausstoß (EU Verordnung 2016/1628, 2016)

Anhand des für die Umweltverträglichkeitserklärung (Klima und Energiekonzept) vom Semmering-Basistunnel ermittelten Treibstoff-Verbrauches für die Baustelle und des Grenzwertes für Stickoxid-Ausstoß, der in der VERORDNUNG (EU) 2016/1628 steht, wird die Konzentration errechnet, wie viel NO_x pro Kilogramm Aushubmaterial ausgestoßen wird. Für die Berechnung wurde folgender Punkt idealisiert: Der Stickoxidausstoß der Maschinen ist konstant in der Höhe des Grenzwertes angenommen. Im Realfall kann der Stickoxidausstoß aber davon abweichen. In die Beurteilung mit einfließen muss, dass die eingesetzten Baumaschinen nicht immer dem neuesten Technikstandard entsprechen und somit die Grenzwerte der Emissionsstufe V nicht einhalten.

In Tabelle 13 sind die Annahmen, die für die Berechnung getroffen wurden, angeführt:

Tabelle 13: Annahmen für Stickstoffausstoß (eigene Berechnung)

Dichte des Ausbruchmaterials	[t/m ³]	2,65	
Dichte Diesel	[kg/l]	0,83	
Energiedichte Diesel	[kWh/l]	9,79	
Wirkungsgrad des Motors	[%]	40	(Heinz-Herbert Cohrs, 2017)
NO _x Emissionsgrenzwert	[g/kWh]	0,4	(EU Verordnung 2016/1628, 2016)

Tabelle 14: Zwischenangriff Göstritz Berechnung Stickstoffkonzentration im Ausbruch (eigene Berechnung)

Konventionelle Länge	[m]	6450	(RaumUmwelt Planungs-GmbH, 2010)
Querschnittsfläche	[m ²]	78,54	(RaumUmwelt Planungs-GmbH, 2010)
Ausbruchmasse	[t]	1,34E+06	(RaumUmwelt Planungs-GmbH, 2010)
Verbrauch fossile Brennstoffe	[t]	2160,98	(RaumUmwelt Planungs-GmbH, 2010)
Verbrauch in kWh	[kWh]	2,55E+07	
NO _x	[g]	4,08E+06	
NO _x	[kg]	4078,26	
NO _x	[t]	4,08	
Anteil an der Gesamtmasse	[-]	3,04E-06	
Konzentration im Ausbruch	[mg/kg TM]	3,04	

Die in Tabelle 14 errechnete Stickoxidkonzentration im Ausbruch beträgt 3,04 mg/kg TM. Dieser Wert entsteht, wenn 100 % der ausgestoßenen Stickoxide umgewandelt werden und sich mit dem Aushubmaterial verbinden. Der wirkliche Anteil, der zu Nitrat oder Nitrit umgewandelt wird, ist aus der Literatur nicht ableitbar. Anhand der theoretischen Berechnung (siehe Tabelle 14), ist durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen die Überschreitung der Grenzwerte im Tunnel nicht möglich, sondern trägt höchstens einen Teil zur Gesamtbelastung bei.

Im Gutachten von Herrn Kappl (zur Feststellung des erhöhten Nitrit- und Kohlenstoffgehaltes im Hauwerk beim Bau des Gleinalmtunnels) wurde angeführt, dass durch die Verbrennung von Diesel durch Baumaschinen mehr Stickoxide (NO_x) erzeugt werden, als beim Einsatz von Sprengstoff. (Kappl, 2016)

Zu berücksichtigen ist, dass sich die Standards von Dieselfahrzeugen seither verbessert haben und dass bei dem Gutachten nicht der Ort der Verbrennung und der Anteil, der wirklich ins Hauwerk übergeht, eruiert wurden.

Um zu klären, ob Abgase aus fossilen Brennstoffen große Auswirkung auf die Schadstoffkonzentrationen im Ausbruchmaterial haben, bietet sich die Beprobung von Tunnelausbruchmaterial durch Baggervortrieb an: In der ersten Versuchsreihe im Feld, vor dem Vortrieb des Tunnels, ist die geogene Hintergrundbelastung mit Nitrat, Nitrit und Ammoniak des Bodens festzustellen. Nach dem Ausbruch durch Bagger wird die zweite Versuchsreihe durchgeführt. Die zwei Werte werden verglichen und die Differenz gibt den Anteil an, der durch die Abgase der Baumaschinen entstanden ist, weil keine anderen Verunreinigungsquellen (z.B. Sprengstoffe) eingesetzt wurden. Dadurch kann die Frage geklärt werden, ob eine Überschreitung der Grenzwerte der DVO oder des BAWP durch fossile Brennstoffe im Tunnelbau vorliegt.

4.9. Kohlenwasserstoffe

Durch die bei den verschiedenen Vortriebsverfahren verwendeten Kohlenwasserstoffe sind Auswirkungen auf die Wiederverwertung/Entsorgung des Aushubmaterials zu berücksichtigen. Kohlenwasserstoffe werden durch verschiedene Prozesse in den Aushubmaterialkreislauf gebracht. Dies ist sowohl beim maschinellen als auch beim konventionellen Vortrieb möglich. Beim konventionellen Vortrieb verursachen die vielen verschiedenen Maschinen (Bohr-, Lade-, Fördermaschinen und Transportfahrzeuge) die Gefahr, dass Schmiermittel, Treibstoffe und Hydraulikflüssigkeiten auslaufen könnten. Der Bereich der Kalottensole ist durch die lange Zeit, die sie frei liegt, besonders gefährdet. Die Gefahr besteht, dass die Grenzwerte des Abfallwirtschaftsplans von 50 mg/kg überschritten werden. Bei Unfällen mit Ölaustritt kann durch die rechtzeitige Erkennung des Austrittes, das Material im Nahbereich gesondert entfernt und fachmännisch entsorgt werden (Reststoff-/Massenabfalldeponie). Beim maschinellen Verfahren ist eine Kontamination im Maschinenbereich möglich. Dort sind große Mengen Hydraulik-Öl im Einsatz. (ÖBV-Richtlinie, 2015)

4.10. Sprengstoffe

4.10.1. Allgemeines

Sprengstoff wird verwendet um Gebirge in handhabbar große Stücke zu zerkleinern und um den Abtransport (Ladung und Förderung) des Ausbruchs zu ermöglichen. Die im Tunnelbau für die Sprengtechnik wichtigsten Punkte, die es sicherzustellen gilt, sind:

- die Genauigkeit des Ausbruchrandes
- die Erhaltung der Bruchwandstabilität. Das anstehende Gebirge soll nicht beschädigt werden. (Seidl, 2020b)

Die Nebenerscheinungen (Erschütterung, Lärm, Steinflug, Sprengschwaden) beeinflussen ebenfalls das Sprengschema. Ein großer Teil der Energie, die beim Sprengen frei wird, geht nicht in die Zerkleinerung. Nur ca. 1 % der gesamt Energie nützt der Zerkleinerung. Der Rest der Energie verpufft in Form von Erschütterungen, heißen Gasen, Lärm und für das Werfen der Vorgabe. Wie viel Energie in den Berg übertragen wird, hängt von der Ausbildung des Laderaumes, vom Gebirge und der Umsetzungscharakteristik des Sprengstoffes ab. Loser Sprengstoff bietet eine bessere Kopplung an das Gebirge, als patronierter Sprengstoff. (Seidl, 2020b)

Der Ablauf einer Sprengung sieht wie folgt aus: Zuerst detoniert die Sprengstoffsäule mit der VOD (Velocity of Detonation). Das löst eine Druckwelle aus, die sich auf alle Seiten gleichmäßig ausbreitet. An der freien Fläche wird die Schockwelle reflektiert und es bildet sich eine Zugspannungswelle, welche die Risse im Gestein verursacht. Die Zugfestigkeit im Gestein ist weitaus geringer und somit können größere Volumen zerkleinert werden. Nur der absolute Nahbereich wird durch die Druckwelle zermahlen. Durch die Gasexpansion, die durch die Umsetzung des Sprengstoffes entsteht, wird das zerkleinerte Hauwerk geworfen. (Seidl, 2020b)

Im Tunnelbau ist nur die Ortsbrust als freie Fläche vorhanden. Die zweite freie Fläche wird künstlich hergestellt. Zu Beginn der Sprengung wird in der Mitte der Ausbruchfläche ein Einbruch hergestellt (siehe Abbildung 39). Zur Herstellung des Einbruches liegt die Möglichkeit des Schräg- und Paralleleinbruches vor. Beim Tunnelbau wird aufgrund der hohen Vortriebsgeschwindigkeit und dem hohen Maß an Automation der Paralleleinbruch verwendet. Bei diesem Verfahren werden in der Mitte eine oder mehrere Bohrungen, die nicht mit Sprengstoff gefüllt werden, als freie Fläche verwendet. Danach folgen die Helfer bis zu den Kranz/Konturlöchern, die jeweils erst gezündet werden, wenn die vorige Reihe bereits gelöst worden ist und damit eine freie Fläche vorliegt. (Seidl, 2020a)

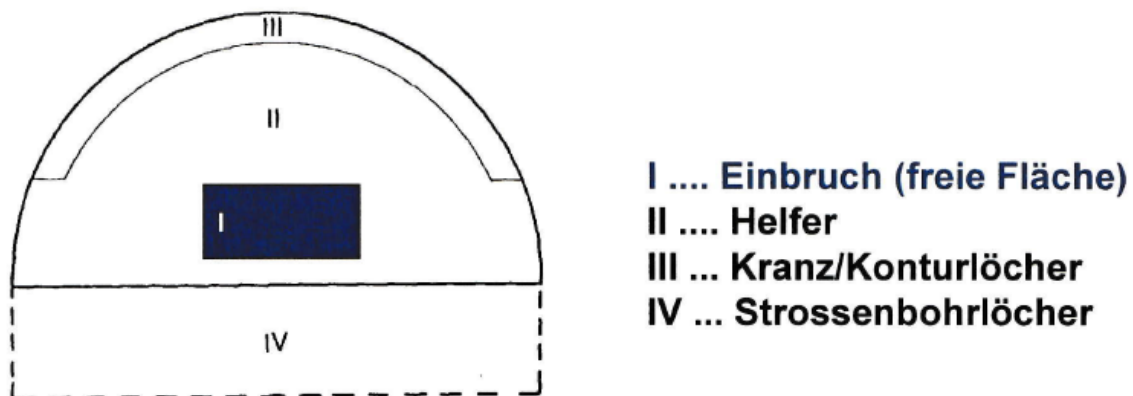


Abbildung 39: Bohrschema für Sprengvortrieb (Seidl, 2020a)

Der spezifische Sprengstoffbedarf hängt von der Querschnittsfläche, der Gebirghärte und der Klüftigkeit ab. Je größer der Querschnitt umso geringer der spezifische Bedarf an Sprengstoff. Der durchschnittliche Sprengstoffbedarf bei mehr als 30m² Querschnittsfläche liegt im Bereich von 1-3 kg/m³. (Seidl, 2020a)

4.10.2. Sprengstoffarten

Im Tunnelbau sind folgende gewerblichen Sprengstoffe im Einsatz:

- gelatinöse Sprengstoffe
- ANFO-Sprengstoffe
- Emulsionssprengstoffe
- Mischungen aus ANFO- und Emulsionssprengstoffen. (Knauss, 2020)

Die Auswahl des Sprengstoffes erfolgt aufgrund von verschiedenen Parametern. Ein kleiner Ausschnitt davon ist:

- Schwadenvolumen
- Initiierbarkeit
- Handhabungssicherheit
- Umweltauswirkungen.

Bei der Umsetzung von Sprengstoff entsteht Stickstoff, Kohlendioxid und Wasser. Des Weiteren entsteht eine geringe Menge an Schadstoffen (z.B. Kohlenmonoxid, Stickoxide, etc.). In Tabelle 15 sind die üblichen Elemente im Sprengstoff, sowie die üblichen Reaktionsprodukte aufgelistet.

Übertage spielen die Gase aufgrund der geringen Konzentration und dem sofort eintretenden Luftaustausch keine Rolle. Im Tunnelbereich liegen Grenzwerte vor und die Arbeiten müssen so lange stillstehen, bis die Schadstoffgrenzwerte in der Luft wieder eingehalten werden (Bewetterungszeit). (Englmayer et al., 2019)

Tabelle 15: Elemente und Reaktionsprodukte (Knauss, 2020)

Elemente	Reaktionsprodukte
Kohlenstoff C	CO ₂ Kohlendioxid
Stickstoff N	CO Kohlenmonoxid
Wasserstoff H	XCO ₃ Carbonate
Sauerstoff O	N ₂ Stickstoff
Schwefel S	NO Stickstoffmonoxid
Aluminium Al	NO ₂ Stickstoffdioxid
	H ₂ O Wasser
	SO ₂ Schwefeldioxid
	Al ₂ O ₃ Aluminiumoxid

Damit eine Sprengung stattfinden kann bzw. eine sichere Zündung der Sprengstoffe mit der berechneten Verzögerung stattfindet, sind folgende Sprengutensilien notwendig:

- Sicherheitszündschnur
- Zünder
- Sprengschnur
- Booster. (Knauss, 2020)

4.10.2.1. Gelatinöse Sprengstoffe

Vor der Einführung der Emulsions-Sprengstoffe wurden die gelatinösen Sprengstoffe im Untertagebau am häufigsten verwendet. Die Bestandteile sind Nitroglykol 20-40 %, Nitrocellulose 1-2,5 %, Ammoniumnitrat (50-65 %), Nitroaromaten 0-10 % und andere Inhaltsstoffe für Sonderanwendungen. Vorteile des gelatinösen Sprengstoffes sind die Wasserbeständigkeit und die hohe Leistungsfestigkeit. Nachteile sind einerseits die höheren NO_x-Konzentrationen als bei Emulsions-Sprengstoffen und andererseits die durch Nitroaromaten entstehenden Kopfschmerzen und die Schlag- und Reibempfindlichkeit des Sprengstoffes. (Knauss, 2020)



Abbildung 40: gelatinöser Sprengstoff (wikiwand, 2021)

4.10.2.2. ANFO-Sprengstoffe

ANFO-Sprengstoff besteht aus zwei Komponenten (Abbildung 41). 94 % Ammoniumnitrat und 6 % Mineralöl. Durch die unkomplizierte Herstellung ist der Sprengstoff kostengünstig. Der Nachteil von ANFO-Sprengstoff ist die Wasserunbeständigkeit und dass der Sprengstoff nicht kapselsensitiv ist. Die Vorteile sind die gute Handhabungssicherheit und die geringen Schadstoffkonzentrationen von NO_x und CO. (Knauss, 2020)



Abbildung 41: ANFO-Sprengstoff (Tripwire Operations Group, 2020)

4.10.2.3. Emulsionssprengstoffe

Die Sprengemulsion setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- Ammoniumnitrat 50-80 %
- Natriumnitrat 0-20 %
- Wasser 5-20 %
- Brennstoffe 5-10 %
- Emulgatoren 0,5-2 %
- Aluminium 0-10 %
- Mikrohohlkörper 0-3 %.

Die Emulsion wird erst durch die Sensibilisierung zum Sprengstoff. Dies geschieht entweder durch Mikrohohlkörper, die mit Gas gefüllt sind oder durch Chemical Gasing (chemischer Prozess zur Luftblasenbildung). Der Emulgator ermöglicht die Mischung von zwei nicht mischbaren Substanzen (Öl und Wasser). Ähnlich dem Schäumungs-Mittel besitzt der Emulgator ein hydrophiles und hydrophobes Ende. Vorteile sind die hohe Handhabungssicherheit, keine toxischen Bestandteile und die Wasserbeständigkeit. Die Erzeugung des Sprengstoffes kann im Werk stattfinden, oder in mobilen Einheiten vor Ort. Das Einbringen des Sprengstoffes erfolgt entweder patroniert, wie gelatinöser Sprengstoff, oder lose durch eine Pumpe. (Knauss, 2020)

Die Mischung aus ANFO- und Emulsionssprengstoff (Heavy-ANFO (siehe Abbildung 42)) findet vermehrt Anwendung.

Das Mischverhältnis entscheidet über die Wasserbeständigkeit (ab 30 % Emulsion). Laut dem Gespräch mit Herrn Mark Ganster (Austine Europe GmbH) am 10.06.2021 ist im Tunnelbau, in Österreich, nur mehr Emulsionssprengstoff im Einsatz. Die Einbringung des Sprengstoffes erfolgt entweder patroniert oder lose, abhängig von der Logistik der Baustelle, der Länge des Abschlages und der Geologie des Gebirges.



Abbildung 42: Heavy ANFO Sprengstoff (Platinum Blasting, 2018)

4.10.3. Umweltauswirkungen

Die Sauerstoffbilanz eines Sprengstoffes gibt an, ob, für die ideale Umsetzung des Sprengstoffes, Sauerstoff benötigt oder abgegeben wird. Bei der idealen Umsetzung des Sprengstoffes gibt es keinen Sauerstoffüberschuss oder -mangel. Bei Sauerstoffüberschuss entstehen Stickoxide. Bei Sauerstoffmangel entstehen Kohlenstoffmonoxide (CO). Beim ANFO-Sprengstoff wird z.B. durch Ammoniumnitrat ein Sauerstoffüberschuss produziert, der durch die Zugabe eines Brennstoffes (Öl) verbraucht wird, weil sonst eine erhöhte Stickoxidkonzentration droht. (Knauss, 2020)

Bei der Verbrennung von Sprengstoffen, bei nicht idealer Umsetzung, entstehen Schadstoffe. Diese Schadstoffe sind Ammoniak (NH₃), Stickoxid (NO_x) und Kohlenmonoxid (CO). Die CO-Konzentration stellt für die Wiederverwertung im Allgemeinen kein Problem dar, weil die CO-Moleküle in Kohlenstoffdioxid (CO₂) umgewandelt werden. Ammoniak und Stickoxide sind durch Wasser aus der Luft auswaschbar und bilden dann Nitrat (NO₃-), Nitrit (NO₂-) und Ammonium-Ionen (NH₄⁺). (Knauss, 2020)

In der Din EN 13631 Teil 16 wird auf ein Verfahren verwiesen, das zur Messung der Schadstoffe in den Schwaden dient. Laut S. Schwarz und H. Krebs sind in Tabelle 16 die Schadstoffe von einem 1 kg Sprengstoff zu sehen. Mithilfe der Molmasse der Schadstoffe und der Vereinfachung, dass die Temperatur bei der Messung 0°C beträgt, wird der Satz von Avogadro dazu verwendet den Gehalt (g/kg) der Schadstoffe bei der Umsetzung von 1 kg Sprengstoff (Tabelle 17) zu berechnen.

Tabelle 16: Schadstoff-Konzentration nach der Umsetzung von 1 kg Sprengstoff in der Schwadenkammer (Krebs & Schwarz, 2017)

Schadstoffe	CO	CO ₂	NO	NO ₂	Einheit
gelatinöser Sprengstoff	12	190	11	2	[l/kg]
Emulsions-Sprengstoff	21	89	3	0,1	[l/kg]

Tabelle 17: Umrechnung in die Einheit g/kg (Eigene Berechnung)

Schadstoffe	CO	CO ₂	NO	NO ₂	Einheit
Molmasse	28,01	44,01	30,01	46,01	[g/mol]
Satz von Avogadro	22,4	22,4	22,4	22,4	[l/mol]
gelatinöser Sprengstoff	15,01	373,30	14,74	4,11	[g/kg]
Emulsions-Sprengstoff	26,26	174,86	4,02	0,21	[g/kg]

Tabelle 18 und Tabelle 19 dienen der Berechnung der Stickstoffkonzentrationen im Ausbruchmaterial. In der Berechnung wird angenommen, dass alle Schadstoffe ins Hauwerk übergehen und kein Anteil durch die Bewetterung ausgewettert wird. Für die genaue Vorausbestimmung der Schadstoffmenge, die durch den Sprengstoff entsteht, ist diese Berechnung nicht geeignet, weil beim Testverfahren laut der Norm (Din EN 13631 Teil 16) andere Bedingungen vorherrschen. In der Realität sind durch Feuchtigkeit, Wasser, Härte des Gebirges und Einschlussbedingungen höhere Schadstoffwerte wahrscheinlich. Die Berechnung ermöglicht eine Abschätzung, welcher Sprengstoff weniger Schadstoffe und in welchem Größenbereich sich die entstehenden Stickstoffkonzentrationen bewegen. (Englmayer et al., 2019)

Tabelle 18: Annahmen für die Berechnung (eigene Berechnung)

Sprengstoffverbrauch pro m ³ Gestein		
minimal	1	[kg/m ³]
maximal	3	[kg/m ³]
Dichte des Gebirges (angenommen)	2650	[kg/m ³]

Tabelle 19: Berechnete Stickstoffkonzentrationen (eigene Berechnung)

Stickoxidkonzentration	NO		NO ₂		Einheit
	Min.	Max.	Min.	Max.	
Gelatinöser Sprengstoff	5,56	16,68	1,55	4,65	[mg/kg TM]
Emulsions-Sprengstoff	1,52	4,55	0,08	0,23	[mg/kg TM]

Die Ergebnisse der Berechnung (Tabelle 19) zeigen, dass ein Emulsions-Sprengstoff weniger Schadstoffe verursacht und dass die entstehende Menge an Schadstoffen gering ist.

Die Schadstoff-Konzentration ist in Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) angegeben. Stickstoffmonoxid (NO) ist ein Radikal und mit Sauerstoff bildet sich schnell Stickstoffdioxid (NO₂). In der DVO und im BAWP werden aber die Grenzwerte für den Nitrat- (NO₃-) und Nitrit-Gehalt (NO₂-) angegeben. Nitrat (NO₃-) und Nitrit (NO₂-) entstehen durch den Kontakt von Nitrosen Gasen (NO und NO₂) mit Wasser und verbinden sich bei der Sprengung mit der Gesteinsoberfläche. Welcher Prozentsatz in der Realität in Nitrat und Nitrit umgewandelt wird, wurde in der Literatur nicht behandelt.

Der Grenzwert der Qualitätsklasse A1 laut BAWP oder der Deponieklasse Bodenaushub laut DVO für Nitrat liegt bei 100 mg/kg TM. Aufgrund der berechneten Menge der Nitrosen Gase (siehe Tabelle 19) ist eine Überschreitung nicht möglich. Bei Nitrit (Grenzwert bei 2 mg/kg TM) scheint eine Überschreitung des Grenzwertes möglich.

Um die ermittelten Werte, die mithilfe der Schadstoff-Konzentration aus der Schwadenkammer berechnet wurden, zu überprüfen und zu validieren, sind die Werte mit den Mess-Ergebnissen von chemischen Untersuchungen von Ausbruchmaterialien nach realen Sprengvortrieben zu vergleichen. Die Konzentrationen, die bei Projekten im Durchschnitt gemessen wurden (Galler & Pauser, 2012), sind in Tabelle 20 dargestellt. Die Werte, die auf der Koralmbaustelle KAT2 von Zettl (2013) festgestellt wurden, sind ebenfalls in Tabelle 20 dargestellt. Die niedrigeren Werte bei den Mess-Ergebnissen von Frau Sonja Zettl sind vermutlich auf die niedrige Sprengmittelkonzentration zurückzuführen.

Tabelle 20: Mess-Ergebnisse von Nitrat-, Nitrit- und Ammonium-Konzentrationen (Galler & Pauser, 2012; Zettl, 2013)

Parameter	Mess-Ergebnisse aus Endbericht Recycling von Tunnelausbruch	Mess-Ergebnisse am KAT 2	Grenzwerte (DVO)
	mg/kg TM	mg/kg TM	mg/kg TM
Nitrat (NO ₃ -)	6,0-15,0	0,4-10,1	100
Nitrit (NO ₂ -)	1,0-2,4	0,0-1,8	2
Ammonium (NH ₄ +))	0,2-3,3	keine Angabe	8

Die Ergebnisse in Tabelle 20 zeigen, dass der Grenzwert für Nitrat kein Problem darstellt. Die Nitrit-Gehalte sind nahe dem Grenzwert oder überschreiten ihn. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die Berechnung des Schadstoffgehaltes mit den Daten der Schwadenkammer nicht ausreicht, um den Gehalt an Schadstoffen im Ausbruchmaterial vorauszusagen. Für eine exakte Voraussage sind neue Versuche notwendig, wo die Randbedingungen (Sprengstoff im Fels, Einschlussbedingungen, Wasser, verschiedene Gesteinsarten, etc.) und die Auswertung (Nitrat, Nitrit und Ammonium im Ausbruchmaterial direkt bestimmen) den realen Gegebenheiten besser angepasst werden.

Bei Projekten, bei denen Emulsionssprengstoffe eingesetzt wurden, sind Überschreitungen der Grenzwerte bei der Ammoniumkonzentration aufgetreten. Die erhöhten Werte wurden auf die Bestandteile des Sprengmittels zurückgeführt. Der Verdacht besteht, dass nicht nur die Sprengschwaden zur Erhöhung der Ammoniumkonzentration beitragen, sondern auch die nicht umgesetzten Bestandteile des Sprengstoffes einen entscheidenden Faktor spielen. Ammonium entsteht auch durch die Reaktion von basischem Wasser und nicht detoniertem Sprengstoff. Bei losem Sprengstoff, der den Vorteil bietet erst vor Ort durch Mischung zweier Komponenten zu einem Sprengstoff zu werden, ist auf den exakten Einbringungsprozess zu achten. Der in Klüften und Poren deplatzierte Sprengstoff wird durch eine Sprengung nicht umgesetzt und führt zu erhöhten Konzentrationen von Ammonium im Ausbruchmaterial. (Galler & Pauser, 2012)

In der Sprengmittelunbedenklichkeitserklärung von Kappl wird angeführt, dass ca. 1-2 % des Sprengstoffes, durch den Abscher-Effekt, nicht vollständig umgesetzt werden. Die durch den Abbau von Ammoniumnitrat entstehenden Produkte sind vom pH-Wert der Umgebung abhängig. Beim basischen Abbauweg entsteht Ammoniak. Beim neutralen Abbauweg entsteht Nitrit. (Kappl, 2019)

Zwischen Ammonium NH_4^+ und Ammoniak NH_3 herrscht ein Dissoziationsgleichgewicht. Dies bedeutet, dass wenn Ammoniak entsteht, sich auch eine Ammonium-Konzentration bildet. Florian Bauer und Peter Moser berichten, dass die Hauptentstehungsursache von Ammoniak nichtumgesetzter Sprengstoff, der mit basischem Wasser in Berührung kommt, ist. Wie in Abbildung 43 abgebildet, kommt es kurz nach der Sprengung zu einem raschen Anstieg der Ammoniakkonzentration. Dieser sinkt aber schnell wieder ab. Mit der Zeit bildet sich dann aber erneut Ammoniak-Gas aus. Stickoxide und Kohlenstoffmonoxid erreichen direkt nach der Sprengung ihren Höhepunkt. Die Einflussfaktoren, wie Einschlussbedingungen, Wasser und Gesteinsstaub zeigen keinen Einfluss auf die Ammoniak-Konzentration. Wasser bildet sich entweder bei der Explosion oder ist geogen vorhanden. Das Wasser wird durch vorhandene Spritzbetonreste oder durch zerkleinertes Material karbonatischen Ursprungs basisch. Eine komplette Verhinderung der Bildung von Ammoniak ist durch die Verwendung von Ammoniumnitrat im Sprengstoff nicht möglich. Durch die möglichst vollständige Umsetzung des Sprengstoffes (Versager vermeiden) und durch sauberes Einbringen von losem Sprengstoff wird die Ammoniak-Konzentration niedrig gehalten.

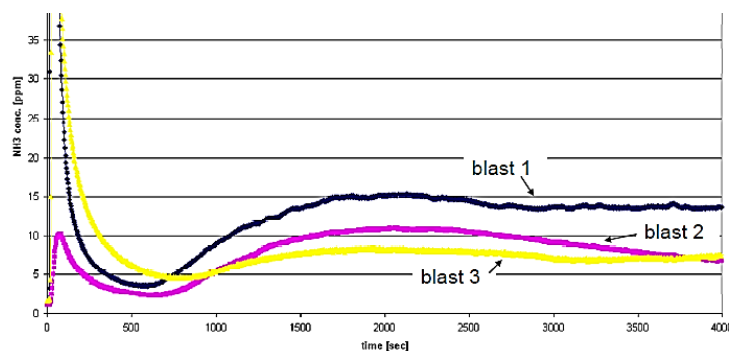


Abbildung 43: Gemessene Ammoniakkonzentration nach der Sprengung (Bauer & Moser)

Ein wichtiger Faktor für die Entstehung von Schadstoffen bei der Umsetzung von Sprengstoffen ist der Kontakt mit Wasser. In der Untersuchung von Rowland III et al. (2001) wurde festgestellt, dass Sprengstoffe, die lange dem Wasser ausgesetzt sind, höhere Schadstoffkonzentrationen bei der Umsetzung aufweisen, weil die Zersetzung der Sprengstoffe bereits im Wasser begonnen hat (siehe Abbildung 44). Eine kurzfristige Aussetzung mit Wasser erhöht die Schadstoffkonzentration nur minimal. Im Tunnelbau, wo Sprengstoffe nur kurze Zeit dem Gebirge ausgesetzt sind, spielt dieser Faktor nur eine untergeordnete Rolle.

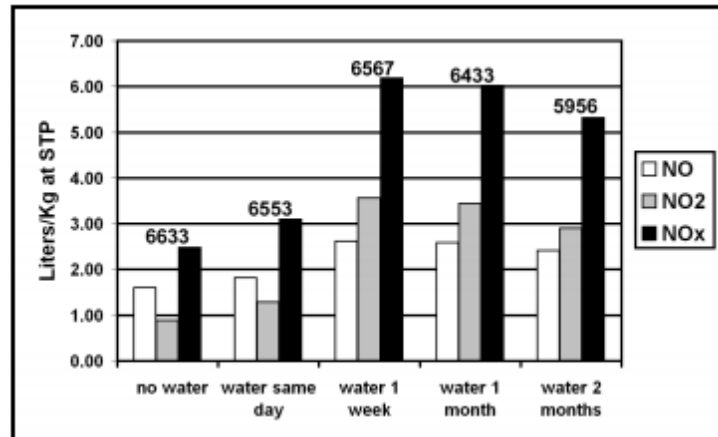


Abbildung 44: Stickstoffkonzentration Emulsionssprengstoffe (Rowland III et al., 2001)

4.10.4. Auswirkung auf die Verwertung / Deponierung

Die Einhaltung der Grenzwerte der DVO und des BAWP für Nitrat, Nitrit und Ammonium nach dem Sprengvortrieb erschweren die Verwertung/Deponierung des Tunnelausbruches. Laut Herrn Christoph Ehrensberger (Ehrensberger, 2021) sind beim Einsatz von gelatinösem Sprengstoffen die Grenzwerte sofort überschritten. Auch zwischen den verschiedenen Emulsions-Sprengstoffen, sogar desselben Herstellers, sind große Unterschiede in den Konzentrationen der Schadstoffe im Ausbruchmaterial festzustellen. Wichtige Schritte bei der Verwendung von Sprengstoffen zur Einhaltung der Grenzwerte sind:

- Die Wahl eines geeigneten Emulsionssprengstoffes. (Achtung unterschiedliche Schadstoffkonzentrationen bei allen Emulsionssprengstoffprodukten)
- Die Genauigkeit beim Einbringen des Sprengstoffes.
- Die hundertprozentige Umsetzung des Sprengstoffes erzielen.

5. Neubaustrecke Schaftenau-Knoten Radfeld

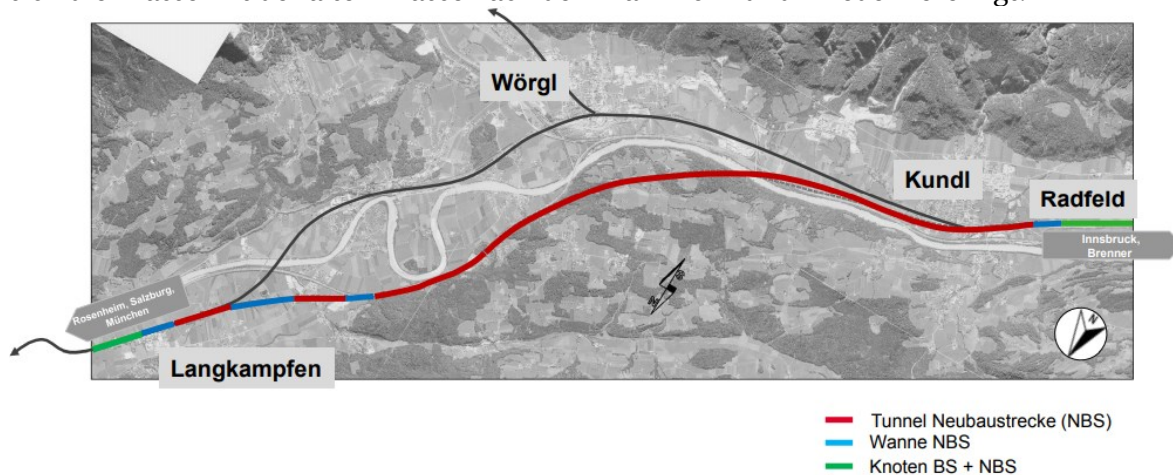
5.1. Allgemeines

Das transeuropäische Verkehrsnetz (TEN-T) (Abbildung 45) verfolgt das Ziel eine gut vernetzte Infrastruktur für die Wettbewerbsfähigkeit, das Wachstum, die Beschäftigung und den Wohlstand für Europa zu schaffen. Einen Teil des TEN-Netzes bilden die Eisenbahnverbindungen. Gewisse Strecken sind zum Kernnetz erklärt worden. Diese Strecken sind vertraglich bis 2030 auf einen vereinbarten technischen Standard zu bringen.



Abbildung 45: TEN-T Schienennetz (Sünner & Wedemeier)

Auf der Strecke Skandinavien - Mediterranien quert die Strecke Österreich und die Alpen mithilfe des Brennerbasistunnels. Das Projekt Schaftenau-Radfeld dient als Zubringerstrecke zum Brennerbasistunnel. Der Verlauf (Abbildung 46) der gewählten Streckentrasse führt vom Bahnhof Schaftenau, wo sich die Streckenführung von der alten Trasse trennt, über mehrere Wannen und Tunnelbauwerke an Wörgl vorbei und unter dem Inn hindurch, wo sich die Trasse mit der alten Trasse nach dem Bahnhof Kundl wieder vereinigt.



Die Strecke wird in mehrere Abschnitte gegliedert. Der Angerbergtunnel wird ebenfalls in einzelne Abschnitte weiter unterteilt:

- Wanne Schaftenau
 - Langkampfener Tunnel
 - Wanne Langkampfen
 - Niederbreitenbachertunnel
 - Wanne Niederbreitenbach
 - Tunnel Neuegg
 - Tunnel Rastplatz Angath
 - Tunnel Bereich Fürth
 - Tunnel Angerbergstraße
 - Angerbergtunnel (geschlossene Bauweise = GBW)
 - Tunnel Kundl
 - Wanne Kundl.
- } (offene Bauweise Angerbergtunnel)

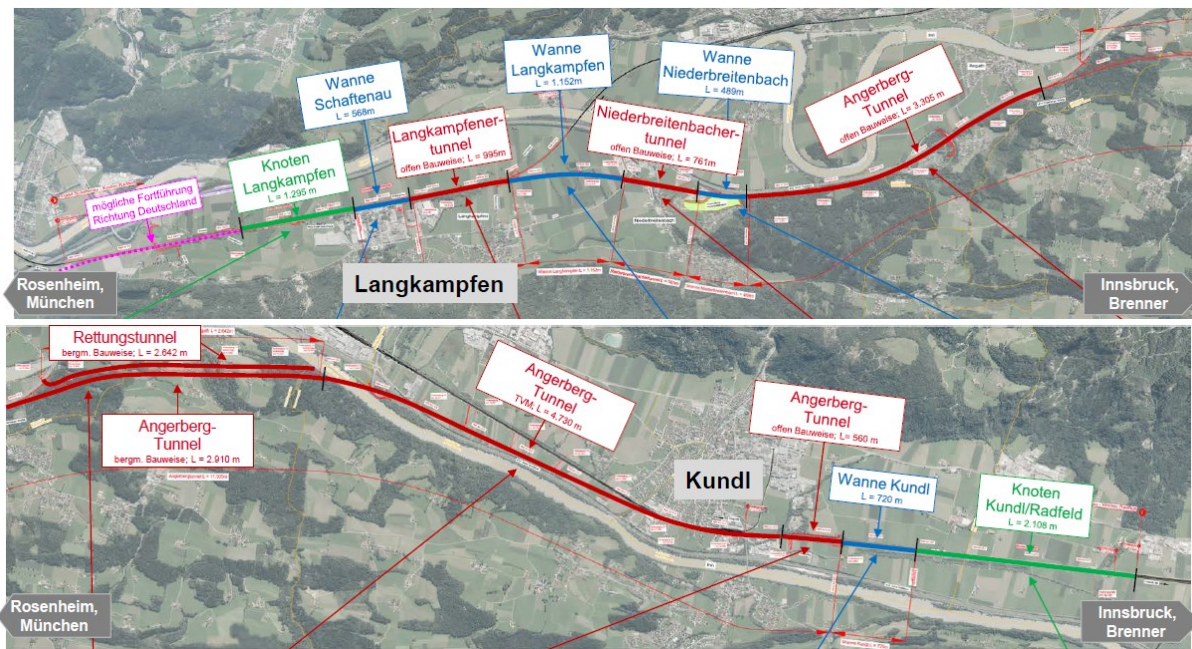


Abbildung 47: Abschnittseinteilung der NBS Schaftenau - Radfeld

Die Tunnelachse der NBS Schaftenau - Radfeld liegt großteils sehr nah an der Oberfläche. Deshalb werden große Teile der Strecke (alles außer der Angerbergtunnel) in offener Bauweise erstellt. Die geologische Erkundung für diese Bereiche ergab eine Mischung aus Innschotter und Innsanden.

Das längste durchgehende Tunnelobjekt in dem geplanten Abschnitt ist der Angerbergtunnel. Der Tunnel wird laut dem Stand der heutigen Planung in drei Abschnitte eingeteilt. Im östlichen Teil des Tunnelbauwerkes liegt der Tunnel seicht unter der Oberfläche und wird daher mit offener Bauweise hergestellt. Der mittlere Bereich des Tunnels besitzt eine höhere Überlagerung und die Geologie ändert sich zu Festgestein (Unterangerberger Formation). Dieser Teil des Tunnels, sowie der zugehörige Rettungstunnel soll konventionell ausgebrochen werden. Der westlichste Abschnitt des Angerbergertunnels besitzt eine relativ geringe Überdeckung und die geologischen Bedingungen sind Seesedimente mit teilweiser Mischung von Innschotter und Innsanden. In diesem Abschnitt erfolgt auch die Unterquerung des Inns und ein Teilbereich der Strecke verläuft im Nahbereich der alten Trasse, sodass eine offene Bauweise nicht möglich ist. Geplant ist der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine für diesen Streckenabschnitt.

Die zur Auswahl stehenden Maschinen-Typen, die für dieses Projekt geeignet erscheinen sind:

- die EPB-Maschine
- die Slurry-Maschine
- die Variable-Density-Maschine.

EPB-Maschine:

Die Sieblinien der Seesedimente (proximal und distal) sprechen für die Verwendung einer EPB-Maschine. Probleme stellen die Bereiche mit Innschotter und Innsanden dar. Diese Bereiche liegen trotz der Konditionierungsmittel im Grenzbereich des Möglichen. Der Einsatzbereich von EPB-Maschinen weitet sich, durch den Einsatz von neuen Bodenkonditionierungsmitteln, in Richtung Sand- und Kiesbereich immer weiter aus. Die geeigneten Bodeneigenschaften müssen bei diesem Projekt auch noch unter Wasserdruck erreicht werden. Ob in diesem Korngrößenbereich und mit Wasserdruck, durch den Einsatz von Konditionierungsmitteln eine geeignete Konsistenz erreicht wird und ein Vortrieb mit einer EPB-Maschine möglich ist, muss noch durch eine genaue Untersuchung vorab eruiert werden.

Slurry-Maschine:

Der Einsatzbereich einer Slurry-Maschine liegt genau in dem Korngrößenbereich, indem sich die vorkommenden Innschotter und Innsande bewegen. Das große Problem stellen die Seesediment-Bereiche dar. Durch den hohen Feinkornanteil in diesem Abschnitt ist eine Trennung der Bentonit-Suspension vom Ausbruchmaterial nur erschwert möglich. Und ohne Rückgewinnung sind die Kosten für das Verfahren hoch. Der hohe Feinkornanteil führt zur Verunreinigung der Bentonit-Suspension, die dadurch nicht wiederverwendet werden kann und deshalb zu höheren Kosten führt, weil die Bentonit-Suspension regelmäßig ausgetauscht werden muss.

Variable Density-Maschine:

Die Variable Density-Maschine ist die Kombination einer EPB- und einer Slurry-Maschine. Durch die inhomogenen Verhältnisse im Streckenabschnitt des Angerbergstunnels ist die VDS-Maschine daher eine gute Option. Gegen sie sprechen die höheren Kosten bei der Anschaffung und die neuartige und unbekanntete Technologie, die bis jetzt nur selten eingesetzt wurde und daher wenig Erfahrungswerte vorliegen.

Zusammenfassung:

Laut dem Gespräch mit Herrn Pratter und Herrn Galler ist die Variable-Density-Maschine zum jetzigen Zeitpunkt der Planung die bevorzugte Variante. Aufgrund der Inhomogenität der Geologie und den hohen Anforderungen im Setzungsbereich (im Nahbereich von bestehenden Gleisanlagen und Gebäuden) ist die VDS-Maschine, die Variante mit dem größten Sicherheitspolster, die beste Möglichkeit um auf Ereignisse zu reagieren. Aus meiner Sicht stellt die EPB-Maschine nach jetzigem Wissensstand eine gute Alternative dar. Eine genaue Überprüfung, ob die EPB-Maschine mit geeigneten Bodenkonditionierungsmaßnahmen eine Alternative darstellt, sollte vorgenommen werden, bevor die priorisierte Vortriebsmethode mit einer VDS-Maschine fixiert wird.

5.2. Geologie

In Tabelle 21 sind den verschiedenen Bauabschnitten, jeweils die geologischen Einheiten und den daraus resultierenden Bau- und Vortriebsverfahren zugeordnet. Die vorhergesehenen Verwertungsmöglichkeiten aus der Arbeit von Pratter stehen ebenfalls in der Tabelle. In Tabelle 22 sind die geomechanischen Eigenschaften der verschiedenen Lithologien aufgelistet.

Tabelle 21: Zusammenfassung der Geologie und der Ausbruch-Verwertungsmöglichkeit der NBS Schaftenau – Knoten Radfeld (Pratter, 2020)

Abschnittunterteilung	Tunnelmeter		Tunnellänge [m]	Prognostizierte geologische Einheiten	Bauverfahren	Vortriebs-Verfahren	Verwertungsmöglichkeit laut Pratter
	von [m]	bis[m]					
Wanne Schaftenau	8210	8778	568	Innschotter; Innsande Anthropogene Ablagerungen	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff-Beton
Langkampfener Tunnel	8778	9773	995	Innschotter; Innsande	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff-Beton
Wanne Langkampfen	9773	10925	1152	Innschotter; Innsande	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff-Beton
Niederbreitenbachertunnel	10925	11686	761	Innschotter; Innsande Schwemmfächer und Murenablagerung	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff- Beton
Wanne Niederbreitenbach	11686	12175	489	Innschotter; Innsande glazigene Sedimente Konglomerate	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff-Beton
Tunnel Neuegg	12175	13495	1320	Dolomit glazigene Sedimente Konglomerate Schwemmfächer und Murenablagerung	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff-Beton
Tunnel Rastplatz Angath	13495	14265	770	Innschotter; Innsande Schwemmfächer und Murenablagerung	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff-Beton
Tunnel Bereich Fürth	14265	15102	837	Innschotter Dolomit Murenablagerung und Schwemmfächer glazigene Sedimente	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff-Beton
Tunnel Angerbergstraße	15102	15500	398	Innschotter; Innsande Dolomit glazigene Sedimente	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff-Beton
Angerbergertunnel GBW	15500	23100	7600	Seesedimente (proximal) Seesedimente (distal) Unterangerberger Formation Innschotter; Innsande	Geschlossene Bauweise	Konventionelle Bauweise Maschinelle Bauweise	Zuschlagstoff-Beton HWS-Damm
Tunnel Kundl	23100	23680	580	Innschotter	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff-Beton
Wanne Kundl	23680	24600	920	Innschotter	Offene Bauweise	Baggeraushub	Zuschlagstoff-Beton

Tabelle 22: Wichte, Durchlässigkeits-, Verformungs- und Festigkeitsparameter der vorhandenen Gesteinsformationen (Pratter, 2020)

Bezeichnung	Wichte (feucht)	Wichte unter Auftrieb	Durchlässigkeitsbeiwert	Reibungswinkel (Laborergebnis)	Kohäsion (Laborergebnis)	Reibungswinkel (charakteristisch)	Kohäsion (charakteristisch)	Steifemodul
	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[m/s]	[°]	[KN/m ²]	[°]	[KN/m ²]	[MPa]
Innschotter	21	11	1,13*10 ⁻³	37	24	37	-	95
Innsande	20	10	3,80*10 ⁻⁴	33	29	33	-	-
Seesedimente (proximal)	20	10	4,18*10 ⁻⁶	32	25	32	20	47 - 109
Seesedimente (distal)	20	10	-	30	19	28	25	45-54
Schwemmfächer & Murenabl.	21	11	2,32*10 ⁻³	38	18	-	-	127
glazigene Sedimente	21	11	1,42*10 ⁻⁵	36	20	-	-	-
Unterangerberger Formation	26	16	-	45	5000	35	4	10000
Dolomit	-	-	-	-	-	-	-	-

5.3. Verwertung des Tunnelausbruches

In diesem Kapitel wird darauf eingegangen welche Verwertungsmöglichkeiten von Tunnelausbruch in der Arbeit von Pratter eruiert wurden und welche Auswirkungen die vorgesehenen Vortriebsverfahren und die verwendeten Stützmittel, Sicherungsmittel und Sprengstoffe besitzen.

Offene Bauweise:

Die Tunnel und Wannenbauwerke, die in offener Bauweise errichtet werden, sind keinen Verunreinigungen ausgesetzt. In den Randbereichen der Baugrube sind, je nach Verbauungsmethode, Verunreinigungen möglich. Bei Schlitz-, Bohrpfahlwänden und Düsenstrahlverfahren ist die Vermischung in den Randbereichen nicht ausgeschlossen. Abgesehen davon besteht für das Ausbruchmaterial keine zusätzliche Verschmutzungsgefahr. Die Tunnelbereiche, die in offener Bauweise bearbeitet werden, bestehen größtenteils aus Innschotter und Innsanden und sind deshalb als HG- und HU-Gesteinskörnungen gut geeignet. Der offenen Bauweise und die Nutzung des Ausbruchmaterials als Zuschlagstoff für Beton für Eigen- oder Fremdnutzung, steht mit der gewählten Vortriebsmethode nichts im Weg.

Konventionelle Bauweise:

Im Abschnitt Angerbergertunnel, im Bereich der Unterangerberger Formation (Mischung aus Mergel, Ton und Sandstein), wird mit dem Bagger oder mit Sprengmittel vorgetrieben. Beim Baggerausbruch entstehen durch den Löseprozess keine Verunreinigungen.

Beim Sprengvortrieb entsteht eine Erhöhung bei den Nitrat-, Nitrit- und Ammonium-Konzentrationen. Durch vollständige Umsetzung der neuartigen Sprengstoffe, die geringere Schadstoffmengen bei der Umsetzung produzieren, werden die Grenzwerte des BAWP eingehalten. Wichtig ist, dass keine Reste von nicht umgesetztem Material im Ausbruch verbleiben.

Einen Teil zur Verunreinigung tragen die Sicherungsmittel (Spritzbeton) bei. Das Sicherungsmittel Spritzbeton führt zur Erhöhung des pH-Wertes. Wenn Füllerstoffe eingesetzt werden, kommt es zu keiner Überschreitung der Grenzwerte. Ist die Menge des Spritzbetons unter 10 Volumenprozent des Ausbruches und die chemische Charakterisierung ergibt keine Grenzüberschreitung, ist die Verwertung als Recycling-Baustoff weiterhin möglich. Die Deponierungsklasse ist abhängig von der Charakterisierung. Unter 5 Volumenprozent Spritzbeton ist die Deponierung des Ausbruchmaterials in der Deponierungsklasse Bodenaushub erlaubt.

Als Hauptbestandteile des Ton-, Mergel- und Sandsteingemisches (Unterangerberger Formation) sind in der Literatur Quarz und Feldspat aufgelistet (keine chemische Analyse vorhanden). Mangels der Druck-, Witterungs- und Frostbeständigkeit ist das Ausbruchmaterial laut Hagelauer & Wolff nicht für die HG- und die HU- Gesteinskörnungen verwendbar. Als Einsatzbereiche gelten die Verwendung als Rohstoff in der Keramikindustrie oder als Ausgangsstoff in der Zementindustrie. Die geogene chemische Zusammensetzung ist ausschlaggebend, ob eine Verwendung stattfinden kann. Die eingebrachten Sprengmittel stellen bei dieser Art der Verwendung kein Problem dar. Die Vermischung von Spritzbeton und Ausbruchmaterial ist jedoch für die Herstellung der hochwertigen Rohstoffe Keramik und Zement ein Problem. Wenn die Verwertung aufgrund der chemischen Zusammensetzung möglich ist, sind Regelungen (z.B. eigene Position in der Ausschreibung für die Trennung von Spritzbeton und Ausbruchmaterial) zu treffen, um die frühzeitige Trennung von Ausbruchmaterial und Spritzbeton finanziell sicherzustellen.

Dem Einsatz als Material für die Hochwasserschutz-Dämme (HWS-Dämme) steht aufgrund der Vortriebsmethode nichts im Weg.

Maschinelle Bauweise:

Durch die unterschiedlichen Tunnelbohrmaschinen gibt es auch unterschiedliche Auswirkungen auf die Verwertbarkeit des Ausbruchmaterials.

Slurry-Maschine:

Durch die feine Korngrößenverteilung ist die Trennung von der Bentonit-Suspension nur erschwert möglich. Ein gewisser Anteil wird aus dem Ausbruchmaterial nicht wiedergewinnbar sein. Dies führt zu erhöhten Kosten, wegen dem erhöhten Bentonitbedarf. Die Entsorgung des Ausbruchmaterials als Bodenaushub ist durch das Einbringen einer Bentonit-Suspension nicht mehr möglich, weil das Bentonit für die Aushubtätigkeit eingebracht wurde und der Grenzwert von 5 Volumenprozent nicht eingehalten wird. Der Ausbruch muss dann in eine Deponie der Inertabfallklasse oder in eine Deponie für nicht gefährliche Abfälle gebracht werden.

Die Grenze von 30 Volumenprozent von mineralischen Baurestmassen, die im BAWP für die Verwertung gesetzt ist, sollte einhaltbar sein. Wird das Ausbruchmaterial nicht verwertet, sind ab 10 Volumenprozent ALSAG-Gebühren zu entrichten und das Projekt wird deutlich teurer. Ein größeres Problem stellen die sich ändernden Eigenschaften des Ausbruchmaterials dar. Die Quellfähigkeit des Bentonit bleibt erhalten. Ob das Material als Dammschüttmaterial geeignet ist und wie die Durchlässigkeit sich verhält, ist durch Versuche vor Ort festzustellen. Die industrielle Verwendung scheint durch die breite Durchmischung mit Bentonit nicht möglich. Die Verwendung des Ausbruches als Gesteinskörnung scheidet aufgrund der vorhandenen Korngröße und dem Bentonit, der die Abbindezeit von Beton verlängert und die Betonfestigkeit reduziert, aus. Zusammenfassend lässt sich festhalten: Der Einsatz einer Slurry-Maschine würde die Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten vom Ausbruch deutlich negativ beeinflussen.

EPB-Maschine:

Durch die Zugabe von Wasser, Tensiden und Polymere wird die geeignete Bodenkonsistenz hergestellt. Der gesetzliche Grenzwert für anionenaktive Tenside ist beim Vortrieb mit einer EPB-Maschine zu beachten. Der wichtigste Punkt bezüglich Grenzwerte ist der Zeitpunkt der Probennahme. Hier entscheidet sich, ob die Verwertung gemäß BAWP erlaubt ist, oder in welche Deponieklasse das Ausbruchmaterial fällt. Bei der Verwendung von biologisch abbaubaren Bodenconditionierungsmitteln lösen sich diese innerhalb kurzer Zeit (siehe Kapitel 4.7). Die Eigenschaften des Bodens nähern sich den ursprünglichen Eigenschaften wieder an. Die Konsistenz des Bodens ändert sich durch die Zugabe von Wasser dauerhaft. Die Entwässerung des Ausbruchmaterials ist aufwendig. Laut Langmaack (2017) kann durch die Zugabe von mehr Conditionierungsmittel die notwendige Wasserzugabe reduziert werden. Wenn Füller verwendet werden, werden die Durchlässigkeit und die chemische Zusammensetzung verändert. Eine Abstimmung mit dem Betrieb, der das Ausbruchmaterial in Folge übernimmt, ist notwendig.

Laut Herrn Pratter haben die befragten Industrien bis jetzt keine Erfahrungen mit Ausbruchmaterial, das mit Bodenconditionierungsmittel vermengt wurde. EPB-Maschinen werden bei Böden eingesetzt, die bis jetzt selten einer Wiederverwertung zugefügt wurden, außer als Verfüllungsmaterial. Der Verwendungszweck, der in der Arbeit von Herrn Pratter angestrebt wird, ist die Verwendung als Hochwasserschutzdamm-Material. Der Vortrieb mit einer EPB-Maschine verursacht, wenn die ausgewählten Conditionierungsmittel biologisch abbaubar sind, anhand der Literatur keine negativen Auswirkungen beim vorgesehenen Verwendungszweck.

VDS-Maschine:

Bei der Verwendung einer Variable-Density-Maschine sind alle Punkte, sowohl von der EPB-Maschine, als auch der Slurry-Maschine, abhängig von dem gewählten Betriebsmodus, zu beachten.

6. FCC (Future Circular Collider)

6.1. Allgemeines

1954 wurde von europäischen Forschern in der Nähe der Grenze zwischen Frankreich und der Schweiz in der Region Genf ein Atom-Physik-Labor gegründet. Die Mission von CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) ist die Bestandteile des Universums zu erforschen und das Wissen der Menschheit zu erweitern. In CERN wird grundsätzlich Grundlagenforschung betrieben. Die Ergebnisse der Forschung finden sogar in unserem täglichen Leben Anwendung. (CERN, 2021b)

23 Mitgliedsstaaten betreiben das Forschungsinstitut CERN. Viele Nicht-Mitgliedsstaaten besitzen eine Kooperationsvereinbarung mit CERN. Dafür stellt CERN eine Reihe von Partikel-Beschleuniger zur Verfügung. In den Beschleunigern werden unterschiedliche Detektoren den Zusammenprall von Protonen aus.

Die Beschleunigung von Teilchen (Protonen) erfolgt in mehreren Zwischenstufen in verschiedenen Beschleunigern. Jede Stufe erhöht die Energiedichte der Partikel. Der Beschleunigungsvorgang erfolgt in folgenden Beschleunigern:

- Linac 2 (Linear-Beschleuniger);
- Proton Synchrotron Booster (PSB);
- Proton Synchrotron (PS), mit einem Kreisumfang von 628 m;
- Super Proton Synchrotron (SPS), mit einem Kreisumfang von 7.000 m;
- Large Hadron Collider (LHC), mit einem Kreisumfang von 27.000 m.

Mit dem Zukunftsprojekt dem FCC (Future Circular Collider) (siehe Abbildung 48) soll die Energiemenge erhöht werden. Der FCC wird entwickelt, um die Forschungsarbeiten zu erweitern, weil der bestehende LHC (Large Hadron Collider) das Ende seiner Möglichkeiten erreicht. Um noch mehr Energie in den Zusammenprall der Protonen zu stecken, muss ein größerer Beschleuniger (FCC) gebaut werden. Der FCC-Beschleuniger wird einen Gesamtumfang von knapp 100 km besitzen. Zusätzlich müssen noch Schächte und Kavernen für die Maschinen erstellt werden. (CERN, 2021a)

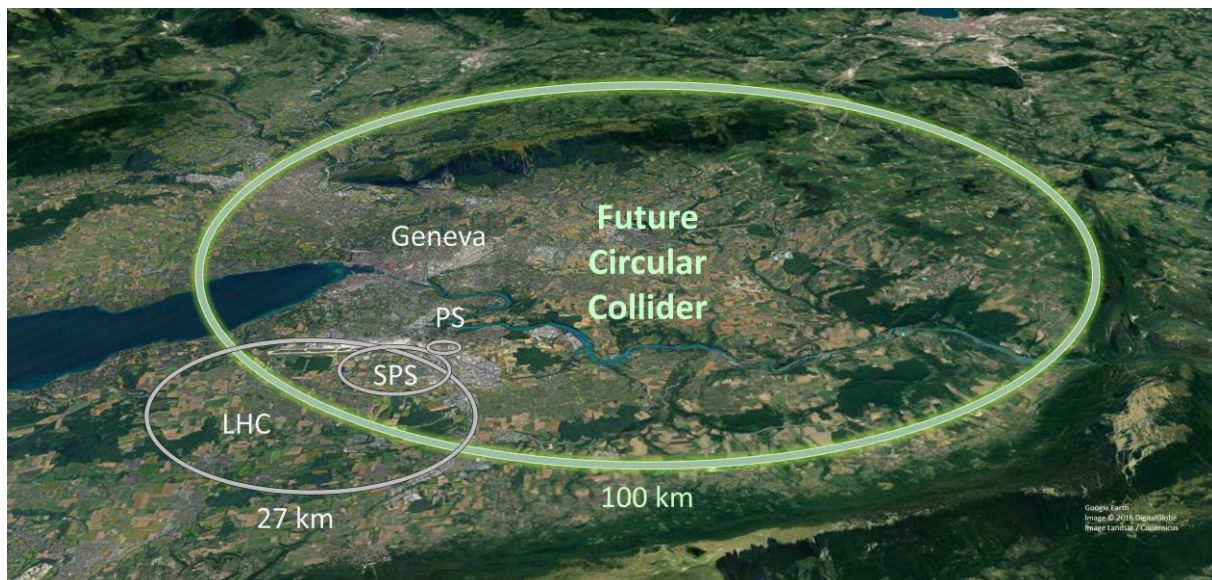


Abbildung 48: Lage des geplanten FCC (CERN, 2021a)

6.2. Geologie

Der geplante FCC liegt im Genfer Becken und befindet sich daher im Molassebecken, das sich über eine Länge von ca. 800 km entlang der Alpen erstreckt. Das Molassebecken entstand

durch die Subsidenz der Europäischen Platte unter die Adriatischen Platte. Die Füllung des Beckens erfolgte vor ca. 25 Mio. Jahren. Die Mächtigkeit der Molasse beträgt bis zu 5.000 m. Die Molasse besteht aus wenig verfestigtem Kalk-, Sandstein und Mergel. In der geplanten Höhe der Tunnelachse befindet sich Molasse, wobei zwischen Sandstein und Mergel unterschieden werden muss. In Abbildung 49 ist der Längsschnitt des FCC zu sehen. Der Großteil der Strecke befindet sich in der Molassezone. In Abbildung 50 ist das Dreiecksdiagramm der Sedimentgesteine dargestellt.

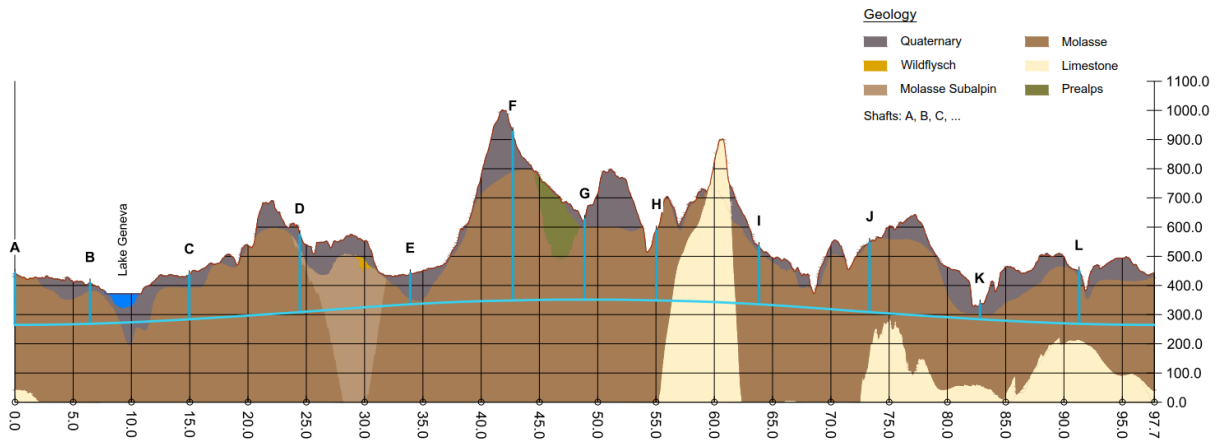


Abbildung 49: Längsschnitt FCC (Osborne et al.)

Mergel

Mergel ist eine Mischung aus Kalkstein und Tonstein und gehört zu den Sedimentgesteinen. Bei höheren Werten von Kalk spricht man von Kalkmergel, bei niedrigeren von Tonmergel. Einsatz findet das Gestein in der Zementindustrie. (Wikipedia, 2021a)

Sandstein

Sandstein ist ebenfalls ein Sedimentgestein einer Korngröße zwischen 0,063 mm und 2 mm. Der Hauptbestandteil von Sandstein ist Quarz. Je geringer der Quarz-Gehalt ist, desto weniger fest ist der Sandstein. Bei einem großen Karbonat-Anteil bezeichnet man das Gestein als Kalksandstein. Eine Verwendung als Naturstein bietet sich an. (baustoffwissen, 2016)

Tonstein

Tonstein ist ein Sedimentgestein und besteht aus Montmorillonit, Illit und Smectit. Kleine Gemeineteilteile können Quarz, Feldspat und Carbonate sein. Der Tonstein findet Verwendung in der Ziegelindustrie. (Wikipedia, 2019)

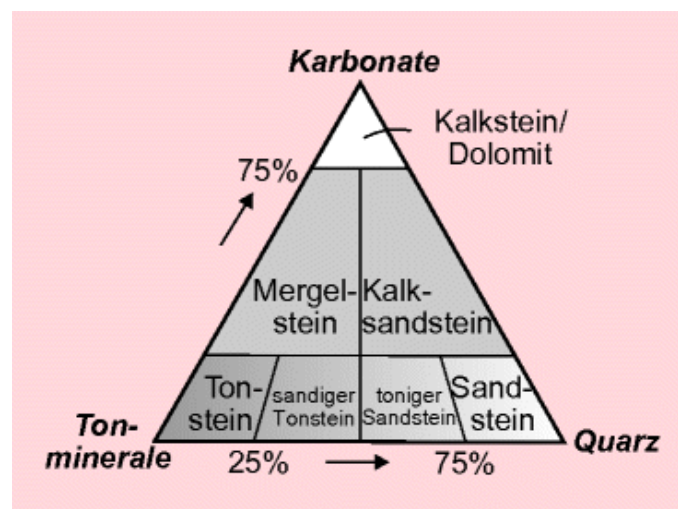


Abbildung 50: Dreiecksdiagramm: Karbonate, Tonminerale und Quarz (Ulrich, 2018)

6.3. Chemische und geomechanische Untersuchung der Kernbohrungen

Die geomechanischen Werte, die für diese Masterarbeit verarbeitet wurden, sind die Daten, die vom Forschungsinstitut CERN für den Wettbewerb „Mining the Future“ zur Verfügung stehen, die wiederum im Zuge der Dissertation von Maximilian Haas in CERN entstanden. Ein Problem stellt die geringe Anzahl an Kernbohrungen im Umfeld des FCC dar. Weitere Kernbohrungen sind erst in Planung. Ziel des Wettbewerbes ist die Sammlung von Ideen für die Verwertung des Tunnelausbruches. Der Hauptbestandteil des Tunnelausbruches besteht aus Molasse und die zeigt wenig wirtschaftliche Anwendungsbereiche auf.

In den geomechanischen Auswertungen ist ersichtlich, dass die Gesteinshärte zwischen 10-70 N/mm² schwankt. Der Cerchar-Abrasivitäts-Index liegt zwischen 0,5-1,5 im sehr niedrigen Bereich. Die Durchlässigkeit der erwähnten Kernbohrungen bewegt sich im Bereich von $7,4 \cdot 10^{-11}$ m/s bis $8,43 \cdot 10^{-6}$ m/s. Die Porosität liegt zwischen 1,2-29,1 %.

Die Grenzwerte, die für die chemische Analyse der Kernbohrungen herangezogen wurden, sind aus der Abfallverordnung (VVEA/1. Januar 2021) des Schweizer Bundesrates. Zu Überschreitungen der Grenzwerte für die Verwertung Klasse 1 (dieselben Grenzwerte wie für die Deponieklasse A) und Klasse 2 kommt es bei den Feststoffen: Nickel, Chrom, Arsen, Cadmium und Blei (siehe Tabelle 23). Der Prozentsatz gibt an wie viele der 375 Proben die Grenzwerte überschritten haben.

In der Schweiz wird der Ausbruch in drei Klassen unterteilt (Art. 19). In der Klasse 1 ist der Ausbruch für jegliche Verwertung geeignet (Baustoffe, Rohstoffe, Wiederauffüllung von Materialentnahmestellen und bewilligte Terrainveränderungen). Die Klasse 2 lässt folgende Verwertungsmöglichkeiten zu:

- Rohstoff für die Herstellung von hydraulischen oder bituminösen Baustoffen;
- Rohmaterial für Zementklinker;
- Deponierung Typ B-E.

Bei Tiefbauarbeiten ist, wie in Österreich, die Wiederverwertung direkt auf der Baustelle erlaubt. Der Ausbruch, der nicht in diese Kategorien (Klasse 1 und Klasse 2) fällt, ist nicht einer Wiederverwertung zuzuführen und daher zu deponieren. Die Schweiz besitzt fünf Deponierungsklassen von A-E (siehe Tabelle 24). Die Grenzwerte im Eluat wurden bei Quecksilber, Chrom_{VI}, Cyanid und Ammoniak bei einzelnen Proben überschritten. Grenzwerte für Eluat bestehen erst ab der Deponierungsklasse Typ B.

Tabelle 23: Überprüfung der Grenzwerte für Feststoffe (eigene Darstellung anhand von Daten aus dem Wettbewerb „Mining the Future“, M. Haas)

[mg/kg TM]	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Cr gesamt
Grenzwerte laut Artikel 17 Abs. 1 und 19 (Klasse 1 / Deponierungsklasse Typ A)	40	50	150	50	15	1	3	50
Prozentsatz der Grenzwertüberschreitungen [%]	23,7	8,8	0,8	90,9	3,5	0,8	0,0	92,5
Grenzwerte laut Artikel 17 Abs. 2 (Klasse 2)	250	250	500	250	15	5	15	250
Prozentsatz der Grenzwertüberschreitungen [%]	0,0	1,6	0,0	6,4	3,5	0,8	0,0	9,6

Durch die mineralogische Analyse mithilfe von XRD (X-Ray diffraction) und FTIR (Fourier Transform Infrared spectroscopy) sind folgende Hauptbestandteile festgestellt worden (siehe Abbildung 51):

- Quarz
- Feldspat
- Plagioclase
- Calcit
- Dolomit/Ankerit
- Ton.

Tabelle 24: Überprüfung der Grenzwerte für Eluate (eigene Darstellung anhand von Daten aus dem Wettbewerb „Mining the Future“ M.Haas)

[mg/l]	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Zn	F	Cr_VI	NH4	NO2	CN
Mittelwert	0,01	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02	0,02	0,00	0,03	0,01	0,49	0,34	0,34	0,05	0,02
Maximal Wert	0,071	0,003	0,024	0,349	0,099	0,272	0,220	0,035	0,968	0,068	1,71	0,85	1,19	0,21	0,07
Grenzwert Schweiz Typ B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,00	-	0,50	1,00	0,02
Prozentsatz der Grenzwertüberschreitungen [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	6	0	16
Grenzwert Schweiz Typ C	0,1	0,1	0,5	2	0,5	0,01	2	1	2	10	10,00	0,10	5,00	1,00	0,10
Prozentsatz der Grenzwertüberschreitungen [%]	0	0	0	0	0	28,7	0	0	0	0	0	41	0	0	0
Grenzwert Schweiz Typ D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					0,20
Prozentsatz der Grenzwertüberschreitungen [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					0
Grenzwert Schweiz Typ E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					0,30
Prozentsatz der Grenzwertüberschreitungen [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					0

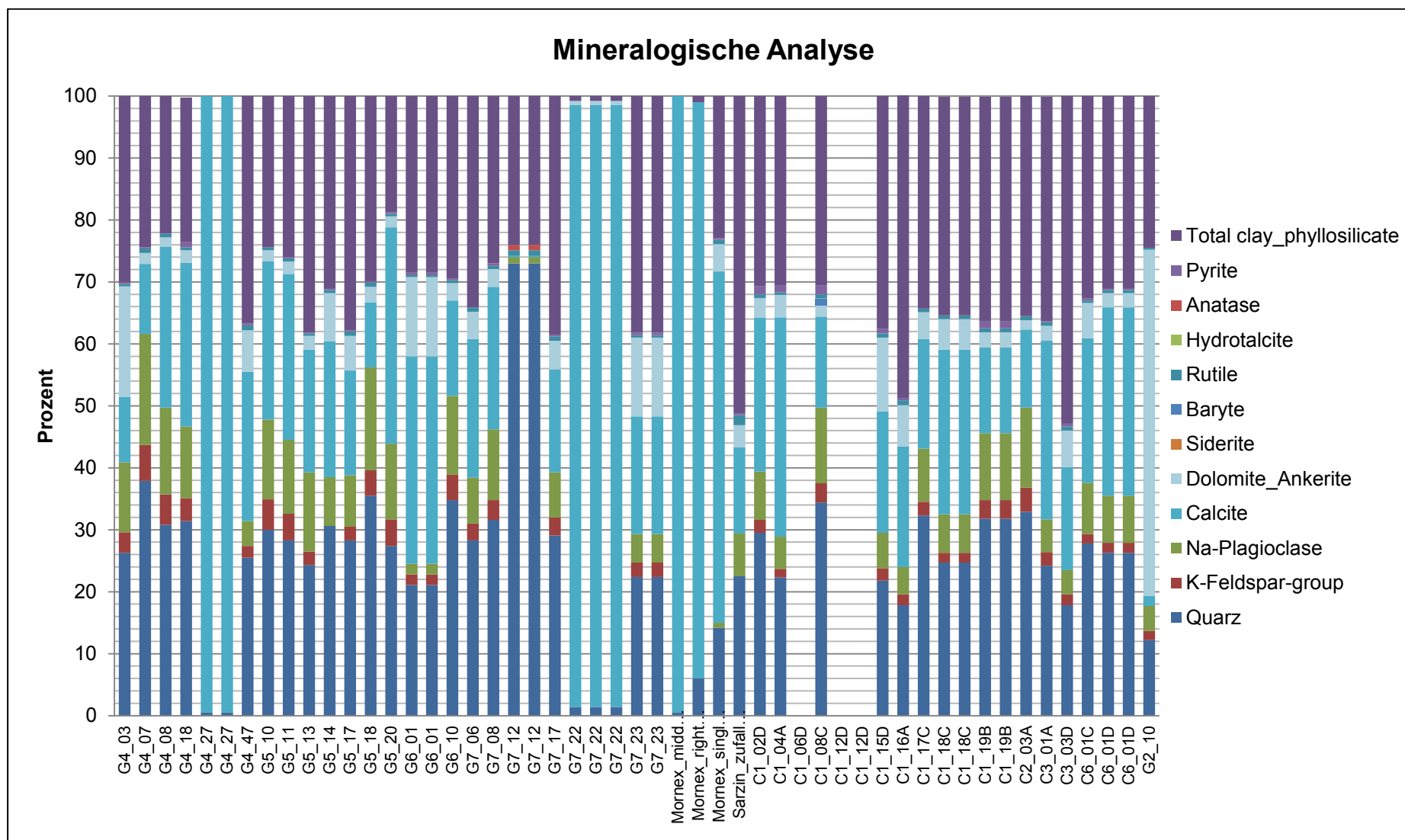


Abbildung 51: Mineralogische Zusammensetzung (eigene Darstellung anhand von Daten aus dem Wettbewerb „Mining the Future“ M.Haas)

In der Veröffentlichung von Haas wird erwähnt, dass ein weiterer wichtiger Hauptbestandteil des Untergrundes Anhydrit ist. Auswirkungen auf die Vortriebsmethode werden befürchtet. Bei XRD-Analyse-Ergebnissen von durchgeführten Kernbohrungen wurde kein Anhydrit nachgewiesen. Nicht bekannt ist daher, ob in den nicht beprobten Bereichen des Projektes Anhydrit vorkommt. (M. Haas, 2020b)

6.4. Vortriebsmethoden

Zu Beginn müssen die Schächte, vermutlich mit konventioneller Methode, mit Sprengstoff oder Baggeraushub vorgetrieben werden. Die Kavernen für die Maschinen werden dann in konventioneller Bauweise errichtet. Abhängig von der Härte der Molasse wird vermutlich Bagger- und Sprengvortrieb zum Einsatz kommen. Der Bau des Loop (kreisförmige Tunnelröhre) wird aufgrund des konstanten Querschnittes, der großen Länge und der vermutlich relativ konstanten Geologie mithilfe mehrerer Tunnelbohrmaschinen erfolgen. Die Gesteinsfestigkeit ist für eine Hartgesteinsmaschine nicht hoch genug. Der letzte Stand bei den Planungen ist der Einsatz einer EPB-Maschine, die zu großen Teilen der Strecke ohne Ortsbruststützung vortreiben wird. Der Unterschied zur TBM-S liegt nur in den Abbauwerkzeugen. Anstatt nur Disken werden auch Schällmesser eingesetzt.

Die größte Unsicherheit liegt hier bei der Gefahr des Quellens vom eventuell vorkommenden Anhydrit und den vorhandenen Tonfraktionen. Bei zu großen Verformungen besteht die Gefahr des Steckenbleibens der Tunnelbohrmaschine. Zu einem späteren Zeitpunkt droht die Zerstörung der Tübbingschale durch den Quelldruck. Um die Verformungen zu verhindern, spielt die Vermeidung von Wasser bei der Herstellung eine wichtige Rolle. Geklärt werden muss, ob sich diese geologischen Bedingungen über die ganze Längsachse des Tunnels erstrecken. Ist die Gefahr des Quellens für die Herstellung zu groß, muss überlegt werden, ob beim Loop konventioneller Vortrieb zum Einsatz kommt, bei dem durch Stauchelemente die Radialverformung aufgenommen wird und somit die Außenschale nicht beschädigt wird.

6.5. Verwertungsmöglichkeiten

Als erste Verwertungsmöglichkeit des Ausbruches bietet sich die Verwendung als hydraulisch gebundene oder ungebundene Gesteinskörnung zur unmittelbaren Nutzung an. In der SN-Norm EN 12620 sind keine Grenzwerte für die Gesteinsfestigkeit definiert. Laut Thalmann sind aber Werte von 60 N/mm² für die Gesteinsfestigkeit für C 20/25 Beton anzustreben. Die Richtlinie der ÖBV verlangt mindestens die doppelte Gesteins Härte der angestrebten Betonhärte. Die Gesteinsfestigkeit der Gesteinskörnungen sollte deutlich über der gewünschten Festigkeit des Betons liegen. Die Härte, die in den jetzigen Bohrkernen erreicht wurde, liegt zwischen 10–70 N/mm². Dies ist nicht ausreichend für die Nutzung des Ausbruchmaterials als HG-Gesteinskörnung.

In der Arbeit von Haas wird die Gewinnung von Nickel und Chrom als Verwertungszweck ins Spiel gebracht. Diese Verwertung ist unter normalen Umständen vermutlich nicht wirtschaftlich. Durch die Entfernung der Elemente aus dem Ausbruch würden aber die Grenzwerte für niedrigere Deponieklassen eingehalten. Somit könnten die Kosten für die Deponierung reduziert werden. (M Haas, 2020a) Weitere Einsatzmöglichkeiten:

- Aufschüttungen
- Hochwasserschutzdämme
- Zementindustrie
- Ziegelindustrie
- künstliche Kalksandsteine.

Die Trennung von Sandstein, Mergel und Kalkstein während des Vortriebs, zu den geforderten Qualitäten, stellt eine große Herausforderung dar. An Konzepten für die Trennung durch On-line-Analysen auf Tunnelbohrmaschinen wird bereits geforscht. (z.B. (Seidler, 2018)) Konkrete Anwendungsfälle bei Tunnelbaustellen, um die Einsetzbarkeit aufzuzeigen, liegen noch nicht vor.

6.6. Auswirkungen der verschiedenen Vortriebsmöglichkeiten

Beim Sprengvortrieb kommt es zur Erhöhung der Ammonium-, Nitrat- und Nitrit-Konzentrationen im Ausbruchmaterial. Die Werte für Ammoniak sind im ursprünglichen Bodenmaterial bereits leicht erhöht (siehe Tabelle 24). Daher ist bei Ammoniak mit dem Eintrag durch das Sprengmittel mit dem Überschreiten der Werte zu rechnen. Die Nitrit-Werte zeigen nur eine leichte Erhöhung. Abhilfe schafft hier nur der sorgfältige Umgang mit dem Sprengmittel, damit wenig Schadstoffe entstehen und ins Ausbruchmaterial gelangen können.

Beim Baggervortrieb wird mit keiner großen Verunreinigung des Ausbruchmaterials gerechnet. Eine Vermischung von Ausbruchmaterial und Spritzbeton wäre möglich. Dies führt zu höheren pH-Werten und elektrischer Leitfähigkeit. Das Zuschlagsmaterial beeinflusst natürlich die mineralogische Zusammensetzung. Die sorgfältige Trennung von Ausbruch und Spritzbeton ist die beste Lösung für das Problem.

Bei der Herstellung des Tunnels mit einer EPB-Maschine ohne Ortsbruststützung sind keinen großen Verunreinigungen des Materials zu erwarten. Durch den geringen CAI ist von geringem Abrieb der Disken auszugehen. Bei funktionierenden Bürsten gelangt kein Ringspaltmaterial in die Abbaukammer.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei diesem Projekt (FCC) eher die geogenen Bedingungen Schwierigkeiten für die Wiederverwertung des Materials bringen. Sollten alle Vorgaben eingehalten werden, ist durch die geplanten Vortriebsmethoden keine Verschlechterung der Verwertungsmöglichkeiten des Tunnelausbruches zu erwarten.

7. Excel-Sheet zur Bestimmung der Wiederverwertungsmöglichkeit von Tunnelausbruch

7.1. Aufgabe des Excel-Sheets

Das Ziel der Masterarbeit von Herrn Johannes Lenes an der Montan Universität Leoben, die gleichzeitig mit dieser Arbeit erstellt wird, ist eine Excel-Datei zu erstellen, die durch die Eingabe von vorhandenen Parametern von unterschiedlichen Projekten (z.B. CERN), die Verwertungsmöglichkeiten des jeweiligen Aushubes aufzeigen soll. Bis jetzt fließen folgende Parameter in die Auswertung mit ein:

- chemische Untersuchung des Feststoffes und des Eluates
- mineralogische Zusammensetzung
- geomechanische Eigenschaften (UCS, usw.)
- geophysikalische Eigenschaften (Porosität, usw.)
- Korngröße des Tunnelausbruches.

Die angelegte Datenbank mit Grenzwerten für die verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten, die von bereits bestehender Literatur stammen, wird anhand der ermittelten Parameter durchsucht. Die Datei soll sowohl die mögliche Verwertungsmöglichkeit des Ausbruches, als auch die Deponierungsklasse, falls notwendig, anzeigen.

7.2. Aufgabenstellung

Der Themenbereich "Verwertung von Tunnelausbruch unter Berücksichtigung der Auswirkungen von für den Tunnelvortrieb eingebrachten Materialien" wurde bis jetzt in der Excel-Datei bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Die Aufgabe ist es dieses Thema als Einflussfaktor in der Excel-Datei zu ergänzen und somit die Auswirkungen der angewandten Vortriebsmethoden miteinzubeziehen.

7.3. Problemfelder

Die große Variabilität beim Einsatz von Stütz-, Sicherungs-, Sprengmittel und weiteren Stoffen, die im Vortrieb zum Einsatz kommen, stellt ein großes Problem dar. Die Art und Menge der eingesetzten Stoffe ist im Vorhinein nicht fixierbar. Materialien für denselben Einsatzzweck weisen unterschiedliche Inhaltsstoffe, Reaktionsprodukte und Schadstoffkonzentrationen auf. Deshalb sind die realen Konzentrationen, der jeweiligen Stoffe schwer vorherzusagen. Die Daten, die in der Lenes-Excel-Datei zum Einsatz kommen, stammen von chemischen und geomechanischen Untersuchungen und sind genau bestimmbar. Deshalb sollten die Daten nicht miteinander vermischt werden und die Daten aus dem Vortrieb einen eigenen Bereich bekommen. In diesem Bereich wird dann durch die Auswahl der Vortriebsmethode auf die dadurch entstehenden Schadstoffe und auf deren Auswirkungen hingewiesen.

7.4. Bedienungserklärung der Excel-Tabelle

Auf dem Excel-Arbeitsblatt "Eingabe_Vortrieb" ist die Vortriebsmethode auszuwählen. Die Auswahl von mehreren Vortriebsverfahren ist gleichzeitig möglich (siehe Abbildung 52).

3 Vortriebsmethode auswählen:			
4 Eingabefeld:			
5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15	Vortriebsarten	Kontinuierlicher Vortrieb	Gripper-TBM <input type="checkbox"/>
			Einfachschild (TBM-S) <input type="checkbox"/>
			Doppelschild <input type="checkbox"/>
			Flüssigkeitsschild (SLS) <input checked="" type="checkbox"/>
			Erddruckschild (EPB) <input type="checkbox"/>
			Variable-Density-Schild (VDS) <input type="checkbox"/>
			Hybrid/Multimodeschild (HYS) <input type="checkbox"/>
		Zyklischer Vortrieb	Sprengvortrieb <input type="checkbox"/>
			Baggervortrieb <input type="checkbox"/>
		Offene Bauweise <input type="checkbox"/>	
Injektionen <input type="checkbox"/>			

Abbildung 52: Eingabefeld Vortriebsmethode (eigene Darstellung)

Durch die Auswahl der gewünschten Vortriebsverfahren werden automatisch die notwendigen Eingabefelder (gelb hinterlegt) eingeblendet, die für die gewählten Verfahren auszufüllen sind (siehe Abbildung 53). Um auf das Auswertungsergebnis (Excel-Arbeitsblatt: "Auswertung_Vortrieb") umzuschalten, ist die Schaltfläche unten: "Zur Auswertung - hier klicken" zu benutzen (siehe Abbildung 53).

33	Korngrößenbereich:	Bentonit-Prozentgehalt im Ausbruchmaterial	Einheit
34	>4 mm		[%]
35	4-0,02 mm		[%]
36	<0,02 mm		[%]
37			
133	"Zur Auswertung - hier klicken"		

Abbildung 53: Eingabefelder (gelb) und Button "Zur Auswertung-hier klicken" (eigene Darstellung)

Auf dem Excel-Arbeitsblatt "Auswertung_Vortrieb" finden Sie alle Daten, die über die gewählten Vortriebsverfahren und seine Auswirkungen auf die Verwertung des Ausbruchmaterials gesammelt wurden. Um alle Eingabefelder zu löschen und mit der Eingabe erneut zu beginnen, ist auf die Schaltfläche "Daten löschen" auf dem Arbeitsblatt "Eingabe_Vortrieb" zu klicken.

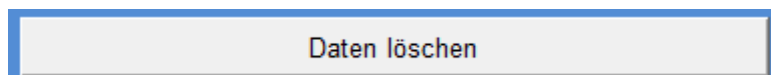


Abbildung 54: Button "Daten löschen" (eigene Darstellung)

8. Fazit

8.1. Allgemeines

Die im Tunnelbau unterschiedlichen Vortriebsverfahren bringen verschiedene anthropogene Veränderungen (z.B. durch Sicherungsmittel, Stützmittel, Verbrauchsstoffe, etc.) in das Ausbruchmaterial mit ein. Kein Verfahren belässt das Ausbruchmaterial im geogenen Ausgangszustand. Für die Wahl eines Vortriebverfahrens ist die Sicherheit und Stabilität, während dem Tunnelvortrieb, der ausschlaggebende Faktor, welche Vortriebsart zum Einsatz kommt. Bei vielen Tunnelprojekten ist die Auswahlmöglichkeit zwischen den Vortriebsverfahren durch die Gegebenheiten und Randbedingungen (Geologie, Wasserdruck, Bebauung, etc.) eingeschränkt. Der Faktor der Wiederverwertung des Ausbruchmaterials und die Auswirkung der Vortriebsverfahren darauf, spielt nur eine untergeordnete Rolle, obwohl die Wichtigkeit der Wiederverwertung immer mehr an Gewicht gewinnt. Die Sicherheit und die Stabilität des Tunnelvortriebes, sowie die wirtschaftlichen Aspekte werden immer an erster Stelle stehen. Wenn aber zwei Verfahren gleichwertig aus den Entscheidungsprozessen hervorgehen, spielen die Auswirkungen auf das Ausbruchmaterial eine entscheidende Rolle. Ob Ausbruchmaterial zur Wiederverwertung verwendet werden kann, hängt zu großen Teilen von der geogenen Zusammensetzung ab. Anthropogene Veränderungen durch Altlasten von Fabriken, Tankstellen, etc. haben ebenfalls Einfluss darauf, ob das Ausbruchmaterial einen Wiederverwendungszweck findet. Wenn diese Faktoren, die nicht beeinflussbar sind, eine Verwertung des Bodens zulassen, sind die Materialien, die für den Vortrieb eingebracht werden, das letzte Glied, das die Wiederverwertung verhindern kann. In diesen Fällen ist besonders auf die Materialien, die eingebracht werden, zu achten.

Folgende Verwertungsmöglichkeiten von Tunnelausbruch sind üblich:

- Schüttmaterial/Verfüllungsmaterial
- Dammmaterial
- Betonzuschlagstoff.

Als Ersatz der Primärstoffe in der Industrie dient der Tunnelausbruch nur selten.

Durch die hohen Anforderungen bei den Eigenschaften (Frostbeständigkeit, Korngrößenverteilung, etc.) des Ausbruchmaterials für die unterschiedlichen Verwendungszwecke (siehe oben) werden die Verwertungsmöglichkeiten eingeschränkt. Das Risiko, dass die Qualitätskriterien nicht über die ganze Tunnellänge eingehalten werden können, verursacht, dass sich viele Auftraggeber für eine generelle Deponierung des gesamten Tunnelausbruchmaterials entscheiden.

Ein wichtiger Punkt für eine mögliche Wiederverwertung ist die Planbarkeit. Das vorzeitige Wissen über die Menge, die chemische Zusammensetzung, die zeitliche Verfügbarkeit bezüglich des Ausbruchmaterials ist essentiell für die Planung der Wiederverwertung. Ein Problem sind die wechselnden Konzentrationen von verschiedenen Materialien. Um Sicherheit im Tunnelvortrieb zu gewährleisten, kann die Zusammensetzung der verschiedenen Stützmittel geändert werden und sich dadurch auch die Zusammensetzung des Ausbruchmaterials ändern. Eine gute Abstimmung zwischen dem Nutzer des Ausbruches und der Baufirma ist deshalb notwendig. Mithilfe einer On-line-Analyseanlage kann dieses Problem verringert werden.

8.2. Offene Bauweise

Die offene Bauweise verursacht keine relevanten Verunreinigungen des Ausbruchmaterials. Auch die Korngrößenverteilung und die Kornform bleiben, wenn Baggeraushub möglich ist, gleich. Bei Sonder-Bauverfahren der Verbauung (Düsenstrahlverfahren, Bohrpfahlwände, Schlitzwände und Dichtsohlen) können Verunreinigungen in begrenzten Teilbereichen erfolgen (siehe Kapitle 4.5). Die Verwertung des Ausbruches ist, wenn die geogenen Bedingungen zulässig sind, möglich.

8.3. Konventionelles Vortriebsverfahren

Bei der geschlossenen Bauweise wird beim konventionellen Vortriebsverfahren eine große Anzahl an verschiedenen Stoffen in den Tunnel eingebracht. Das Lösungsverfahren, das beim konventionellen Vortrieb oft Anwendung findet, ist die Sprengung.

Durch das Einbringen von Sprengstoff ist ein Anstieg der Nitrat-, Nitrit- und Ammonium-Werte im Eluat des Tunnelausbruches zu erwarten. Besonders die Nitrit- und Ammonium-Werte werden laut Literatur oft überschritten. Die vorgeschriebenen Grenzwerte sind nur durch die sorgfältige Wahl eines Emulsionssprengstoffes einhaltbar. Bei den einzelnen Emulsionssprengstoffen (auch von derselben Erzeugerfirma) besteht eine große Schwankungsbreite der Schadstoffkonzentrationen. Um die Schadstoffkonzentrationen, die durch Sprengung entstehen, besser voraussagen zu können, besteht noch Forschungsbedarf (siehe Kapitel 8.7).

Einfluss auf die Schadstoffkonzentrationen haben auch die Sauberkeit und die Genauigkeit bei der Durchführung der Ladung des Sprengstoffes (keine Versager). Durch die chemischen Prozesse mit nicht umgesetztem Sprengstoff ist die Einhaltung der Grenzwerte für Ammonium in Gefahr. Die nahezu hundertprozentige Umsetzung der Sprengstoffe ist wichtig. Der Sprengstoff darf keinem Wasser lange ausgesetzt sein, sonst führt das zu erhöhten Schadstoffwerten bei der Umsetzung. Durch äußerst sorgfältigen Umgang mit dem Sprengstoff, sowie die Reduzierung des Sprengmittelverbrauches (kg/m^3) auf ein Minimum sind die geforderten Grenzwerte einhaltbar.

Ein weiterer Punkt, der für die Verwertung zu beachten ist, ist die Korngröße des Ausbruchmaterials. Eine Sprengung zerkleinert das Ausbruchmaterial erheblich. Die Korngrößenverteilung nach einer Sprengung, als auch die Gesteinsform des Ausbruchmaterials sind für alle baulichen Verwendungszwecke (Beton, Ringspalt, etc.) gut geeignet.

Der Baggervortrieb bringt für den Lösungsprozess keine zusätzlichen Materialien in das Ausbruchmaterial mit ein. Die eingebrachten Sicherungsmittel, Stützmittel und Verbrauchsstoffe (fossile Brennstoffe) verhalten sich gleich wie beim Sprengvortrieb und sind bei der Verwertungsplanung zu berücksichtigen.

Die Stickoxide, die von den Verbrennungsmotoren der Baumaschinen stammen, tragen ebenfalls zur Erhöhung der Nitrat-, Nitrit- und Ammonium-Werte bei. Die Menge der Stickoxide, die von den Baumaschinen produziert wird, kann rechnerisch genau ermittelt werden. Welcher Prozentanteil jedoch in das Ausbruchmaterial übergeht und welcher durch die Bewitterung ausgeblasen wird, ist in der Literatur noch nicht behandelt worden. Eine Erhöhung der Nitrat-, Nitrit- und Ammoniak-Werte, die für eine Überschreitung der Grenzwerte notwendig ist, ist unrealistisch. Dies ist durch Feldversuche (beschrieben in Kapitel 4.8) noch zu überprüfen.

Die Reste von Spritzbeton im Ausbruch führen zu einer Erhöhung des pH-Wertes und der Leitfähigkeit des Ausbruches. Gegengesteuert wird durch eine sorgfältige Trennung von Spritzbeton und Ausbruchmaterial. Eine weitere Reduzierung der Auswirkungen wird durch die Zugabe von Füllerstoffen (Mikrosilika/Hüttensande) erreicht. Alkalifreie Beschleuniger sind zu verwenden. Der Grenzwert des pH-Wertes für die Bodenaushubdeponie kann auf 12 angehoben werden, wenn die anderen Grenzwerte laut DVO für die Klasse der Bodenaushubdeponie eingehalten werden. Bei Einhaltung aller erwähnten Maßnahmen werden die Grenzwerte für den pH-Wert und die Leitfähigkeit in der Regel eingehalten. Wenn die 5 Volumenprozent-Grenze laut der DVO und die 10 Volumenprozent-Grenze laut des BAWP an Spritzbeton nicht überschritten werden, drohen keine rechtlichen Einschränkungen in Bezug auf die Verwertung oder Deponierung. Bei sortenreiner Trennung ist eine Wiederverwertung des Spritzbetons als Spritzbeton- oder als Betonzuschlag möglich. Bei Austritt von Kohlenwasserstoffen (Treibstoffen, Hydrauliköl, etc.) ist dieser kontaminierte Bereich vom Ausbruchmaterial zu trennen. Das kontaminierte Material wird keiner Verwertung zugeführt. Abhängig von der Konzentration der Kohlenwasserstoffe wird das Ausbruchmaterial in der zugehörigen Deponieklasse entsorgt.

8.4. Injektionen

Die Injektionen, die im Tunnelbau zum Einsatz kommen, sind bezüglich der Verwertungsmöglichkeit schwer zu beurteilen, weil unterschiedlichste Injektionsmaterialien und Verfahren zum Einsatz kommen können. Die Konzentration von Injektionsmaterialien im Ausbruchmaterial ist relativ gering, weil meist rund um den Ausbruchsquerschnitt injiziert wird und nicht im Ausbruchsquerschnitt selbst.

Bei der Zementinjektion ist eine Nutzung des Ausbruchmaterials laut BAWP bis zu 10 Volumenprozent an Injektionsmaterial erlaubt. Sind die ursprünglichen Eigenschaften zulässig, ist die Verwertung des Ausbruches als HG- oder HU-Gesteinskörnung möglich. Wenn der Injektionsmaterialgehalt unter 5 Volumenprozent liegt, kann das Ausbruchmaterial auf der Bodenaushubdeponie entsorgt werden, ansonsten muss das Ausbruchmaterial in die Inertabfalldeponie, oder in eine Deponie für nicht gefährliche Abfälle entsorgt werden.

Beim Einsatz von HDI-Injektionen (Düsenstrahlverfahren) ist die Bewertung als Betonabbruch wichtig. Dadurch ist der ausgebrochene Injektionskörper als Zuschlagstoff oder als Verfüllungsmaterial einsetzbar.

Kunststoffinjektionen kommen nur in Sonderfällen zum Einsatz. Die Verwertung des Gemisches (Ausbruchmaterial und Kunststoffinjektion) als Zuschlagstoff oder Verfüllungsmaterial ist nicht möglich. Die Trennung von Gestein und Kunststoffinjektion ist wirtschaftlich nicht sinnvoll. Bleibt der Anteil unter 1 Volumenprozent ist die Deponierung als Bodenaushubmaterial, wenn die anderen Grenzwerte laut DVO eingehalten werden, zulässig. Ab 1 Volumenprozent organischer bodenfremder Bestandteile müssen ALSAG-Gebühren bei der Deponierung bezahlt werden.

8.5. Maschinelles Vortriebsverfahren

Die Hartgesteinsmaschine führt zu keiner schädigenden Verunreinigung des Ausbruchmaterials. Der Abrieb der Disken ist die einzige Verunreinigungsquelle. Die Korngrößenverteilung und Form des Ausbruches ist durch den maschinellen Löseprozess für die bautechnische Verwertung nicht ideal. Durch geeignete Aufbereitung (Siebung, Zerkleinerung) wird ein Großteil wiederverwertbar. Das Ausbruchmaterial kann als HG- und HU-Gesteinskörnung verwendet werden. Der Nutzung des Ausbruches für industrielle Zwecke steht durch dieses Vortriebsverfahren nichts im Weg. Bei der Deponierung führt der Vortrieb mit einer Hartgesteinsmaschine zu keiner Verschlechterung der Deponierungsklasse.

Die TBM-S hat dieselben Auswirkungen, wie die Hartgesteinsmaschine auf das Ausbruchmaterial. Das Ringspaltmaterial führt zu keiner zusätzlichen Verunreinigung, weil das Ringspaltmaterial durch die Bürsten der TBM-S nicht in die Abbaukammer eindringt. Der Wiederverwertung vom Ausbruchmaterial steht durch das Vortriebsverfahren nichts im Weg. Bei der Deponierung führt das Vortriebsverfahren mittels TBM-S zu keiner Verschlechterung der Deponierungsklasse.

Die Doppelschildmaschine verhält sich wie die TBM-S.

Die Schildmaschinen lassen sich in Slurry- und EPB-Maschinen aufteilen. Bei der Slurry-Maschine ist eine Bentonit-Suspension im Einsatz, die sich mit dem Ausbruchmaterial komplett vermischt. Die Trennung erfolgt in der Separationsanlage aufgrund der Korngröße. Um Aussagen über die Verwertungsmöglichkeiten oder die Deponierung treffen zu können, müssen die Konzentrationen in den verschiedenen Kornfraktionen zuerst eruiert werden. Beim Grobmaterial (> 4 mm) wird laut Vogt, durch die Separationsanlage, der Grenzwert von 5 Volumenprozent für mineralische bodenfremde Bestandteile im Ausbruchmaterial eingehalten. Deshalb sind keine rechtlichen Einschränkungen für die Verwertung und Deponierung zu erwarten. Durch eine sorgfältige Trennung sollte die Nutzung als HG- und

HU-Gesteinskörnung möglich sein. Bei der Sandfraktion, sowie der Feinfraktion besteht die Gefahr der Überschreitung der Grenzwerte. Auch die Eigenschaften des Ausbruchmaterials ändern sich durch die höhere Bentonit-Konzentration und der Ausbruch ist deshalb für einige Verwertungszwecke (z.B. Beton) nicht verwendbar. Diese beiden Fraktionen werden im Moment, abhängig von der Bentonit-Konzentration, in die Bodenaushubdeponie, in die Inertabfalldeponie, oder in die Deponien für nicht gefährliche Abfälle entsorgt.

Bei den EPB-Maschinen werden für die Bodenconditionierung Wasser, Tenside und Polymere zugegeben. Die Wahl der Conditionierungsmittel (Tenside, Polymere, etc.) muss so erfolgen, dass vor dem Einsatz eine biologische Abbaubarkeit sichergestellt ist. Im BAWP und in der Deponieverordnung sind Grenzwerte für anionenaktive Tenside vorgeschrieben. Wird der Grenzwert für die Baurestmassendeponie (5 mg/kg TM) überschritten sind ALSAG-Gebühren fällig. Die in der Praxis festgestellten Anfangskonzentrationen übersteigen diese Grenzwerte.

Die Bodenconditionierungsmittel, die biologisch abbaubar sind, können die Grenzwerte, sowohl für die Wiederverwertung, als auch für die Deponierung nach gewissen Zeiten wieder einhalten. Das Problem, das sich stellt, ist die Dauer dieses Abbauprozesses und der Zeitpunkt der Probenahme für die Charakterisierung des Ausbruches. Bei Versuchen wurde eine Dauer von 7-28 Tagen bis zum vollständigen Abbau festgestellt. Zukünftig könnte die Zugabe von Bakterien den Abbau beschleunigen und die notwendige Lagerungszeit verringern. Wenn die Conditionierungsprodukte sorgfältig ausgewählt werden, steht der späteren Wiederverwertung des Ausbruches nach dem Einsatz einer EPB-Maschine nichts im Weg.

Die Variable-Density-Schild-Maschine (VDS) kombiniert die SLS- und EPB-Maschine. Je nach Betriebsmodus gelten die Punkte der SLS- oder der EPB-Maschine.

Bei der Hybridschildmaschine (HYS) gilt dasselbe wie für die VDS-Maschine.

8.6. Projekte

8.6.1. NBS Schaftenau Knoten Radfeld

Bei der NBS Schaftenau Knoten Radfeld wird ein Großteil der Tunnelstrecke in der offenen Bauweise erstellt. Durch das Vortriebsverfahren der offenen Bauweise werden keine bedeutenden Stoffe in das Ausbruchmaterial eingebracht. Aufgrund der geologischen Parameter scheint die Nutzung des Ausbruches als HG- oder HU-Gesteinskörnung geeignet. Der Streckenabschnitt, der in geschlossener Tunnelbauweise (voraussichtlich mit Sprengvortrieb) erstellt wird, stellt durch das Vortriebsverfahren ebenfalls keine relevante Änderung der Wiederverwertungsmöglichkeiten des Ausbruches dar. Ein Wiederverwertungszweck für das Ton-, Schluff- und Sandsteingemisch außer als Verfüllungsmaterial ist nicht bekannt.

Der letzte Abschnitt wird mithilfe einer Tunnelbohrmaschine erstellt. Der genaue Typ der Maschine ist noch nicht geklärt. Der Einsatz des Ausbruches als Dammschüttmaterial oder als Ersatz eines Primärstoffes in der Industrie wird als Verwertungsmöglichkeit für das Aushubmaterial in Betracht gezogen. Bei der Verwendung einer EPB-Maschine sind wie bereits erwähnt, die Wahl der Conditionierungsmittel und der Testzeitpunkt des Ausbruchmaterials ausschlaggebend. Dem Einsatz als Dammschüttmaterial sollte durch die Bodenconditionierungsmittel nichts im Wege stehen.

Beim Einsatz einer Slurry-Maschine ist das in diesem Bereich sehr feinkörnige Material durch die Vermischung nur schwer vom Bentonit trennbar. Eine Slurry-Maschine erschwert die Verwertung des Ausbruchmaterials.

Beim Einsatz einer VDS-Maschine sind abhängig vom Betriebsmodus die Punkte der EPB-Maschine oder der Slurry-Maschine zu beachten.

8.6.2. Future Circular Collider (FCC)

Beim Projekt des FCC spielen die Auswirkungen der Vortriebsmethoden auf die Wiederverwertung des Ausbruches keine wirkliche Rolle. Weder die vorgesehenen Bagger- und Sprengvortriebe, noch der EPB-Vortrieb ohne Ortsbruststützung verunreinigen das Ausbruchmaterial in einer Menge, die für die Verwertung oder Deponierung des Ausbruchmaterials eine große Rolle spielen. Die vorhandene Geologie ist der größte Faktor, der einer Verwertung im Weg stehen kann.

8.7. Ausblick

Um ein noch besseres Verständnis für das Thema "Verwertung von Tunnelausbruch" zu bekommen, sind folgende Fragestellungen bzw. Aufgabenstellungen aus dieser Arbeit hervorgegangen:

- Feststellen des Bentonit-Gehaltes der einzelnen Korngrößenbereiche nach der Trennung durch eine Separationsanlage.
- Die Wirkung von Bentonit auf die Betoneigenschaften bei verschiedenen Konzentrationen.
- Versuche zur besseren Bestimmung von Nitrat-, Nitrit-, und Ammoniumwerten im Ausbruchmaterial durch die Umsetzung von Sprengstoff. Berücksichtigung der realen Gegebenheiten (Einschlussbedingungen, Wasser, verschiedene Gesteine, etc.) und direkte Bestimmung der Nitrat-, Nitrit-, und Ammoniumgehalte.
- Auflistung der Schadstoffkonzentrationen von verschiedenen Emulsions-sprengstoffprodukten für eine bessere Anpassungsmöglichkeit an die gegebenen Grenzwerte und Geologie.
- Bestimmung der Erhöhung der Nitrat-, Nitrit- und Ammoniumwerte durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen.
- Genauere Bestimmung der Zeitspanne für die biologische Abbaubarkeit von Bodenconditionierungsmittel im Ausbruchmaterial.
- Wirkungsweise und zeitliche Auswirkungen auf den Abbauprozess durch Bioaugmentation im realen Einsatz.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zyklischer Ablauf beim Sprengvortrieb.....	3
Abbildung 2: Teilflächenausbruch	4
Abbildung 3: Ablauf zyklischer Baggervortrieb	4
Abbildung 4: Unterteilung von Tunnelvortriebsmaschinen.....	6
Abbildung 5: Systemskizze Gripper-TBM.....	6
Abbildung 6: Systemskizze Einfachschild.....	7
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Ringspaltverpressung durch Lisenen.....	7
Abbildung 8: Systemskizze Doppelschildmaschine	8
Abbildung 9: Systemskizze Flüssigkeitsschild	8
Abbildung 10: Systemskizze Erddruckschild	9
Abbildung 11: Einsatzbereich von EPB- und Slurry-(Hydro) Maschinen	10
Abbildung 12: Systemskizze VDS	10
Abbildung 13: Systemskizze HYS	11
Abbildung 14: Korngrößenverteilung der verschiedenen Vortriebsverfahren	12
Abbildung 15: Löseprinzip einer Diske	12
Abbildung 16: Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens 2015	15
Abbildung 17: Behandlung von Aushubmaterial 2015.....	15
Abbildung 18: Längsschnitt mit Verwendungsklassen	22
Abbildung 19: Ablauf Ringspaltverfüllung mit Zwei-Komponenten-Mörtel.....	31
Abbildung 20: Injektionsverfahren nach ÖNORM EN 12715.....	35
Abbildung 21: Anwendungsbereiche von Injektionsmitteln.....	36
Abbildung 22: Injektionsschirm für Abdichtung.....	37
Abbildung 23: Schaumbildung.....	42
Abbildung 24: Wahl des F.E.R.	43
Abbildung 25: Schaum	45
Abbildung 26: Einsatzbereich der Konditionierungsmittel.....	46
Abbildung 27: Daphnia magna	48
Abbildung 28: Stadien der Zebrafiscentwicklung.....	48
Abbildung 29: Lumineszenz.....	49
Abbildung 30: Alga growth inhibition test	49
Abbildung 31: Beispiel Verlauf von biologischer Abbaubarkeit	50
Abbildung 32: CO ₂ -Entwicklungstest - Modifizierter Sturm Test	51
Abbildung 33: Manometrischer Respirationstest.....	52
Abbildung 34: Biologische Abbaubarkeit Feldversuch.....	53
Abbildung 35: Biologische Abbaubarkeit mit Bakterienzugabe	53
Abbildung 36: Wasserdurchlässigkeit nach Schaumkonditionierung.....	55
Abbildung 37: Abgaszusammensetzung	56
Abbildung 38: Grenzwerte NO _x Ausstoß	57
Abbildung 39: Bohrschema für Sprengvortrieb.....	59
Abbildung 40: gelatinöser Sprengstoff	61
Abbildung 41: ANFO-Sprengstoff	61
Abbildung 42: Heavy ANFO Sprengstoff	62
Abbildung 43: Gemessene Ammoniakkonzentration nach der Sprengung.....	64
Abbildung 44: Stickstoffkonzentration Emulsionssprengstoffe.....	65
Abbildung 45: TEN-T Schienennetz	66
Abbildung 46: Trassenführung Umweltverträglichkeitsprüfung 2019	66
Abbildung 47: Abschnittseinteilung der NBS Schaftenau - Radfeld	67
Abbildung 48: Lage des geplanten FCC	73
Abbildung 49: Längsschnitt FCC	74
Abbildung 50: Dreiecksdiagramm: Karbonate, Tonminerale und Quarz	74
Abbildung 51: Mineralogische Zusammensetzung	77
Abbildung 52: Eingabefeld Vortriebsmethode	81
Abbildung 53: Eingabefelder (gelb) und Button "Zur Auswertung-hier klicken"	81

Abbildung 54: Button "Daten löschen" 81

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vortriebsverfahren und im Ausbruch verbleibende Materialien	11
Tabelle 2: Anwendungsbereiche der verschiedenen Qualitätsklassen in der Verfüllung.....	16
Tabelle 3: Anwendungsbereich der Qualitätsklassen als Baustoff	16
Tabelle 4: Grenzwerte Feststoffe.....	17
Tabelle 5: Grenzwerte Eluate	18
Tabelle 6: Grenzwerte der Deponieklassen.....	20
Tabelle 7: ALSAG-Gebühren der Deponieklassen	23
Tabelle 8: Veränderung der Eigenschaften durch Zusatzstoffe.....	25
Tabelle 9: Abbindebeschleuniger und ihre Eigenschaften	26
Tabelle 10: Tensid-Konzentration im Ausbruchmaterial min. Ansatz	44
Tabelle 11: Tensid-Konzentration im Ausbruchmaterial max. Ansatz	44
Tabelle 12: Verschiedene Hersteller und ihre Angaben zur Toxizität und der biologischen Abbaubarkeit aus SDS und TDS	54
Tabelle 13: Annahmen für Stickstoffausstoß	57
Tabelle 14: Zwischenangriff Göstritz Berechnung Stickstoffkonzentration im Ausbruch.....	57
Tabelle 15: Elemente und Reaktionsprodukte	60
Tabelle 16: Schadstoff-Konzentration nach der Umsetzung von 1 kg Sprengstoff in der Schwadenkammer	62
Tabelle 17: Umrechnung in die Einheit g/kg	62
Tabelle 18: Annahmen für die Berechnung (eigene Berechnung)	63
Tabelle 19: Berechnete Stickstoffkonzentrationen	63
Tabelle 20: Mess-Ergebnisse von Nitrat-, Nitrit- und Ammonium-Konzentrationen	63
Tabelle 21: Zusammenfassung der Geologie und der Ausbruch-Verwertungsmöglichkeit der NBS Schäftenau – Knoten Radfeld	69
Tabelle 22: Wichte, Durchlässigkeits-, Verformungs- und Festigkeitsparameter der vorhandenen Gesteinsformationen.....	70
Tabelle 23: Überprüfung der Grenzwerte für Feststoffe.....	75
Tabelle 24: Überprüfung der Grenzwerte für Eluate	76

11. Literaturverzeichnis

- Verordnung (EG) Nr. 907/2006 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 648/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates über Detergenzien zwecks Anpassung der Anhänge III und VII Nr. 907/2006).
- Babendererde, T. (2017). *Einsatz von Bentonit im Tunnelbau bei der Elbquerung im Zuge der A20*. Bad Schwartau. Ingenieurgesellschaft elbe-link.
- Bacher, W. (16. Juli 2021). Interview durch C. Kirchttag [online]. 3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH.
- Barra Caracciolo, A [A.], Ademollo, N., Cardoni, M., Di Giulio, A., Grenni, P [P.], Pescatore, T [T.], Rauseo, J [J.] & Patrolecco, L [L.] (2019). Assessment of biodegradation of the anionic surfactant sodium lauryl ether sulphate used in two foaming agents for mechanized tunnelling excavation. *Journal of hazardous materials*, 365, 538–545. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.002>
- Bauer, F. & Moser, P. Ammoniak in den Sprengschwaden: Entstehung und Strategien für die Vermeidung. *BHM*, 2011.
- Bauer Maschinen GmbH. (2021). *HDI: Bauer Hochdruckinjektionen Bauer Jet Grouting*. baustoffwissen. (2016). *Sandstein als Baustoff: Eigenschaften, Vor- und Nachteile*. https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/fassade_und_massivbau/sandstein-baustoff-einsatzbereiche-naturstein-eigenschaften-sedimentgestein/
- Bhairi, S. M. & Mohan, C. (2001). *Detergents: A guide to the properties and uses of detergents in biological systems*.
- Budach, C [Christoph]. (2011). *Untersuchungen zum erweiterten Einsatz von Erddruckschilden in grobkörnigem Lockergestein* [Dissertation]. Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017, Teil 1, 2017 (2017).
- Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (2008 & i.d.F.v. 02.06.2021).
- CERN. (2021a, 21. März). *The Future Circular Collider*. <https://home.cern/science/accelerators/future-circular-collider>
- CERN. (2021b, 2. Juni). *Who we are*. <https://home.cern/about/who-we-are>
- Condat. *Foam selection & set-up*.
- Condat S. A. (2011). „Biochemical degradation-kinetics“ für das Produkt CLB F4. unveröffentlicht.
- Donel, M. (1995). *Bodeninjektionstechnik* (3. Aufl.). *Studienunterlagen für das Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik*. Glückauf.
- Ebert, D. (2011). *Daphnia magna sexual*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Daphnia_magna_sexual.jpg
- Egli, H. & Langmaack, L [Lars]. (2008). *Erddruckgestützter Schildvortrieb – Chancen & Risiken* [Kolloquien]. ETH Zürich, Zürich.
- Ehrensberger, C. (19. Juli 2021). Interview durch C. Kirchttag [BeMo Tunneling GmbH ; Bauleitung]. online.
- Englmayer, Schmidt, Knauss & Kubiak. (2019, 13. August). *Einsatz moderner Emulsionssprengstoffe der Austin Powder GmbH*. Austin Powder GmbH.
- Environmental Bio-Detection Products Inc. (2021, 19. Mai). *Aliivibrio fischeri Toxicity Tests (formerly Vibrio Fischeri)*. <https://www.biotoxicity.com/index.php/ebpi-toxicity-tests/aliivibrio-fischeri-toxicity-tests>
- Erben, H., Galler, R. & Grechenig, T. (2015). MineralBay - the portal for raw materials and projects from subsurface construction / MineralBay - das Portal für mineralische

- Rohstoffe und Projekte aus dem Untertagebau. *Geomechanics and Tunneling*, 8(4), 321–332. <https://doi.org/10.1002/geot.201500009>
- Europäisches Normungsinstitut (2001). *EN 12716: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Düsenstrahlverfahren (Hochdruckinjektion)* (EN-Norm 12716).
- Europäisches Normungsinstitut (15. April 2021). *EN 12715: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau –Injektionen* (EN 12715).
- VERORDNUNG (EU) 2016/1628 (2016).
- Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien.
- Fink, A. & Gruber, T. (2019). *Brenner-Nordzulauf: Projektvorstellung und aktueller Stand*. Kufstein.
- Firouzei, Y., Grenni, P [Paola], Caracciolo, A. B., Patrolecco, L [Luisa], Todaro, C., Martinelli, D., Carigi, A., Hajipour, G., Hassanpour, J. & Peila, D. The Most Common Laborator Procedures for the Evaluation of EPB TBMs Excavated Material Ecotoxicity in Italy: A Review. *Geingegneria Ambientale e Mineraria*, 2020.
- Freimann, S., Schröer, M. & Thewes, M [Markus]. (2017). *EPB-Labor*. Ruhr-Universität Bochum. <http://www.tlb.ruhr-uni-bochum.de/EPB-Labor.html>
- Galler, R. (2014). *Zyklischer Vortrieb NATM (Skriptum)*. Montan Univeristät Leoben.
- Galler, R. & Pauser, M. (2012). *Recycling von Tunnelausbruch*. http://bautechnik.pro/download/FFG/FFG_Tunnel_Endbericht_20121231.pdf
- Girmscheid, G. (2001). *Sicherungsmassnahmen mit Spritzbeton*. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004260068>
- Girmscheid, G. (2008). *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau* (2. Aufl.). Ernst & Sohn.
- GOBIO GmbH (Hrsg.). (2021, 19. Mai). *Algae Growth Inhibition Test – GOBIO GmbH*. <https://www.gobio-gmbh.de/en/leistungen/biologische-testverfahren/algentest/>
- Gutberlet, F.
- Haas, M [M] (2020a, 14. Juni). *A mineralogical re use classificati on model of molasse rock mass in the Geneva Basin*. ISRM International Symposium Eurock 2020 – Hard Rock Engineering, Trondheim, Norway.
- Haas, M [M.] (2020b). Wiederverwertung ausgehobener Molasse basierend auf geologischer Untergrundmodellierung für den geplanten 100km Teilchenbeschleuniger-Tunnel am CERN nahe Genf, Schweiz. *Berg und Hüttenmännische Monatshefte*.
- Hehenberger, S. (2015). *Vortriebsverfahren-Erddruckschild* [Master Thesis]. TU Wien, Wien. Fakultät für Bauingenieurwesen
- Heinz, A. (2006). *Modifizierte Bentonitsuspensionen für geotechnische Bauverfahren in Böden hoher Durchlässigkeit* [Dissertation, ETH Zurich]. DataCite.
- Heinz-Herbert Cohrs. (2017). *Diesel und Elektromotor in guter Symbiose - Seite 2 von 6 - bd baumaschinendienst*. <https://www.baumaschinendienst.de/artikel/diesel-und-elektromotor-in-guter-symbiose-3167/2/>
- Herrenknecht AG. *Herrenknecht Seperation Plants*. <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/separationstechnologie/>
- Höfler, J., Schlumpf, J. & Markus Jahn, M. (2012). *Sika Spritzbeton Handbuch*.
- Hydrotox - Labor für Ökotoxikologie und Gewässerschutz GmbH. (2021a, 22. Mai). *CO2-Entwicklungstest - Hydrotox - Labor für Ökotoxikologie und Gewässerschutz GmbH - Freiburg*. <https://www.hydrotox.de/leistungen/laborleistungen/biologische-abbaubarkeit/leichte-biologische-abbaubarkeit/co2-entwicklungstest.html>
- Hydrotox - Labor für Ökotoxikologie und Gewässerschutz GmbH. (2021b, 22. Mai). *Manometrischer Respirationstest - Hydrotox - Labor für Ökotoxikologie und*

- Gewässerschutz GmbH - Freiburg.
<https://www.hydrotox.de/leistungen/laborleistungen/biologische-abbaubarkeit/leichte-biologische-abbaubarkeit/manometrischer-respirationstest.html>
- Janning, W. & Knust, E. (2008). *Genetik: Allgemeine Genetik, molekulare Genetik, Entwicklungs-genetik* (2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). George Thieme Verlag.
- Kainrath-Reumayer, S. & Dolsak, W. Gebirgsanker im Berg- und Tunnelbau. *BHM*, 2008(Heft 10).
- Kampen, R. & Richter, R. (2014). *Zement-Merkblatt Betontechnik B 3: Betonzusätze Zusatzmittel und Zusatzstoffe*.
- Kappl, A. (2016, 5. Februar). *Sachverhaltsdarstellung aus chemischer Sicht zum erhöhten Nitrit- und Kohlenstoffgehalt im Haufwerk der Fahrsohle des Gleinalmtunnels - 2. Röhre*. Gutachten.
- Kappl, A. (2019). *Sachverhaltsdarstellung aus chemischer Sicht zum erhöhten Nitrit*.
- Keil, T. (2015). *Untersuchung der heterogenen Reaktionen von SO₂ und NO₂ mit mineralischen Oberflächen* [Dissertation]. Universität Duisburg-Essen, Essen.
- Knauss, R. (2020). *Sprengstoffchemie*. Sprengkurs 2020 (Skriptum).
- Kolymbas, D. (2011). *Geotechnik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20482-1>
- Krebs, H. & Schwarz, S. (2017, 22. Juli). *Arbeitsplatzgrenzwerte in Zusammenhang mit Sprengarbeiten – Messung und Bewertung*. Sicherheitstagung Rust,
- Kustermann, A. *Betonzusatzstoffe Betonzusatzmittel*. Universität der Bundeswehr München, München.
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (2004). *Bestimmung des Gehaltes an Kohlenwasserstoffen in Abfällen: Untersuchungs- und Analysenstrategie*.
- Langmaack, L [L.]. (2001). *Europe & Asia: Application of new TBM Conditioning Additives*. Zürich, Schweiz.
- Langmaack, L [L.]. (2017). *How to protect our Nature - Chemistry in TBM tunnelling. From the laboratory to on-site use and muck disposal*. Hünenberg, Switzerland. NORMET International.
- Lazarova, E. *Injektionen im Tunnelbau* [Masterarbeit]. TU Wien, Wien.
- Lulei, M. Wassergefährdungsklassen. *chemie report*, 2017. <https://www.vci.de/technische-regelwerke/downloads-treg/5-produktsicherheit/5-3-wassergefaehrdungsklassen/chemie-report-6-2017-wgk-einstufung.pdf>
- Maidl, U. (1995). *Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenconditionierung mit Schaum* [Dissertation]. Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- Maidl, U., Budach, C [Christoph], Stascheit, J. & Wehrmeyer, G [Gerhard]. (2020). DAUB-Empfehlung zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen – Vorgehensweise und Beispiele. In K. Laackmann, H. Balthaus, M. Breidenstein, C. Camós-Andreu, S. Franz, W.-D. Friebel, A. Hettler, B. Maidl, M. Meissner, E. Scherer, S. Schwaiger, M. Thewes, G. Wehrmeyer & B. Wittke-Schmitt (Hrsg.), *Taschenbuch für den Tunnelbau 2021* (S. 169–202). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783433610411.ch5>
- Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. (2019). *Nitrit*. https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/grundwasserbeschaffenheit/guteparameter/grundprogramm_des_nlwkn/nitrit/Nitrit-137606.html/grundprogramm_des_nlwkn/nitrit/Nitrit-137606.html
- National Environmental Methods Index. *Standard Methods: 5540 C: Anionic Surfactants as MBAS*. https://www.nemi.gov/methods/method_summary/7612/

- Bundesgesetz vom 7. Juni 1989 zur Finanzierung und Durchführung der Altlastensanierung (Altlastensanierungsgesetz) (1989 & i.d.F.v. 15.06.2021).
- Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (2002 & i.d.F.v. 16.06.2021).
- ÖBV-Richtlinie (Oktober 2015). *Verwendung von Tunnelausbruch*.
- OECD Test No. 201. *OECD GUIDELINES FOR THE TESTING OF CHEMICALS: Alga, Growth Inhibition Test* (Test No. 201). OECD Publishing.
- OECD Test No. 202. *OECD GUIDELINE FOR TESTING OF CHEMICALS: Daphnia sp. Acute Immobilisation Test* (Test No. 202). OECD.
- OECD Test No. 236. *OECD GUIDELINES FOR THE TESTING OF CHEMICALS: Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test* (Test No. 236). OECD.
- OECD Test No. 301. *OECD GUIDELINE FOR TESTING OF CHEMICALS: Ready Biodegradability* (Test No. 301). OECD.
- OECD Test No. 310. *OECD GUIDELINES FOR THE TESTING OF CHEMICALS: Ready Biodegradability - CO₂ in sealed vessels (Headspace Test)* (Test No. 310). OECD Publishing.
- Olkowska, E., Ruman, M., Kowalska, A. & Polkowska, Ż. (2013). Determination of Surfactants in Environmental Samples. Part II. Anionic Compounds. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 20(2), 331–342. <https://doi.org/10.2478/eces-2013-0024>
- Osborne, J. A., Stanyard, J. L., Ariza, L. & Dallapiazza, W. *Tunnelling Studies for CERN's Future Circular Collider*.
file:///C:/Users/user/Downloads/107_Tunnelling_Studies_Cern.pdf
- Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB) (2011). *Concrete Segmental Lining Systems*.
- Platinum Blasting. (2018, 23. November). *Heavy ANFO - Platinum Blasting*.
<http://www.platinumblasting.com/products/explosive-bulk-products/heavy-anfo/>
- Pratter, P. (2020). *Verwertungspotential von Tunnelausbruchmaterial* [Masterarbeit]. Montan Universität Leoben, Leoben.
- Purle, T. *Bentonit: Bentonit - Eigenschaften, Entstehung und Verwendung*.
<https://www.steine-und-minerale.de/atlas.php?f=3&l=B&name=Bentonit>
- RaumUmwelt Planungs-GmbH. (2010). *Semmering-Basistunnel Neu: UVE Klima und Energie Konzept*.
- Resch, D. (2012). *Verwendung von Tunnelausbruch - Entscheidungsgrundlagen*. Montan Universität Leoben, Leoben.
- Rohrbach, P. (2013). *Biologische Abbaubarkeit: Unterschiedliche Testmethoden von CEC und OECD im Vergleich*.
- Rolando, L., Grenni, P [Paola], Rauseo, J [Jasmin], Pescatore, T [Tanita], Patrolecco, L [Luisa], Garbini, G. L., Visca, A. & Barra Caracciolo, A [Anna] (2020). Isolation and Characterization in a Soil Conditioned With Foaming Agents of a Bacterial Consortium Able to Degrade Sodium Lauryl Ether Sulfate. *Frontiers in microbiology*, 11, 1542.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01542>
- Rowland III, J. H., Mainiero, R. & Hurd Jr., D. A. (2001). *Factors affecting fumes production of an emulsion and anfo/emulsion blends*.
<https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/fafpo.pdf>
- Schnitter, G. (1968). Injektionen. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.5169/seals-69982>
- Schulte-Schrepping, C. (2020). *Materialkonzepte zur Aktivierung von Ringspaltverfüllmaterialien im maschinellen Tunnelbau* [Dissertation]. Ruhr-Universität Bochum.
- Abfallverordnung 1. Januar 2021).
- Seidl, T. (2020a). *Grundlagen der Sprengung Untertage*. Sprengkurs 2020.

- Seidl, T. (2020b). *Theorie der Sprengtechnik*. Sprengkurs 2020.
- Seidler, I. M. (2018). *Reuse of tunnel excavation material – real-time measurements and decision-making on the construction site of Research@ZaB – Zentrum am Berg – an underground research facility in Eisenerz, Austria* [Master's Thesis]. Montan Univeristät Leoben, Leoben.
- Stark, J. & Wicht, B. (2013). *Dauerhaftigkeit von Beton* (2., aktualisierte und erw. Aufl.). Springer Vieweg.
- Stein, D. (1999). *Instandhaltung von Kanalisationen* (3. Aufl.). Ernst.
<https://www.unitracc.de/know-how/fachbuecher/instandhaltung-von-kanalisationen/sanierung/reparatur/injektionsverfahren/injektionsmittel/chemische-loesungen-und-kunstharze/loesungen-auf-der-basis-von-kunststoffen-bzw-kunstharzen/injektionsmittel-auf-der-basis-von-organomineralharzen-silikatharz>
- Stein, V. (2004). *Untersuchungen zur Optimierung und Bewertung des Auslaugverhaltens versinterungsrelevanter Stoffe aus Spritzbetonen als Beitrag zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit* [Dissertation]. Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- Sünner, I. & Wedemeier, J. Das transeuropäische Verkehrsnetz. *Hamburgisches Welt Wirtschafts Institut*. https://www.hwwi.org/fileadmin/hwwi/Publikationen/hwwi-insights/ausgabe_6/pdfs/Insights2014-Tent.pdf
- Thewes, M [M.], Budach, C [Ch.] & Galli, M. Laboruntersuchungen von verschiedenen konditionierten Lockergesteinsböden für Tunnelvortriebe mit Erddruckschildmaschinen. *tunnel*, 2010. https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel_2010-06_Laboruntersuchungen_von_verschiedenen_konditionierten_Lockergesteinsboeden_f_997322.html
- Thienel, K.-C. (2017). *Eisenhüttenschlacken und Hüttensand*. Universität der Bundeswehr München, München.
- Thumann, M. (2019). *Anpassung der Verarbeitungseigenschaften von Frischbetonmischungen für die Entwicklung von Spritzbetonen mit reduziertem Versinterungspotential* [Dissertation]. Ruhr-Universität Bochum.
- Tripwire Operations Group. (2020, 22. September). *ANFO - Tripwire Operations Group*. <https://tripwireops.org/anfo/>
- Tschöke, H., Graf, A., Stein, J., Krüger, M., Schaller, J., Breuer, N., Engeljehring, K. & Schindler, W. (2007). Abgasemission von Dieselmotoren. In *VDI-Buch. Handbuch Dieselmotoren* (S. 461–536). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72165-9_15
- Ulrich, S. (2018). Sedimente und Sedimentgesteine. In S. Ulrich (Hrsg.), *Gesteinskunde* (S. 25–39). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55323-7_4
- URETEK Injektionstechnik GmbH. *Umweltauswirkungen der URETEK-Method*. <https://www.uretek.at/injektionstechnik/kunstharz-umweltvertraeglichkeit/>
- US EPA (1996). *Ecological effects test guidelines: Seed germination/root elongation toxicity test* (OPPTS 850.4200). Washington, DC.
- VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik; Tagung Innovative Fahrzeugantriebe. (2004). *Innovative Fahrzeugantriebe: Tagung Dresden, 11. und 12. November 2004 = Innovative power train systems*. *VDI-Berichte: Bd. 1852*. VDI-Verl.
- Vogt, G. (10. Juni 2021). Interview durch C. Kirchttag [Division Manager Slurry Treatment Plants]. online.
- Wehnert, G. (2019). *Das Recyceln von Faserverbundkunststoffen*. TH Nürnberg. https://www.th-nuernberg.de/fileadmin/newsdaten/Pressemitteilungen/2019/2019_03_M%C3%A4rz/P_M_o8_TH_N%C3%BCrnb%20erg_CERES.pdf
- wikipedia (Hrsg.). (2021a). *Gesamter organischer Kohlenstoff*. https://de.wikipedia.org/wiki/Gesamter_organischer_Kohlenstoff

- wikipedia (Hrsg.). (2021b). *Suspension (Chemie)*.
[https://de.wikipedia.org/wiki/Suspension_\(Chemie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Suspension_(Chemie))
- Wikipedia (Hrsg.). (2018). *Kunstharmörtel*.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Kunstharm%C3%B6rtel>
- Wikipedia (Hrsg.). (2019). *Tonstein*.
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Tonstein&oldid=185643486>
- Wikipedia (Hrsg.). (2021a). *Mergel*.
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Mergel&oldid=207961654>
- Wikipedia (Hrsg.). (2021b, 1. August). *Glasfaserverstärkter Kunststoff*.
https://de.wikipedia.org/wiki/Glasfaserverst%C3%A4rkter_Kunststoff
- wikiwand (Hrsg.). (2021, 9. August). *Gelatinöse Sprengstoffe*.
https://www.wikiwand.com/de/Gelatin%C3%B6se_Sprengstoffe
- Willig, H.-P. (2020, 29. Juli). *Schaum – Chemie-Schule*. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Schaum>
- Wittke, W. (2006). *Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe. Veröffentlichungen Geotechnik in Forschung und Praxis: Bd. 6*. Verl. Glückauf.
- Wittke, W. & Wittke, M. (Hrsg.). (2014). *Tunnelbau 2014: Kunstharminjektionen zur Abdichtung beim Tunnelbau im quellfähigen Gebirge*. Ernst & Sohn.
- Zettl, S. (2013). *Stoffflussanalyse und Verwertungsmöglichkeiten des Ausbruchmaterials beim Koralmtunnel am Baulos KAT 2* [Masterarbeit], Technische Universität Graz.