

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Ressourcenbedarf des innerstädtischen U-Bahnbaus

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

BRUNNER Paul H.

E 226

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

PANOVA Petra

0925033

Alpenlandstraße 7/1
2802 Hochwolkersdorf

Wien, am 21.11.2014

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	1
2	Einleitung.....	3
2.1	Fragestellung.....	3
2.2	Ziele.....	3
3	Grundlagen.....	4
3.1	Ressourcenmanagement	4
3.2	Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT)	8
3.2.1	Der Grundgedanke	8
3.2.2	Geschichtliche Entwicklung [8], [10].....	8
3.2.3	Voraussetzungen [8]	8
3.2.4	Bauablauf der NÖT [8]	9
3.2.5	Einflussfaktoren beim Vortrieb [8]	9
3.2.6	Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT)	9
3.2.7	Konventionelle Sicherungsmittel	12
3.2.8	Spezielle Sicherungsmaßnahmen [8]	16
3.2.9	Tunnelauskleidung [11].....	17
3.3	Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb	18
3.3.1	Geschichtliche Entwicklung [2].....	18
3.3.2	Grundprinzip	20
3.3.3	Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen [2]	23
3.3.4	Arten der Ortsbruststützung [2]	24
3.3.5	Abbauwerkzeuge	30
3.3.6	Arten der Fördersysteme [14]	33
3.3.7	Tunnelausbau [2]	34
3.4	Wasserhaltungsmaßnahmen für NÖT und Schildvortrieb	38
3.4.1	Wasserableitung [13]	38
3.4.2	Wasserverdrängung [13].....	39
3.4.3	Wasserabsenkung [13]	40
3.4.4	Wasserabsperrung [13].....	42
4	Systemdefinition	44
4.1	Ziel.....	44
4.2	Systemgrenzen NÖT	44

4.3	Systemgrenzen Schildvortrieb (eingleisig).....	45
4.4	Systemgrenzen Schildvortrieb (zweingleisig)	46
5	Datengrundlage und Ressourcenbedarf	48
5.1	Ermittlung der Betonmengen.....	48
5.1.1	Betonmengen für NÖT (eingleisig).....	48
5.1.2	Betonmengen für NÖT (zweingleisig)	51
5.1.3	Betonmengen für den Schildvortrieb (eingleisig).....	52
5.1.4	Betonmengen für den Schildvortrieb (zweingleisig)	53
5.2	Ermittlung der erforderlichen Stoffmengen bei der Betonherstellung	55
5.2.1	Ermittlung der Bindemittelmengen	55
5.2.2	Ermittlung der Wassermengen.....	55
5.2.3	Ermittlung der Zusatzmittelmengen	56
5.2.4	Ermittlung der Zuschlagstoffmengen	56
5.3	Ermittlung der erforderlichen Stoffmengen bei der Zementherstellung.....	57
5.3.1	Ermittlung der erforderlichen Kalkmengen	57
5.3.2	Ermittlung der erforderlichen Tonmengen.....	57
5.4	Ermittlung der Stahlmengen	58
5.4.1	Stahlmengen für NÖT (eingleisig).....	58
5.4.2	Stahlmengen für NÖT (zweingleisig)	58
5.4.3	Stahlmengen für den Schildvortrieb (eingleisig).....	59
5.4.4	Stahlmengen für den Schildvortrieb (zweingleisig)	59
5.5	Ermittlung der erforderlichen Stoffmengen bei der Stahlherstellung	60
5.5.1	Ermittlung der erforderlichen Eisenerz mengen	60
5.5.2	Ermittlung der erforderlichen Koksmengen	60
5.6	Ermittlung des Energiebedarfs für die Herstellung erforderlicher Baumaterialien	61
5.6.1	Energiebedarf für die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (eingleisig)	61
5.6.2	Energiebedarf für die NÖT (zweingleisig)	62
5.6.3	Energiebedarf für den Schildvortrieb (eingleisig)	63
5.6.4	Energiebedarf für den Schildvortrieb (zweingleisig)	64
6	Energiebedarf der erforderlichen Baugeräte	66
7	Vergleich und Interpretation der Ergebnisse	67

7.1	Vergleich der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT) und des Schildvortriebs hinsichtlich des Ressourcenbedarfs	67
7.1.1	Vergleich des Materialbedarfs (Zement, Beton, Stahl).....	67
7.1.2	Vergleich des Energiebedarfs	68
7.1.3	Vergleich des Materialbedarfs bei der Zementherstellung	70
7.1.4	Vergleich des Materialbedarfs bei der Betonherstellung	71
7.1.5	Vergleich des Materialbedarfs bei der Stahlherstellung	73
7.1.6	Vergleich des Materialbedarfs für die Herstellung erforderlicher Baugeräte.....	74
7.1.7	Vergleich des Energiebedarfs der erforderlichen Baugeräte.....	74
7.2	Interpretation der Ergebnisse	76
8	Zusammenfassung und Empfehlungen	79
8.1	Zusammenfassung	79
8.2	Empfehlungen	80
8.2.1	Systemgrenzen der ressourceneffizienten Ausführungsvariante	81
8.2.2	Berechnung des Ressourcenbedarfs der ressourceneffizienten Ausführungsvariante.....	82
8.2.3	Vergleich der ressourceneffizienten mit der berechneten, zweigleisigen Ausführungsvariante.....	84
9	Literaturverzeichnis	86
10	Abbildungsverzeichnis	90

1 Kurzfassung

Der Bau eines U-Bahn Tunnels hat weitreichende Auswirkungen auf die Umwelt. Insbesondere die Herstellung der Baumaterialien sowie Auswirkungen durch den Einsatz der Baugeräte stellen dabei wichtige Einflussfaktoren dar.

In dieser Arbeit werden die Umwelteinflüsse bezogen auf den geplanten Bau der U-Bahnlinie U5 der Wiener Linien für zwei relevante Tunnelbaumethoden und Ausführungsvarianten untersucht: die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) und der Schildvortrieb in ein- und zweigleisiger Ausführung.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es den Ressourceneinsatz pro Meter Tunnel zu ermitteln, um damit feststellen zu können, welche dieser beiden Tunnelbaumethoden umweltschonender ist.

Durch die Projektwahl ergaben sich aufgrund der Lage des Bauprojekts folgende Randbedingungen, die die Grundlage für die Berechnungen bildeten: innerstädtischer Bereich (Wien) und Wiener Tegel als Untergrund. Aufgrund dessen wurde für die NÖT von einem Vortrieb mittels Bagger und einer Ortsbruststützung mit einer 5cm Spritzbetonschicht ausgegangen. Bei der Ausführung mittels Schildvortrieb wurde eine Schildmaschine mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, die aus einer 5cm starken Bentonitschicht besteht, gewählt.

In weiterer Folge wurden Stoffflussanalysen (STAN) für die jeweiligen Methoden und Ausführungsvarianten erstellt, sowie der notwendige Materialbedarf und der für die Herstellung der Baumaterialien erforderliche Energiebedarf berechnet. Dabei wurden die maßgebenden Materialien, Beton und Stahl, sowie der Energiebedarf, der für deren Herstellung erforderlich ist, im Detail betrachtet.

Um den Einfluss der erforderlichen Baugeräte untersuchen zu können, wurden die Ergebnisse aus [1] herangezogen. Darin werden für beide Tunnelbaumethoden Baugerätelisten angegeben und der Ressourcenbedarf, der für den Betrieb und die Herstellung erforderlich ist, berechnet. Dabei wird der Energiebedarf in zwei Energieträger unterschieden: Diesel und Strom.

Im Zuge der Berechnungen konnte gezeigt werden, dass in eingleisiger Ausführung der Schildvortrieb ressourceneffizienter als die NÖT ist. In zweigleisiger Ausführung ist jedoch der gegenteilige Effekt erkennbar, da hier die NÖT umweltschonender ist.

Abstract

The building of underground tunnels has a strong environmental impact. Especially the production of building materials and the use of construction equipment represent important influencing factors.

This master thesis deals with the construction of the Vienna underground U5 and the influences on the environment using two different building methods: New Austrian Tunneling Method (NATM) and shield driving with tubbing segment lining on single and twin-track version.

The aim of this master thesis is to determine which of these construction methods has a lower requirement of resources. Therefore, the total effort for one meter of each construction method is calculated.

Following boundary conditions are given based on the project data: inner urban area (Vienna city) and Wiener Tegel as bedrock. An excavator driving with a 5cm shotcrete layer needed for the face stability was chosen for the NATM and a shield machine with a slurry supported working face with a 5cm layer of bentonite was chosen for the second tunneling method.

In the next step a material flow analysis for each tunnel construction method was created and the required materials for the construction as well as the energy demands were calculated. The exact calculations for the construction equipment are explained in [1].

To sum up, the calculations show that the shield driving method is more efficient for single-track construction than the NATM. In contrast, the NATM is more efficient for the twin-track version in comparison to the shield driving method.

2 Einleitung

Der Bau einer U-Bahn ist mit starken Eingriffen in die Umwelt verbunden. Auch wenn die direkten Auswirkungen auf der Oberfläche gering sein können, besonders bei komplett geschlossener Bauweise, sind die Effekte der Vorketten und der Entsorgung zu beachten. Insbesondere der Materialeinsatz, hauptsächlich Stahlbeton, hat bei der Herstellung weitreichende Umweltauswirkungen. Aber auch die verschiedenen Baugeräte im Einsatz, sowie der Tunnel selbst können die Umgebung beeinflussen.

Im Kontext der geplanten U5-Erweiterung der Wiener Linien sollen verschiedene Tunnelbaumethoden hinsichtlich der oben genannten Aspekte untersucht und verglichen werden. Es soll herausgearbeitet werden, in welchen Punkten sich die Methoden unterscheiden, und welche dieser Punkte im Kontext der U5 relevant sind.

2.1 Fragestellung

Wie unterscheiden sich die Bauweisen Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) und Schildvortrieb einröhrig und zweiröhrig hinsichtlich deren Ressourcenverbrauchs? Konkret werden folgende Punkte betrachtet:

- Bauarbeiten
- Materialinput
- Betrieb

Welcher Ressourceneinsatz pro Meter Tunnel wird bei jeder der Varianten benötigt? Konkret werden folgende Punkte betrachtet:

- Beton
- Stahl
- Energie (Strom, Fossil)

Sind Zusatzmaßnahmen in Bezug auf die Standfestigkeit des Untergrundes durchzuführen?

2.2 Ziele

Es soll festgestellt werden, welche dieser beiden Methoden umweltschonender ist. Dies soll anhand von Tabellen und Diagrammen dargestellt werden.

3 Grundlagen

In dieser Arbeit wird speziell auf den bergmännischen U-Bahnbau im städtischen Bereich eingegangen. Speziell in innerstädtischen Bereichen ist es von großer Bedeutung das öffentliche Verkehrsnetz auszubauen bzw. zu erneuern, zu erweitern oder mit äußerst geringer Beeinflussung der oberirdischen Bebauung oder Verkehrsströme in Stand zu halten. Die dadurch erschaffenen unterirdischen Hohlräume werden sowohl für Verkehrsanlagen als auch für Energiegewinnung o.Ä. verwendet. Besonders Länder mit großer Bevölkerungszahl und im Vergleich dazu geringem Raumangebot, wie zum Beispiel Japan, haben bezüglich des Tunnelbaus viel Erfahrung und weitreichende Konzepte. [2]

Im Detail werden die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (kurz: NÖT) und der Schildvortrieb betrachtet, deren Vor- und Nachteile erläutert und als Abschluss begründet welche der genannten Varianten ressourceneffizienter ist.

3.1 Ressourcenmanagement

Im Bauwesen spielt das Thema Ressourcen oft eine besondere Rolle. Auf einer Seite ist das Bauwesen ein großer Ressourcenverbraucher und auf der anderen Seite bilden Bauwerke die wichtigste Lagerstätte für Ressourcen. [3]

Damit ein optimaler Einsatz von Ressourcen ermittelt werden kann, muss der aktuelle Umsatz bekannt sein. Dies ist mit einer Stoffflussanalyse (SFA) möglich. Damit das Systemverständnis verbessert wird und somit die wichtigsten Prozesse im System definiert werden können, modelliert man die Stoffflüsse über einen längeren Zeitraum. [4]

Bezogen auf das Diplomarbeitsthema werden alle wichtigen Stoffflüsse betrachtet, die zum Bau einer ein Meter langen Tunnelröhre unter Anwendung der beiden Tunnelbaumethoden erforderlich sind.

Stoffflussanalyse (SFA)

Mit der Methode der Stoffflussanalyse können beliebig komplizierte Systeme in stofflicher Hinsicht beschrieben und analysiert werden. Ebenso können damit Betriebe, private Haushalte, Städte und Regionen dargestellt und modelliert werden. Den Vorteil, den die Stoffflussanalyse mit sich bringt, ist die Reduzierung des komplexen Systems auf die für eine Fragestellung relevanten Güter und Prozesse. [5]

Diese Methode wurde Ende der 80er Jahre entwickelt. Sie beherbergt ein bestimmtes methodisches Vorgehen und auch eine spezielle „Sprache“, [6]. Das Ziel war es ein möglichst universelles Werkzeug zu entwickeln mit dem Ergebnisse von unterschiedlichen Studien verglichen werden können. [5] Die Stoffflussanalyse baut auf dem Satz der Erhaltung der Masse auf: [7]

$$Input = Output \pm Lageränderung$$

Für die Durchführung von Stoffflussanalysen ist eine Erklärung der wichtigsten Begriffe erforderlich.

- System

„Ausgangspunkt einer jeden Stoffflussanalyse ist die Wahl des Systems und seiner Systemgrenzen in räumlicher und zeitlicher Hinsicht. Es ist zu entscheiden, welche Prozesse sich innerhalb und welche sich außerhalb des zu untersuchenden Systems befinden. Dieser Vorgang wird mit dem Ziehen einer räumlichen Systemgrenze (dreidimensional) bezeichnet. Gleichzeitig ist auch eine zeitliche Systemgrenze zu definieren, also der Zeitraum, über den das System bilanziert wird. Dies ist üblicherweise ein Jahr, kann aber auch längere Zeiträume umfassen.“ [5]

- Systemgrenze

„Systemgrenzen definieren die zeitliche und räumliche Abgrenzung des zu untersuchenden Systems. Die räumliche Abgrenzung erfolgt dreidimensional. Als zeitliche Grenze wird oft ein Jahr gewählt, als räumliche Grenze kann z. B. eine politische, hydrologische oder betriebliche Grenze verwendet werden. Materialflüsse in ein System hinein werden als Importe, solche aus dem System hinaus als Exporte bezeichnet.“ [5]



Abbildung 1: Darstellung der Systemgrenze in STAN (Stoffflussanalyse) [7]

- Prozess

„Parallel mit der Wahl des Systems werden die Prozesse ausgewählt. Ein Prozess beschreibt die Umformung, den Transport oder die Lagerung von Gütern und Stoffen. Der Prozess selbst wird meist aus Gründen der Minimierung des Aufwandes als Black Box behandelt, d.h. die Vorgänge innerhalb des Prozesses werden oft nicht untersucht.“ [5]

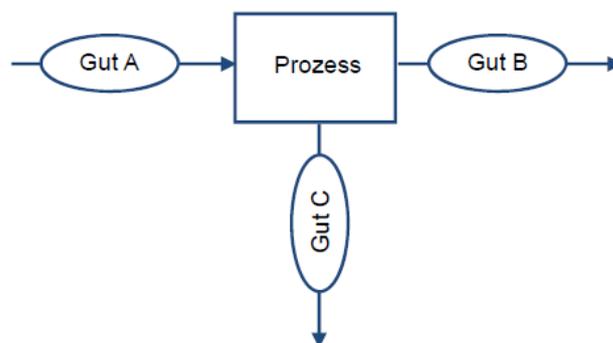


Abbildung 2: Darstellung des Prozesses in STAN [7]

- Gut

„Die einzelnen Prozesse werden über Güter- und Stoffflüsse miteinander verknüpft, wobei jeder Fluss über einen Herkunfts- und Zielprozess verfügt. Ein „Gut“ ist definiert als eine handelbare Substanz, die aus einem oder mehreren Stoffen besteht.“ [5]

- Stoff

„Die Güter setzen sich also aus Stoffen zusammen. Ein „Stoff“ wird definiert als chemisches Element oder als chemische Verbindung in reiner Form. Es ist möglich, dass bestimmte Güter mit Stoffen identisch sind.“ [5]

- Material

„Material ist ein allgemeiner Begriff, der sowohl Güter als auch Stoffe umfassen kann und damit Rohmaterialien sowie alle bereits vom Menschen durch physikalische oder chemische Prozesse veränderten Stoffe einschließt. Der Begriff Material wird dann verwendet, wenn Güter und Stoffe betrachtet werden, oder wenn man sich noch nicht festlegen will, auf welcher Ebene (Güter oder Stoffe) eine Untersuchung durchgeführt werden soll.“ [7]

- Fluss, Flux

„Der pro Zeiteinheit zwischen zwei Prozessen bewegten Masse an Gütern resp. Stoffen wird als Fluss mit der Einheit Masse pro Zeit bezeichnet. Häufig wird statt „Fluss“ auch der Begriff „Fracht“ verwendet.

Als Flux bezeichnet man den Massenfluss pro Querschnitt mit der Einheit Masse pro Zeit und Querschnitt, wobei der Querschnitt als Fläche, aber auch als andere Einheit (Einwohner, Region, Betrieb etc.) angegeben werden kann.“ [7]



Abbildung 3: Darstellung des Flusses in STAN [7]

- Lager

„Ein Lager wird definiert als der Bestand von Gütern oder Stoffen innerhalb eines Prozesses. Es gibt prinzipiell zwei Gruppen von Lagern. Ein Beispiel für die erste Gruppe von „Lager“ im Prozess Müllverbrennungsanlage der Bestand an Müll im Bunker. Neu eingebrachter Restmüll ergibt einen Lagerzuwachs, die Verbrennung von Restmüll führt zu einem Lagerabbau. Ein Beispiel für die zweite Gruppe von „Lager“ ist der Bestand an Bauinfrastruktur (z. B. Gebäude). Neu erstellte Gebäudeteile ergeben einen Lagerzuwachs, der Abriss von Gebäudeteilen führt zu einem Lagerabbau.“ [7]

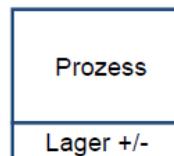


Abbildung 4: Darstellung des Lagers in STAN [7]

3.2 Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT)

Für diese Tunnelbaumethode gibt es mehrere Bezeichnungen: [8]

- New Austrian Tunneling Method – NATM
- Sequential Excavation Method – SEM – Sequenzielle Ausbruchsmethode
- Shotcrete Method – Spritzbetonbauweise

Das Kennzeichen dieser Methode ist die zyklische Abfolge der einzelnen Arbeitsabläufe, die im Wesentlichen zeitlich nacheinander und mit Unterstützung von Einzelgeräten erfolgen.

3.2.1 Der Grundgedanke

„Der Grundgedanke der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT) besteht darin, den Hohlraumrand unter weitgehender Nutzung der Tragfähigkeit des Gebirges mit Hilfe von Spritzbeton und sonstigen Ausbauelementen sowie unter Einsatz messtechnischer Beobachtung auf möglichst wirtschaftliche und sichere Art zu stabilisieren.“ [9]

3.2.2 Geschichtliche Entwicklung [8], [10]

Die Entwicklung dieser Tunnelbaumethode, die Rabcewicz 1963 als „Neue Österreichische Tunnelbauweise“ benannt hat, erfolgte in entscheidenden Anteilen von österreichischen Ingenieuren. Die NÖT nützt die Eigentragfähigkeit des Gebirges aus und bildet ein gutes Konzept zu einer wirtschaftlichen und sicheren Herstellung eines Tunnels. Die Beschreibung dieses Konzepts wurde von Leopold Müller im Jahr 1978 in 22 Grundsätzen zusammengefasst.

Neben den elementaren felsmechanischen Überlegungen, wie das Wechselspiel zwischen Ausbauwiderstand und Gebirgsdruck, entwickelte sich eine wichtige Erneuerung in der Hohlraumsicherung. Im Vergleich zu früheren Sicherungsmaßnahmen, die sehr zeitaufwändig waren, war die neuartige Verwendung von Spritzbeton wesentlich zeitsparender. Erstmals im Jahre 1955 wurde die Methode des Spritzbetons bei Stollenbauarbeiten in Österreich eingesetzt.

Die Spritzbetonmethode wurde in den letzten Jahren so weiterentwickelt, dass sie bei nahezu allen Gebirgsverhältnissen eingesetzt werden kann. Näheres zur Sicherung mittels Spritzbeton siehe Kapitel 3.2.7.1.

3.2.3 Voraussetzungen [8]

Voraussetzung für die NÖT ist eine ausreichende Standzeit des Gebirges mit oder ohne Einsatz von Zusatzmaßnahmen, wie konventionelle/spezielle Sicherungsmittel, siehe Kapitel 3.2.7 und Kapitel 3.2.8, und Wasserhaltungsmaßnahmen, siehe Kapitel 3.4.

Bevor der Abbau des Gebirges erfolgt, muss eine ausreichende Sicherung des Tunnelvortriebs gewährleistet sein. Dies kann mit konventionellen Sicherungsmitteln oder auch durch spezielle Sicherungsmaßnahmen erfolgen.

3.2.4 Bauablauf der NÖT [8]

Der Ausbruch des Tunnels erfolgt in mehreren Arbeitsschritten. Zu Beginn wird die Kallotte, dann die Strosse und die Sohle abgebrochen. Die bereits abgebrochenen Stellen werden sofort mit Spritzbeton versiegelt. Das Tunneltragwerk besteht aus einer ersten Schicht Spritzbeton und einer zweiten Schicht bewehrtem Beton oder Spritzbeton. Zwischen den beiden Schichten wird ein Abdichtungssystem eingebaut. Dieses besteht aus einem Geotextil, welches die Schicht darüber, die aus einer flexiblen, wasserundurchlässigen Membran besteht, schützt und einem abschnittsbezogenen System zur Sanierung von möglichen undichten Stellen. Eventuell finden zusätzlich Maßnahmen statt, die zur Stabilität und Sicherheit des Tunnelvortriebs beitragen und Oberflächensetzungen minimieren. Für ungünstige Untergrundverhältnisse sind spezielle Sicherungsmaßnahmen erforderlich, siehe Kapitel 3.2.8.

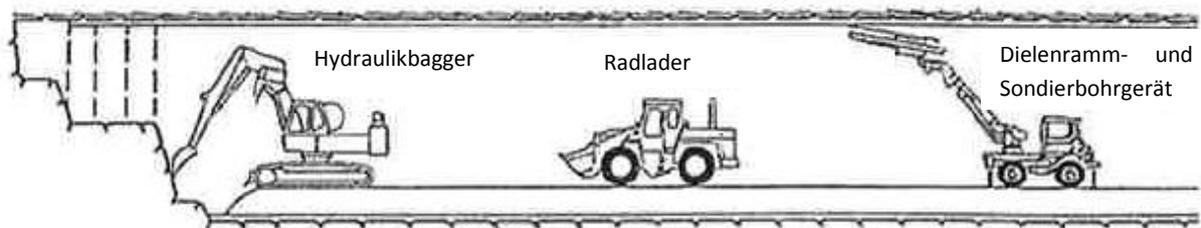


Abbildung 5: Vortriebsablauf bei der NÖT [8]

Im Laufe des Tunnelvortriebs werden durchgehend Verformungen im und über dem Tunnel überwacht, dokumentiert und interpretiert. Dies dient der Überprüfung der Entwurfsannahmen und der Einschätzung der Standfestigkeit sowie der Eignung der gewählten Stützmittel. Anpassungen an die gewonnenen Daten sind damit jederzeit möglich.

3.2.5 Einflussfaktoren beim Vortrieb [8]

Beim Bau sollten Querschnitte mit einer gewölbten Ortsbrust vermieden werden, da es hierbei zu großen Spannungskonzentrationen kommen kann. Liegt der Tunnel im weichen Boden, muss ein Sohlgewölbe hergestellt werden. Damit der Ausbruch zu jedem Zeitpunkt kontrollierbar ist, wird eine Unterteilung der Ortsbrust in Kallotte, Strosse, Sohle oder kleinere Flächen genauso wie die Anpassung der Abschlagslänge empfohlen. Es ist auf den rechtzeitigen, raschen Einbau des Spritzbetons zu achten um Ablösungen und Auflockerungen des Bodens zu vermeiden.

3.2.6 Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT)

Die NÖT kann im Spreng-, Bagger- und Teilschnittmaschinenvortrieb ausgeführt werden.

3.2.6.1 Sprengvortrieb [11]

Das Einsatzgebiet des Sprengvortriebs ist v.a. im Fels mit mittlerer bis hoher Festigkeit. Der Tunnelquerschnitt kann bezüglich seiner Form und Größe beliebig gewählt werden. Spritzbeton, Anker und Ausbaubögen dienen der Sicherung. Diese Elemente können ganz einfach an aufkommende Untergrundverhältnisse angepasst werden, ebenso kann der Tunnelquer-

schnitt jederzeit seine Größe ändern. Durch die hier aufgezählten Punkte ist der Vortrieb größeren Schwankungen unterworfen als dies z.B. beim Schildvortrieb der Fall ist. Ein wesentlicher Vorteil des Sprengvortriebs ist, dass das Ausbruchmaterial sehr gut wieder aufbereitet und weiterverwendet werden kann. Die Arbeitszyklen wie Bohren, Laden, Verdämmen, Sprengen, Lüften, Sichern und Schüttern wiederholen sich ständig, siehe Abbildung 6.

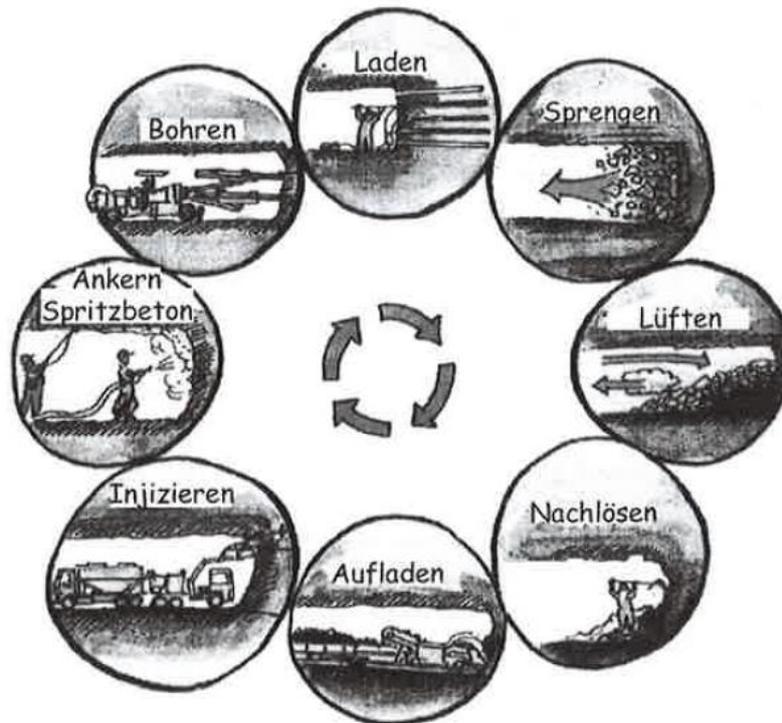


Abbildung 6: Zyklus des Sprengvortriebs [11]

Um weiterhin mit dem maschinellen Vortrieb konkurrenzfähig zu bleiben, muss ständig an dieser Methode bezüglich der Kosteneffizienz, Qualität, Leistung, Arbeitssicherheit und Arbeitsbedingungen gearbeitet und weiterentwickelt werden. Die Genauigkeit der Bohrlöcher sowie die gewählte Ladung der Bohrlöcher sind von großer Bedeutung für den Erfolg beim Sprengvortrieb. Die Voraussetzungen dafür bilden leistungsfähige Bohrgeräte mit Ladekorb zum Laden und Besetzen der Bohrlöcher.

Die Bohrlochanzahl, die Ladungsmengen sowie die Abschlagslänge werden durch die örtlichen Gegebenheiten bestimmt. Die Optimierung des Bohr-, Ladungs- und Zündschemas sowie die Zerkleinerung des Ausbruchmaterials erfolgten durch Versuchssprengungen. In der Nähe von Gebäuden müssen Vibrationsmessungen durchgeführt werden.

3.2.6.2 Baggervortrieb [11]

Der Baggervortrieb wird v.a. im Gebirge mit geringer Festigkeit und im Lockergestein eingesetzt. Diese Hydraulikbagger besitzen Tieflöffel mit starken Reißzähnen. Um einen Ausbruch durch Felsbänke ebenfalls zu ermöglichen, können an den Baggerarmen Hydraulikhämmer oder –meißel angebaut werden. Dadurch sind hohe Vortriebsleistungen möglich.

Ebenfalls können zum Abbau von Lockergesteinen und Böden mit geringer Festigkeit schwere Hydraulikbagger mit einer Schrämeinrichtung eingesetzt werden.



Abbildung 7: Tunnelbagger mit 2x45° um die Längsachse schwenkbarem Arm [11]

In dieser Diplomarbeit wird in späterer Folge v.a. auf den Baggervortrieb eingegangen.

3.2.6.3 Vortrieb mittels Teilschnittmaschine [11]

Der Vortrieb mittels Teilschnittmaschinen findet v.a. Einsatz in Gesteinen mit mittlerer Festigkeit (50-80N/mm²) und v.a. wenn das Gestein stark geschichtet oder zerklüftet ist. Ebenso kann er für Lockergesteine eingesetzt werden. Diese Art des Vortriebs ist gut geeignet für kurze Tunnellängen und bei veränderlichen Gebirgsverhältnissen und Querschnitten. Im Vergleich zum Spreng- und Baggervortrieb ist ein kontinuierlicher Arbeitszyklus mittels Teilschnittmaschinen möglich. Da diese Vortriebsart sehr erschütterungsarm ist, wird sie oft beim Bau in bebauten Gebieten eingesetzt.

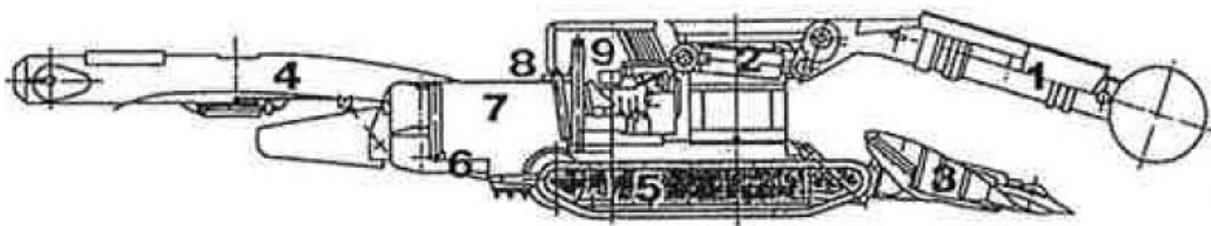


Abbildung 8: Systemskizze – Teilschnittmaschine [11]

- | | | | |
|------------------------------|------------------|-----------------------------|---------------------|
| 1... Schrägarm | 2... Schwenkwerk | 3... Ladeeinrichtung | 4... Kettenförderer |
| 5... Raupenfahrwerk | 6... Rahmen | 7... Elektrische Ausrüstung | |
| 8... Hydraulische Ausrüstung | 9... Fahrerstand | | |

In Abbildung 8 ist der Aufbau einer Teilschnittmaschine dargestellt.

Um eine ausreichende Sicherheit im Tunnelinneren gewährleisten zu können, sind verschiedene Sicherungsmaßnahmen möglich und erforderlich.

3.2.7 Konventionelle Sicherungsmittel

Als konventionelle Sicherungsmittel sind u.a. Spritzbeton, Bewehrung, Anker, Spieße, Dielen und Tunnelbögen (Sonderfall mit Stauchelementen) zu verstehen.

3.2.7.1 Spritzbeton [8]

Begriffsbestimmungen [8]

*„**Spritzbeton/sprayed concrete:** Beton, der durch Spritzen mit hoher Auftreffgeschwindigkeit aufgetragen und bei diesem Vorgang verdichtet wird.“*

*„**Erstarrungsbeschleuniger/accelerating admixture:** pulverförmiges oder flüssiges Zusatzmittel zur beschleunigten Reaktion des Zementes im aufgetragenen Spritzbeton.“*

*„**Spritz-Bindemittel/binding agent:** Sammelbegriff für schnellerstarrende Bindemittel, die ohne weitere Zugabe von Zusatzmitteln (EB) das erforderliche Erstarren und rasche Festigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons gewährleisten.“*

*„**Verarbeitungszeit/using time:** Zeit w. Zusammenführen von erdfeuchtem Zuschlag und Zement bzw. Herstellung des Nassmischgutes bis zum Auftrag des SpB.“*

*„**Rückprall/fall back:** Jener Anteil des Spritzgemisches (Mischgut und Zugabewasser), der unmittelbar beim Aufbringen von der Auftragsfläche zurückprallt. Rückprall besteht zum überwiegenden Teil aus Zuschlag, zum geringeren Teil aus Bindemittel und Anmachwasser.“*

*„**Junger Spritzbeton/young sprayed concrete:** Spritzbeton bis zum Alter von 24 Stunden (je nach Frühfestigkeitsklasse).“*

Anwendungsbereich

Spritzbeton findet in nahezu allen Bereichen des Bauwesens Anwendung, v.a. wenn folgendes gefragt ist:

- Entfall der Schalung
- Aufbringung in dünnen Schichten
- Anforderungen an die Frühfestigkeit
- Spezielle Baumethoden

Spritzbeton wird mit hoher Geschwindigkeit auf die ausgebrochene Gebirgsoberfläche aufgebracht und dabei verdichtet. Seine Aufgabe ist es die Gebirgsoberfläche zu versiegeln und Auflockerungen/Ausbrüche zu vermeiden. Das wesentliche Tragelement bildet jedoch das Gebirge selbst. Es gibt 2 mögliche Ausführungsvarianten des Spritzbetons: bewehrt (Baustahlgitter, Stahlfasern) und unbewehrt.

Spritzbetonschalen können im frisch eingebauten Zustand sehr gut Verformungen aufnehmen, im ausgehärteten Zustand bilden sich Risse an der Oberfläche und Verformungen sind nur mehr beschränkt aufnehmbar. Im stark druckhaften Gebirge werden Spezialkonstruktionen (Stauchelemente, Kontraktionsschlitze) zur Aufnahme auftretender Verformungen ausgeführt. Es gibt drei Varianten der Ausführung von Spritzbeton: [8]

„Spritzbeton ohne konstruktive Aufgaben (SpB I) - Oberflächenvergütungen, kurzzeitige Stützungen während des Bauzustandes“

„Spritzbeton mit konstruktiven Aufgaben (SpB II) - Gebirgssicherungen im Hohlraumbau, Baugrubensicherungen, Brunnegründungen“

„Spritzbeton mit besonderen konstruktiven Aufgaben (SpB III) - einschalige Bauweise und Spritzbeton-Innenschalen“

Spritzbetonverfahren

Heutzutage kommen folgende zwei Verfahren zur Anwendung:

- Nassspritzverfahren

Hierbei wird das Mischgut zur Einbaustelle geliefert. Dieses Mischgut gelangt über eine kurze Pumpleitung in einen mechanischen Spritzarm, in welchem direkt der Erstarrungsbeschleuniger beigefügt wird.

Mit diesem Verfahren erreicht man ungefähr doppelt so hohe Spritzleistungen im Vergleich zum Trockenspritzverfahren.

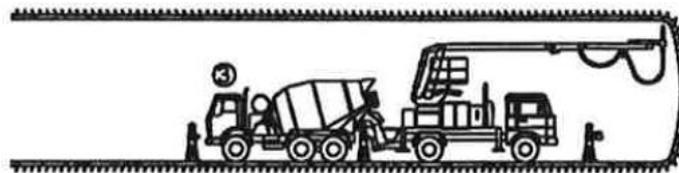


Abbildung 9: Systemskizze: Nassspritzverfahren [8]

- Trockenspritzverfahren

Hier unterscheidet man zwischen dem Verfahren mit naturfeuchten und ofentrockenen Zuschlägen. Bei beiden Varianten erfolgt die Wasserzugabe durch den Düsenführer erst direkt in der Düse. Der Düsenführer kann den WZ-Wert mittels Regelungsventil geringfügig steuern.

Durch die Nachfüllmöglichkeit bei diesem Verfahren ist ständig frisches Mischgut vorhanden, womit eine hohe, gleich bleibende Qualität erreicht wird.



Abbildung 10: Systemskizze: Trockenspritzverfahren mit ofentrockenen Zuschlägen (links);
Trockenspritzverfahren mit naturfeuchten Zuschlägen (rechts) [8]

- Gefahren bei der Herstellung von Spritzbeton

Tabelle 1 stellt die Gefahren bei der Spritzbetonherstellung dar, die in drei Bereiche unterschieden werden können.

Tabelle 1: Gefahren bei der Spritzbetonherstellung [8]

Bereich	Gefährdung oder Belastung durch	Ursache Entstehungsort	Gefährdungsgrad Gefährdungsdauer Wirkungsbereich
Maschine	Mineral- und Zementstaub	Beschickung am Einfülltrichter Auspuff der Rotorkammer Reinigung der Maschine mit Druckluft	leichte Gefährdung, ständig im Umkreis von 10 m
	Staub von ätzenden Chemikalien	Umschlag des Erstarrungsbeschleunigers	leichte Gefährdung, dauernd im Umkreis von 2 m
	Lärm	Abblasen der Druckluft aus den Rotorkammern am Auspuff	in geschlossenen Räumen mittlere Gefährdung im Umkreis von 10 m
Leitung	„verirrte“ Schlauchenden und Kupplungen	Ausblasen der Leitungen, ohne diese zu fixieren	mittlere bis schwere Gefährdung, selten
	ausgeschossene Stopfer	Ausblasen von Stopfern	mittlere bis schwere Gefährdung, selten
	Platzen von Schlauch und Leitungsverbindungen	Öffnen der Kupplungen unter Druck	mittlere Gefährdung, selten
Spritzdüse	Mineral und Zementstaub	in der ausströmenden Transportluft fein verteilter Mineral- und Zementstaub	leichte bis mittlere Gefährdung, dauernd im Umkreis von 10 m
	Staub und ätzende Chemikalien	in der ausströmenden Transportluft fein verteilter Staub von pulverförmigem Erstarrungsbeschleuniger	mittlere Gefährdung, dauernd im Umkreis von 10 m
	Lärm	expandierende Luft an der Düse	mittlere Gefährdung, dauernd im Umkreis von 10 m
	Rückprall	rückprallendes Material	leichte Gefährdung, dauernd im Umkreis von 10 m
	herabfallende Steine	verschiedene	starke Gefährdung
	Sturz vom Gerüst bzw. von der Schaufel	ungesicherter Standort	mittlere bis schwere Gefährdung

3.2.7.2 Bewehrung [8]

Heutzutage werden v.a. Baustahlgittermatten als Bewehrung eingebaut. Sie werden den Bogenabständen entsprechend zugeschnitten, eingebaut und an den Tunnelbögen befestigt. Sie dienen als Schutz vor herabfallenden Steinen und werden direkt in die Außenschale, entweder ein- oder zweilagig, eingesetzt.

3.2.7.3 Anker [8]

Definition:

„Zur Hohlraumstützung und Verbesserung der Gebirgseigenschaften eingebaute Stäbe, Rohr oder Litzen.“ [12]

Anker werden entweder in der Hohlraumlaibung oder in der Ortsbrust eingebaut. Sie erhöhen die Tragwirkung des Gebirges, indem sie als Zugelemente wirken. Anker sorgen für die Sicherheit gegen Ausfallen von Ausbrüchen, Nachbrüchen, vermeiden Kluft- und Trennflächenverschiebungen und damit die Gebirgsentfestigung, sowie größere Verformungen solange bis der endgültige Ausbau erfolgt ist.

Ein besonderes Augenmerk ist auf die richtige Dimensionierung (v.a. Ankerlänge) und auf die Ankerdichte zu legen.

Die Wirkungsweise der Anker kann nach ihrem Tragverhalten vereinfacht in drei Gruppen eingeteilt werden:

„**Einzelanke**ru**ng**: dabei werden einzelne Gesteinsblöcke oder Platten v.a. in großbankig geklüftetem Gebirge gesichert.“

„**Mehrfachan**ke**ru**ng: dient zur Verdübelung von Trennflächen bzw. zur Erhöhung der aufnehmbaren Scherkräfte.“

„**Systeman**ke**ru**ng: als Ausbauwiderstand durch Druckvorspannung des Gebirges um den Hohlraum.“ [8]

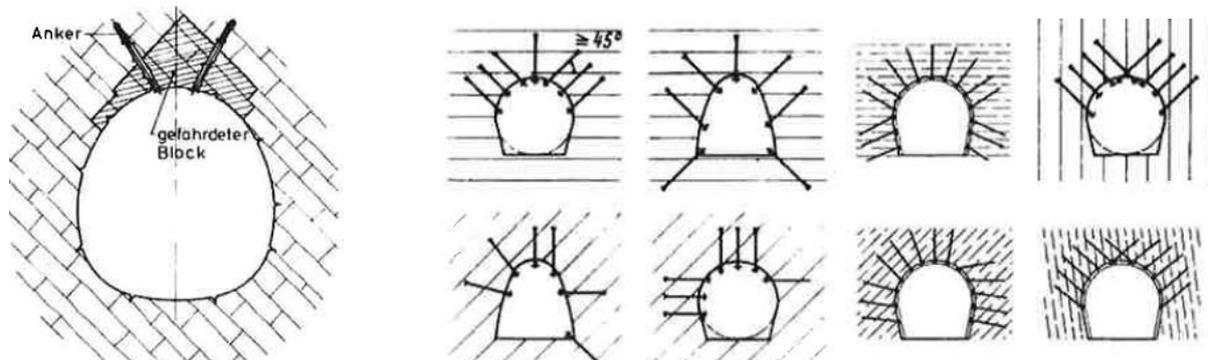


Abbildung 11: Systemskizzen: Einzelanker (links), Systemanker (rechts) [8]

Bei der Einzelankerung werden die Anker lotrecht zur Schichtung angeordnet. Bei der Systemankerung werden die Anker entweder über einen Teil oder den gesamten Umfang des Ausbruchspröfils gleichmäßig verteilt. Die Verteilung erfolgt meist unabhängig von der Schichtung des Gebirges.

Es wird zwischen folgenden Ankersystemen unterschieden: [13], [14]

- Verbundanker
- Reibungsanker
- Spreizhülsenanker
- Glasfaserverstärkte Kunststoffanker (GFK-Anker)

3.2.7.4 Spieße [8]

Definition:

„Stäbe oder Rohre, die zur Stützung des Hohlraumrandes dem Vortrieb vorausseilend eingebaut werden.“ [12]

Spieße dienen als vorausseilende Sicherungsmaßnahme im gebrächen und nachbrüchigen Gebirge und bestehen aus Stabstahl oder Stahlrohren. Nach dem Einbau des Tunnelbogens werden diese in einem Winkel von 10°-15° zur Tunnelachse in drei möglichen Einbauarten eingebracht. Spieße werden entweder eingerammt, in vorgebohrte, vermörtelte Bohrlöcher eingebracht oder nach dem Einbringen vermörtelt. Nach dem Einbau der Spieße ist die Spritzbetonsicherung sofort nachzuholen.

3.2.7.5 Dielen [8]

Definition:

„Formteil aus profiliertem Stahlblech, der im Zuge des Vortriebs flächig zur Stützung der Hohlraumlaibung eingebaut wird.“ [12]

Dielen dienen ebenfalls als vorausseilende Sicherungsmaßnahme. Man unterscheidet je nach Einbauzeitpunkt zwischen Verzugs- und Getriebedielen. Der Einbau erfolgt entweder als geschlossener Verzug oder auf Lücke (siehe Abbildung 12).

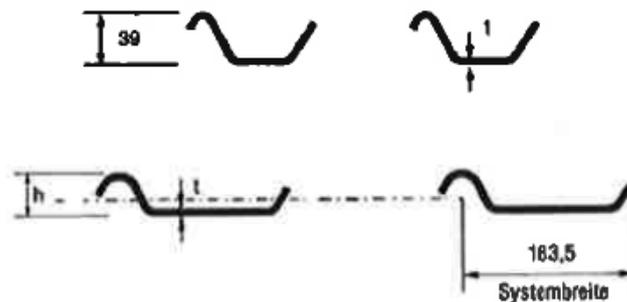


Abbildung 12: Getriebedielen auf Lücke [8]

3.2.7.6 Tunnelbögen [13]

Tunnelbögen können sowohl aus Walzprofil als auch aus Gitterträgern hergestellt werden. Sie dienen aufgrund ihrer Bogentragwirkung der sofortigen Abstützung des nachbrüchigen, nicht standfesten und druckhaften Gebirges.

Tunnelbögen müssen folgende Kriterien erfüllen:

- Tragfähigkeitsanforderungen bezüglich der Aufnahme der auftretenden Normalkräfte und Biegebeanspruchungen
- Möglichst gute Verbundwirkung zwischen Bogen und Spritzbeton
- Möglichst gute Einbaubarkeit bezüglich Spritzschatten und Rückprall

Dauerhafte statische Anforderungen müssen nicht erfüllt werden.

Der Einbau von Stahlbögen erfolgt in mehreren Teilen, entweder durch eine starre oder falls druckhaftes Gebirge vorhanden ist, durch nachgiebige Stoßverbindungen.

3.2.8 Spezielle Sicherungsmaßnahmen [8]

Diese Sicherungsmaßnahmen haben folgende Anwendungsbereiche:

- In Bereichen mit geringen Überdeckungen
- Bei Unterfahrungen von bestehenden Bauwerken
- Teilweise in Bereichen im Grundwasser

Die Erstellung selbst erfolgt entweder von Obertage vor Beginn des Vortriebs oder von Untertage zeitgleich mit dem Vortrieb unter Verwendung von Spezialgeräten und einer Spezialmannschaft.

Es gibt folgende spezielle Sicherungsmaßnahmen:

- Rohrschirm
- DSV-Schirm
- Injektionen
- Gefrierverfahren

Im Zuge dieser Diplomarbeit wird nicht näher auf diese speziellen Sicherungsmaßnahmen eingegangen.

3.2.9 Tunnelauskleidung [11]

Die Wahl der Ausbruchsart und der Ausbruchsmethode, die vom Standort des Projekts und seiner Geologie, Geotechnik und Hydrologie bestimmt werden, sind entscheidend für die Wahl der Tunnelauskleidung. Zusätzlich wird die Auskleidung stark von der zukünftigen Nutzungsart beeinflusst.

Prinzipiell kommen zwei Varianten zur Anwendung:

- einschalige Tunnelauskleidung
- zweischalige Tunnelauskleidung

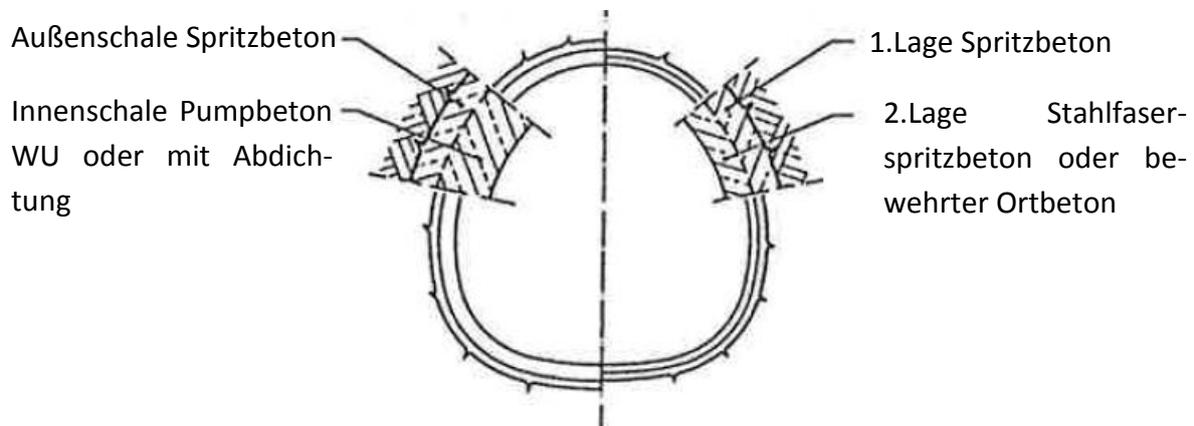


Abbildung 13: Vergleich der einschaligen (rechts) und der zweischaligen (links) Tunnelauskleidung [11]

3.2.9.1 Einschalige Tunnelauskleidung

Bei der einschaligen Bauweise handelt es sich um die kostengünstigste Ausführungsvariante. Bei dieser Ausführungsform werden die temporären Sicherungselemente in die endgültige Dimensionierung miteingerechnet. Eine einschalige Tübbingausführung ist ebenfalls möglich. Auf diese wird aber in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Die einschalige Tunnelausbaumethode kann entweder aus einer Spritzbetonschicht, die als Nachteil eine raue Oberfläche mit sich trägt, oder aus einer ersten Schicht aus Spritzbeton und einer zweiten Schicht aus bewehrtem Ortbeton, hergestellt werden. Der Vorteil einer einschaligen Spritz-

betonschale liegt in ihrer Anpassungsfähigkeit an die örtlichen Gebirgsverhältnisse und die geometrischen Tunnelabmessungen.

3.2.9.2 Zweischalige Tunnelauskleidung

Die zweischalige Tunnelauskleidung besteht aus zwei voneinander getrennten Schichten. Die erste Schicht kann aus Spritzbeton oder aus Tübbing hergestellt werden und dient zur temporären Sicherung des Hohlraums. Sie wird nicht zur Dimensionierung herangezogen. Die zweite Schicht besteht aus bewehrtem oder unbewehrtem Ortbeton. Die Trennung der zwei Schichten erfolgt durch eine durchgehende Isolierfolie.

3.3 Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb

3.3.1 Geschichtliche Entwicklung [2]

Schon bereits vor 5000 Jahren baute man Tunnel für verschiedenste Zwecke wie z.B. zum Schutz von Menschen und Gütern, als geheime Zugänge oder auch zur Gewinnung von Bodenschätzen. Solche Bauwerke zu erschaffen gelang auch im Gebirge mit Kluft- und Sickerwasser, aber nicht unterhalb des Grundwasserspiegels oder gar unter offenen Gewässern. Erstmals im Jahre 1806 erfand der ausgezeichnete Ingenieur Sir Marc Isambard Brunel in London das Prinzip des Schildvortriebes, das er sich später auch patentieren ließ. Der Anlass für seine Gedankengänge war der wintersichere Ausbau einer Verkehrsverbindung unter der Newa in St. Petersburg, die letztlich jedoch durch eine Hängebrücke ausgeführt wurde. Als ein weiteres Projekt von M. I. Brunel gilt der Tunnel unter der Themse in London, der erst 1843 nach mehr als 5 Wassereinbrüchen mit einem rechteckigen Schild vollendet wurde. 1869 wurde ein zweites Mal die Themse untergraben, dieses Mal jedoch mit einem kreisrunden Schild. Der Ausbau erfolgte hier das erste Mal mit gusseisernen Tübbing.

Durch diese Entwicklung kam auch schnell der Wunsch nach einem maschinellen Abbau des Gebirges, der den händischen Abbau ersetzen sollte. Die Engländer John Dickinson und George Brunton haben im Jahr 1876 das erste Patent für einen mechanisierten Schild beantragt. Er bestand aus einem halbkugelförmigen, rotierenden Schneidekopf und aus Kübeln, die das herausgelöste Material auf ein Förderband warfen, das den Transport aus dem Schild besorgte.

1896 wurde der nach seinem Erfinder benannte Price-Schild erbaut, der als erster die Leistungsfähigkeit eines rotierenden Schneidkopfes nutzte. Er wurde 1897 erfolgreich in den Londoner Tönen eingesetzt. Die Schneidwerkzeuge wurden von vier Kragarmen, die am Schneidrad befestigt waren, getragen. Das abgebrochene Material wurde durch Löffel am Schneidrad gesammelt, angehoben und über eine Rutsche abtransportiert.

1874 entwickelte Greathead einen Schild mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust (siehe Abbildung 14), der den Boden durch den Strom der Flüssigkeit lösen und als Slurry hydraulisch abfordern soll.

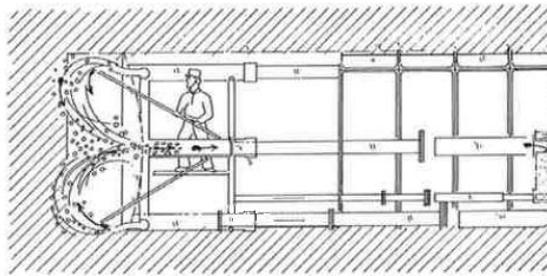


Abbildung 14: Slurryschild von Greathead, patentiert 1874 [2]

1896 ließ sich Haag solch einen Schild in Deutschland patentieren, siehe Abbildung 15.

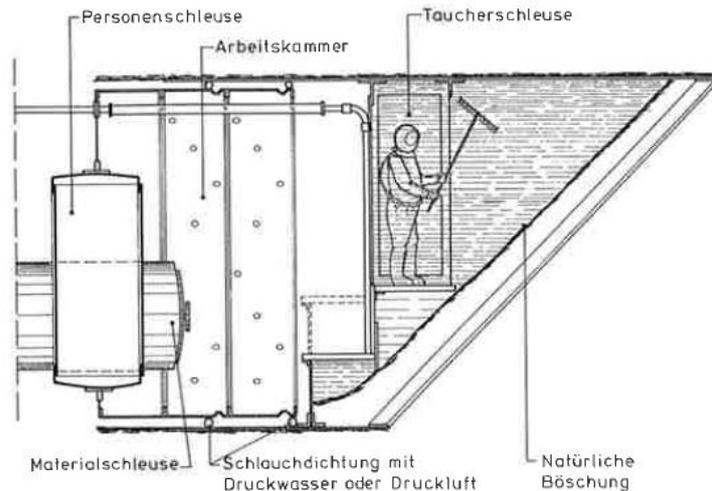


Abbildung 15: Flüssigkeitsschild von Haag, patentiert 1896 [2]

Im Jahr 1959 testete Elmer C. Gardner erfolgreich einen Schild mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust an einem Abwassertunnel mit 3,35m Durchmesser.

H. Lorenz schützte aus patentrechtlicher Sicht 1960 die stabilisierende Wirkung von Bentonit unter Druck für die Ortsbruststützung. Im Jahr 1967 setzte man in Japan den ersten Flüssigkeitsschild mit 3,1m Durchmesser ein, wo der Abbau der Ortsbrust mit einem Schneidrad und der Abtransport des gelösten Bodens mittels hydraulischer Förderung erfolgte.

Mit der Entwicklung der Erddruckschilde begann man erst viel später.

Heutzutage ist der Schildvortrieb eine besonders gut geeignete Art bergmännisch langgestreckte, unterirdische Bauwerke in wenig tragfähigen Bodenarten, im Grundwasser, mit kleinen Überdeckungshöhen zu erstellen ohne dabei Setzungen oder Störungen an der Oberfläche von größerem Ausmaß zu verursachen. Diese Art des Vortriebes kann in stark druckhaften Gebirge oder stark gebrächen Gebirge genauso eingesetzt werden wie in weichplastischen oder schwimmenden Böden. Es sind folgende Vor- und Nachteile zu erwähnen:

Vorteile: [1], [2]

- Einsatz in verschiedenen Bodenarten, von nicht standhaftem Boden bis hin zum Fels
- Einsatz auch im Grundwasser möglich, jedoch eingeschränkt
- Große Sicherheit für die Crew gegeben

- In dicht bebautem Gebiet und in geringer Tiefe ohne größeren Einfluss auf die oberirdische Bebauung oder Infrastruktur anwendbar

Nachteile: [1], [2]

- Kostendeckender Einsatz erst ab einer bestimmten Mindestlänge der Trasse erreichbar
- Für die Planung, Produktion und die Montage sind große Vorlaufzeiten erforderlich
- Aufbau der Schildvortriebsmaschine erfordert großen Platzbedarf
- Mehr Aushubmaterial durch gegebene, kreisrunde Querschnittsform
- Querschnittsänderungen sind sehr aufwändig

Der Bau mittels Schildvortrieb ist dann sinnvoll, wenn die Vorteile weitgehend genutzt und die Nachteile gemieden werden, in dem sie möglichst gut in die Planung einbezogen werden. Für Tunnel mit einer Länge von mehr als 2000m hat sich der Schildvortrieb als Konkurrenz zu den konventionellen Bauweisen erwiesen. Bei wesentlich längeren Strecken ist diese Verfahrensmethode durchaus wirtschaftlich und kann auch in vielen Fällen kostengünstiger sein als herkömmliche Varianten, wie zum Beispiel die NÖT. [1]

3.3.2 Grundprinzip

Beim Schildvortrieb wird grundsätzlich eine zylindrische Stahlkonstruktion in der Tunnelachse vorgeschoben, wobei der Gebirgsabbau gleichzeitig erfolgt. Die Sicherheit gegen das Einstürzen des Ausbruchshohlraumes wird bei offenen Schilden vorübergehend von der Stahlkonstruktion übernommen, jedoch nur so lange bis die endgültige Tunnelsicherung eingebaut ist. Die vorherrschenden Drücke (Erd- und Grundwasserdruck) werden vorerst durch den Schild abgetragen. Zusätzliche Sicherungsmaßnahmen sind dann erforderlich, wenn es die Grundwasser- und Bodenverhältnisse erfordern. Mit fortschreitendem Abbau wird der Schild in Richtung der Tunnelachse vorgeschoben, sodass er den geschaffenen Hohlraum sichern kann. Der Vorschub erfolgt durch Kräfte aus Hydraulikpressen. Diese stützen sich auf der bereits eingebauten Auskleidung ab. Der Ausbau des Hohlraums erfolgt durch sogenannte Tübbinge, die aus verschiedenen Materialien, unterschiedlichen Formen, Anordnungsmöglichkeiten, Dichtungssystemen und Einbauverfahren ausgeführt werden können. Spritzbeton kann ebenfalls als Auskleidung hergenommen werden.

Bevor mit dem Abbau begonnen werden kann, müssen Voruntersuchungen gemacht und eventuell dem Vortrieb vorausseilende Sicherungsmaßnahmen getroffen werden. Vor allem im innerstädtischen Bereich ist es wichtig die bestehenden Gebäude und Einrichtungen zu schützen. Es wird unterschieden zwischen Maßnahmen, die an der Oberfläche, Maßnahmen, die von der Oberfläche aus und Maßnahmen, die aus dem Tunnelvortrieb aus, ausgeführt werden. [15]

- Vorseilende Maßnahmen an der Oberfläche: [15]

Solche Maßnahmen sind vor allem bei Hydroschilden gefragt, da die Gefahr von Verbrüchen oder Ausbläsern besteht. Um dies zu verhindern kann eine Aufschüttung temporär aufgebracht werden, was besonders im Bereich des Start- und Zielschachtes wichtig ist. Eine weitere Möglichkeit, z.B. bei Unterquerungen von Flussläufen, ist das temporäre Ballastieren der Flusssohle mit Material hohen Gewichts. Es können ebenfalls Geotextilien mit Kolk-
schutzmatten zum Schutz von Wasserstraßensohlen eingesetzt werden. Diese Maßnahmen werden bei Lockerböden angewandt.

- Vorseilende Maßnahmen von der Oberfläche aus: [15]

Überall wo es notwendig und möglich ist, werden Bodenverbesserungsmaßnahmen von der Oberfläche aus durchgeführt. In besonders weichen Böden wird z.B. das Rüttelstopfverfahren angewandt, was die Erhöhung der Scherfestigkeit des Bodens zur Folge hat. Weiters können auch Injektionen zum Einsatz kommen.

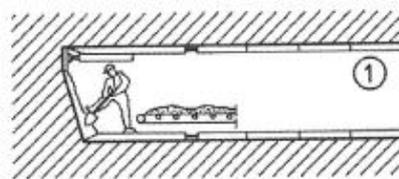
Im Zuge dieser Diplomarbeit wird auf diese Maßnahmen nicht genauer eingegangen.

- Vorseilende Maßnahmen aus dem Tunnelvortrieb:

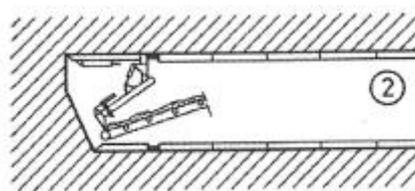
Näheres dazu siehe Kapitel 3.2.7.3, Kapitel 3.2.7.4 und Kapitel 0.

Nach dem Ausführen der erforderlichen Sicherungsmaßnahmen kann mit dem Abbau begonnen werden. Es wird zwischen acht Abbauarten unterschieden:

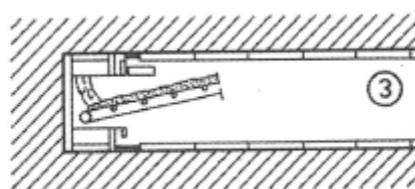
- Handabbau und Trockenförderung mittels eines Förderbandes



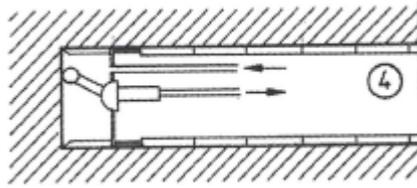
- Mechanisch teilflächiger Abbau und Trockenförderung mittels eines Förderbandes



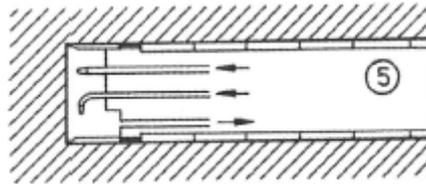
- Mechanisch vollflächiger Abbau und Trockenförderung mittels eines Förderbandes



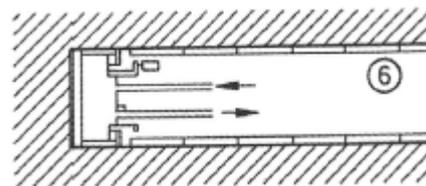
- Mechanisch teilflächiger Abbau und Flüssigförderung



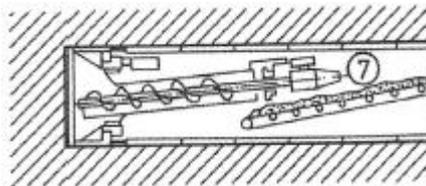
- Hydraulischer Abbau und Flüssigförderung



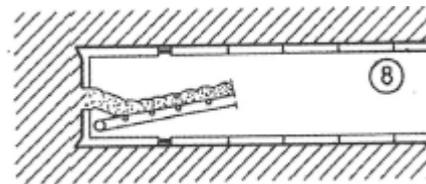
- Mechanisch vollflächiger Abbau und Flüssigförderung



- Mechanisch vollflächiger Abbau, Förderung mit einer Schnecke und Abgabe auf ein Förderband



- Extrusionsabbau und Abgabe des Materials auf ein Förderband



3.3.3 Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen [2]

Bei der Verwendung von Tunnelvortriebsmaschinen wird der gesamte Tunnelquerschnitt entweder mit einem Schneidrad im Vollschnitt oder teilflächig durch eine geeignete Lösevorrichtung oder mit einem Bohrkopf abgebaut. Es wird zwischen folgenden Varianten unterschieden:

- Tunnelbohrmaschinen
- Doppelschildmaschinen
- Schildmaschinen
- Kombinationsmaschinen

Der Abbauvorgang erfolgt entweder kontinuierlich oder mit Unterbrechungen.

3.3.3.1 Tunnelbohrmaschinen

Tunnelbohrmaschinen werden vor allem im standfesten bis brüchigen Fels, nicht jedoch im lockeren bis bodenähnlichen Gestein, eingesetzt. Diese Methode verwendet lediglich einen Kreisquerschnitt. Es wird zwischen folgenden Varianten unterschieden:

- Tunnelbohrmaschinen ohne Schildmantel
- Erweiterungstunnelbohrmaschinen
- Tunnelbohrmaschinen mit Schildmantel

3.3.3.2 Doppelschildmaschinen [2]

Doppelschildmaschinen werden nicht nur im standfesten Baugrund, sondern auch wenn schwächere Zonen aus brüchigem Gebirge vorkommen, eingesetzt. Doppelschildmaschinen bestehen aus einem vorderen Maschinenteil mit Bohrkopf und den Hauptvortriebspresen und einem hinteren Maschinenteil, der mit Nebenvortriebspresen und der Grippereinrichtung ausgerüstet ist. Im Bereich der schwächeren Zonen, wo die Vorspannplatten kein ausreichendes Widerlager finden, schreitet der Vortrieb durch Abstützung auf dem zuletzt erbauten Tübbingring voran. Eine aktive Ortsbruststützung ist hier nicht die Regel. Dies führt zu folgenden Schwierigkeiten: das Gebirge muss sich solange selbständig halten, bis der Ringspalt vollständig vermörtelt oder mit Perlkies verblasen ist. (siehe Abbildung 16)

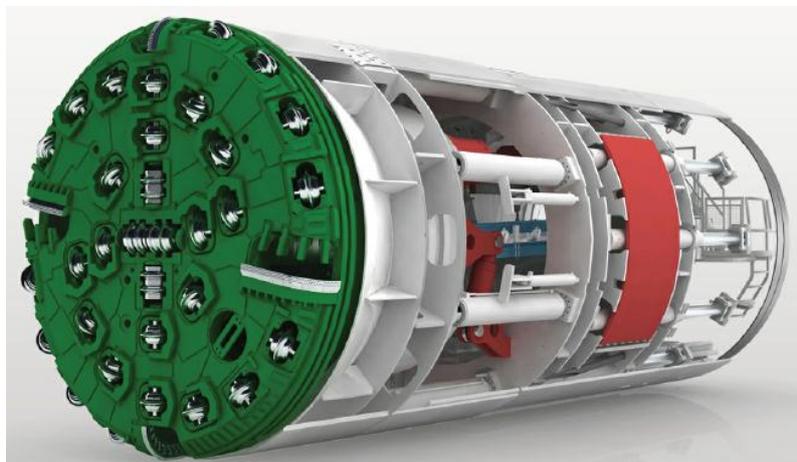


Abbildung 16: schematischer Aufbau einer Doppelschildmaschine [16]

3.3.3.3 Schildmaschinen [2]

Das Einsatzgebiet von Schildmaschinen sind Lockerböden oberhalb und unterhalb der Grundwassergrenze. Es gibt folgende Einteilung von Schildmaschinen: [2]

- Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (siehe Abbildung 17)

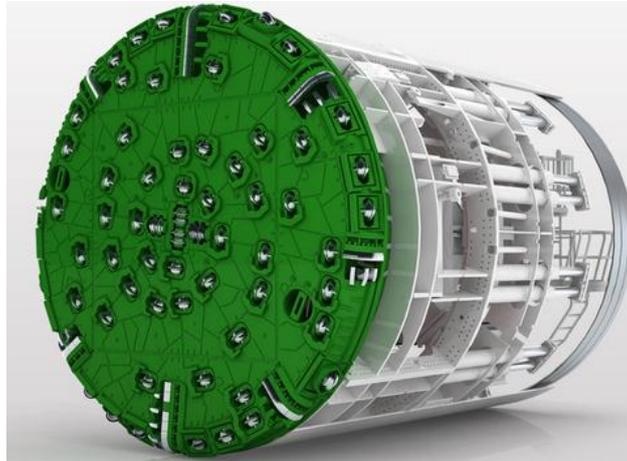


Abbildung 17: Einfachschild-TBM [17]

- Schildmaschinen mit Teilflächenabbau (siehe Abbildung 18)

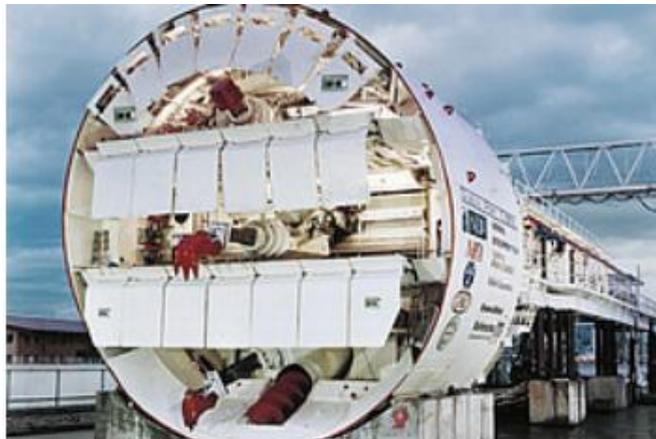


Abbildung 18: schematische Darstellung einer Teilschnittmaschine mit mechanischer Ortsbruststützung [18]

Zusätzlich zum Abbau des anstehenden Gebirges ist die Ortsbruststabilisierung ein wichtiges Charakteristikum für Schilde.

3.3.4 Arten der Ortsbruststützung [2]

Sowohl bei Schildmaschinen mit Vollschnittabbau als auch bei solchen mit Teilflächenabbau gibt es folgende Varianten der Ortsbruststützung:

3.3.4.1 Ortsbrust ohne Stützung

Bei dieser Art der Ortsbruststützung muss nachgewiesen werden, dass die Ortsbrust selbst sowie der Abbruchbereich vor der Ortsbrust bis zum Einbau des tatsächlichen Tunnelausbaus ausreichend standfest sind, siehe Abbildung 19. Hohe Gebirgsfestigkeiten, Scherfestigkeiten und weitgehend kohäsive Lockergesteine mit hohem Feinkornanteil sind eine ideale Voraussetzung für den Einsatzbereich dieses Schildmaschinentyps. Diese Art der Stützung kann nur in nicht Wasser führenden Böden eingesetzt werden.



Abbildung 19: Systemskizze – Natürliche Stützung [8], [13]

3.3.4.2 Ortsbrust mit mechanischer Stützung

Bei teilflächigem Abbau werden heutzutage Verbauplatten eingesetzt, die hydraulisch gegen die Ortsbrust gedrückt werden. Durch die partielle Freilegung der Ortsbrust können die Abbauarbeiten sicher durchgeführt werden. Eine weitere Variante ist der Brustverbau mit Bohlen innerhalb des Schildes, der nur noch in Ausnahmefällen eingesetzt wird. Der vollflächige Abbau mittels Schild bietet dem Personal eine hohe Sicherheit gegen abfallendes Gebirge, siehe Abbildung 20.

Findet der Vortrieb unterhalb des Grundwasserspiegels statt, müssen zusätzlichen Maßnahmen zur Wasserhaltung, wie z.B. Druckluft-, Flüssigkeits- od. Erddruckstützung zum Einsatz kommen.

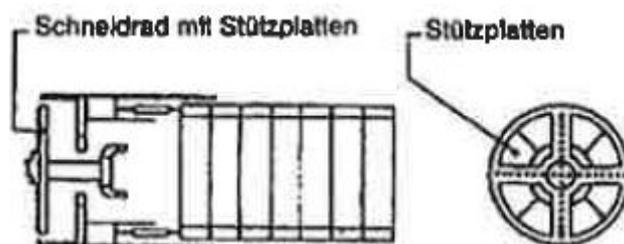


Abbildung 20: Systemskizze – Mechanische Stützung [8], [13]

Dieser Maschinentyp bringt den Vorteil mit sich, dass verschiedene Abbauwerkzeuge installiert werden können und der Wechsel nur mit geringem Arbeitsaufwand verbunden ist. Somit kann schnell auf die auftretenden, ev. wechselnden Untergrundverhältnisse reagiert werden.

3.3.4.3 Ortsbrust mit Druckluftstützung

Diese Methode wird bei Untertagebauarbeit unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzt. Sie verhindert den Eintritt von Wasser durch die Ortsbrust in den Bereich des Vortriebs. Da der Wasserdruck linear mit dem Abstand zur Wasseroberfläche steigt, kann der Luftdruck im

Tunnelinneren größer oder gleich dem Wasserdruck sein. Die Folge ist eine Überschreitung des Wasserdrucks im oberen Bereich des Tunnels, siehe Abbildung 21.

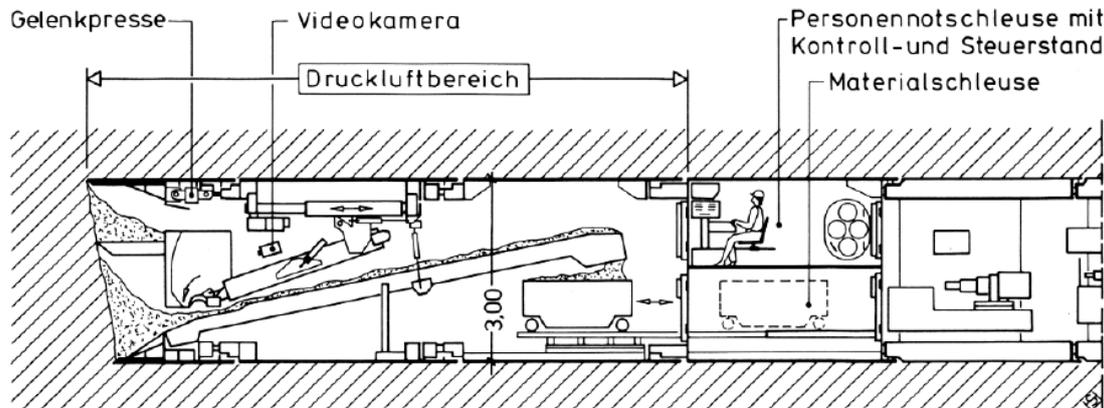


Abbildung 21: schematische Darstellung eines Druckluftschildes [19]

Somit besteht die Gefahr des sogenannten „Ausblägers“, die durch Besprühung der Ortsbrust mit Bentonitsuspension vermieden werden kann. Die Ausblätersicherheit muss durch ausreichende Überdeckung der Tunnelfirste nachgewiesen werden. Eine Kombination mit teilweiser Absenkung des Grundwasserspiegels ist ebenfalls möglich.



Abbildung 22: Systemskizze im Grundriss – Druckluftstützung [8], [13]

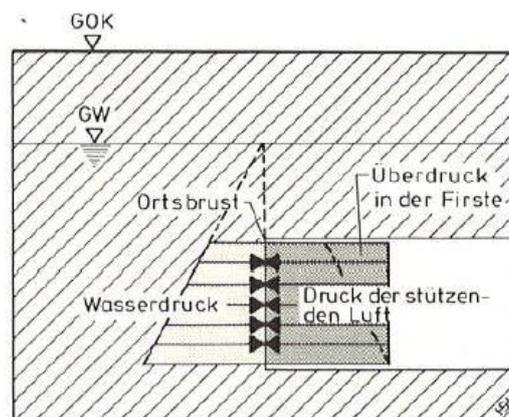


Abbildung 23: Systemskizze im Schnitt - Druckluftstützung [20]

Durch den Einsatz von Druckluft wird das Eintreten von Wasser über die Ortsbrust in den Vortrieb verhindert, siehe Abbildung 22 und Abbildung 23.

- Anpassbare Schildmaschinen mit kombinierter Verfahrenstechnik

Da es im Tunnelbau oft zu stark wechselnden Untergrundverhältnissen kommt, haben Verfahrenstechniker Schildmaschinen auf geotechnische Voraussetzung abgestimmt. Es wird wie folgt unterschieden:

- Schildmaschinen, die ohne Umbau die Verfahrenstechnik wechseln können
- Schildmaschinen, die nur mit Umbau die Verfahrenstechnik wechseln können
- Sonderformen

Auf die Sonderformen wird im Zuge dieser Diplomarbeit nicht näher eingegangen.

3.3.4.4 Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung

Bei dieser Art der Ortsbruststützung wird sowohl dem Wasserdruck als auch dem Erddruck entgegengewirkt, siehe Abbildung 25 und Abbildung 26. Als Stützmedium wird in feinkörnigen, undurchlässigen Böden Wasser und in grobkörnigen, durchlässigen Böden Bentonitsuspension eingesetzt.

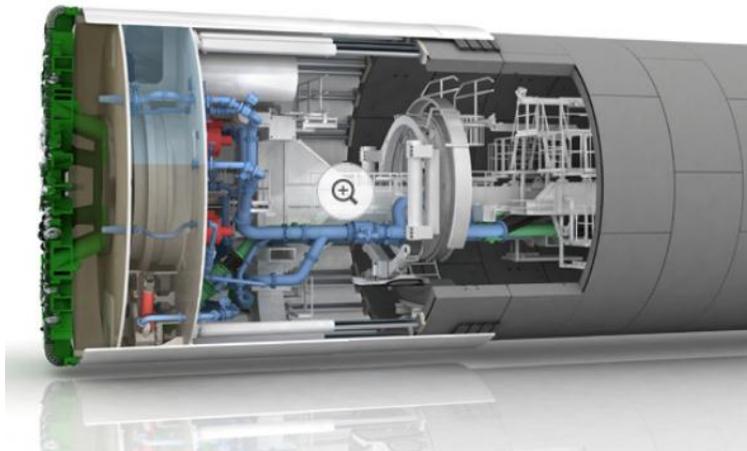


Abbildung 24: schematischer Aufbau einer Suspensions-Schildmaschine [21]

Die erste Kammer wird vollständig mit Suspension gefüllt, siehe Abbildung 24. Diese Flüssigkeit tritt an der Ortsbrust ein und tränkt den anstehenden Boden. Der anstehende Boden wird mit dem Schneidrad gelöst und mit der Suspension vermischt. Dieses Gemisch wird dann über eine Förderleitung herausgepumpt. Danach werden der Boden und die Suspension voneinander getrennt und die gereinigte Suspension wird wieder der Schildmaschine zugeführt und als Stützflüssigkeit eingesetzt. [22]

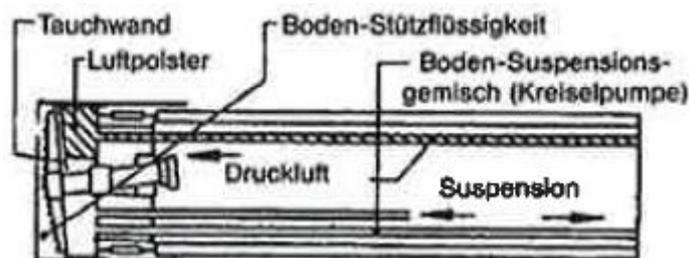


Abbildung 25: Systemskizze im Grundriss – Flüssigkeitsstützung [8], [13]

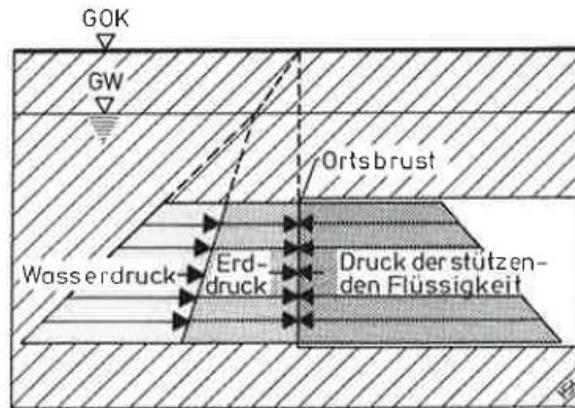


Abbildung 26: Systemskizze im Schnitt - Flüssigkeitsstützung [2]

3.3.4.5 Ortsbrust mit Erddruckstützung (nur bei Schildmaschinen mit Vollschnittabbau)

Diese Methode wird in Böden mit tonigen Bestandteilen eingesetzt. Das gelöste Material wird eventuell durch Zugabe von Konditionierungsmittel in „Erdbrei“ umgeformt und anschließend direkt als Stützmedium der Ortsbrust verwendet, siehe Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29. Ein plötzliches, schlagartiges Ausbrechen des Gebirges an der Ortsbrust ist dadurch praktisch unmöglich.

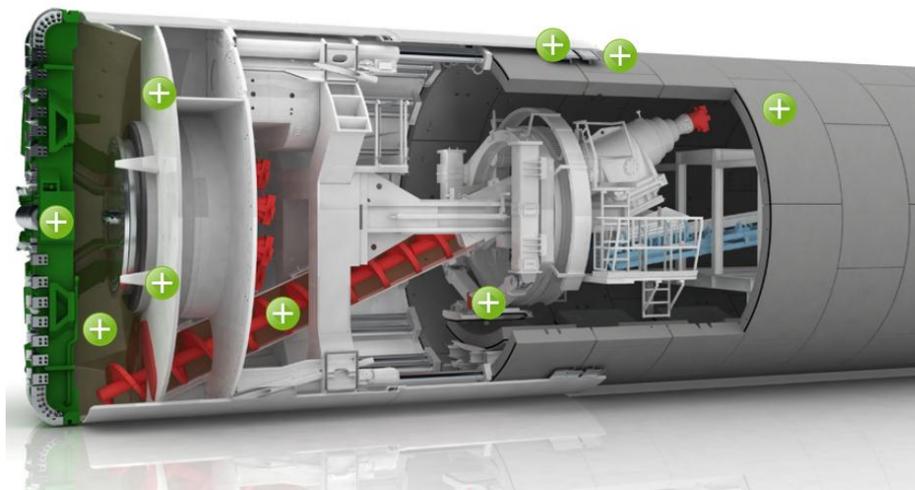


Abbildung 27: schematischer Aufbau eines EPB-Schildes [23]

Dieses Prinzip unterscheidet sich dadurch nur durch die Stützdruckkontrolle und die Förder- technik von der Flüssigkeitsstützung. Das gelöste Material gelangt durch die Förderschnecke und eine Reihe von Förderbändern nach außen, siehe Abbildung 28.

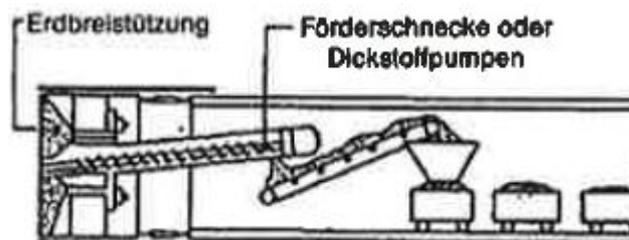


Abbildung 28: Systemskizze im Grundriss – Erddruckstützung [8], [13]

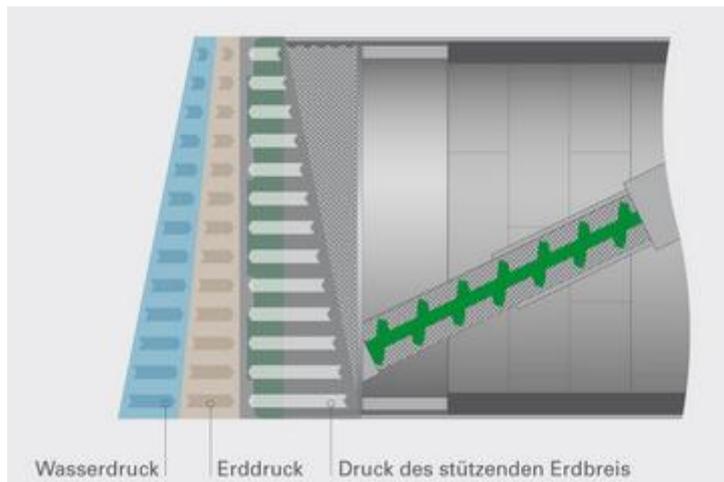


Abbildung 29: Systemskizze im Schnitt – Erddruckstützung [23]

Diese Methoden der Stabilisierung stellen einen großen Vorteil des Schildvortriebs im Vergleich zu den anderen Tunnelbauweisen dar. Hier kann bereits während des Vortriebs an jeder Stelle das Gebirge gestützt werden.

Ebenfalls erforderlich sind eine Stützung des Hohlraums im Schildbereich sowie eine Stützung des Hohlraums hinter dem Schild.

Stützung des Hohlraums im Schildbereich [14], [8]

Die Ausbruchslaibung wird bei offenen Schilden durch den Schildmantel gesichert. Beim Vortrieb entsteht ein bestimmtes Spaltmaß zwischen Tübbing und Gebirge. Dieses errechnet sich aus dem Überschneidungswinkel und der Konizität des Schildmantels.

„Gebirgsdeformationen im Ringspalt führen in Abhängigkeit von Baugrundparametern und Überdeckung zu Setzungen an der Geländeoberfläche.“ [2]

Eine aktive Stützung der Ausbruchslaibung und eine Reduzierung der Setzungen kommt v.a. bei Erddruck- und Flüssigkeitsschilden vor. Es können ebenfalls durch die Schwingungen, die aus den im Schild betriebenen Maschinen stammen, locker gelagerte kohäsionsarme Bodenschichten verdichtet werden. Dies hat zur Folge, dass eine Setzungsmulde an der Oberfläche entsteht, die durch eine aktive Stützkontrolle im Schildbereich reduziert oder sogar kompensiert werden kann.

Stützung des Hohlraums hinter dem Schild [24], [14], [8]

Nach dem vorläufigen Einsatz der vorgefertigten Tübbinge entsteht bei der Weiterfahrt des Schildes ein Ringspalt, der nach oben durch das Gebirge, nach unten durch den Tübbing und nach vorne durch die Schildschwanzdichtung begrenzt ist. Diese Art der Dichtung dichtet das hintere Ende des Schildes gegen das Eindringen des Grundwassers und des Bodens, der umlaufenden Stützflüssigkeit und des Verpressmörtels ab. Da in diesem Bereich erhebliche Drücke zu Stande kommen können, muss die Schildschwanzdichtung diesen standhalten können. Derzeit werden Kunststoffprofil- und Stahldrahtbürstendichtungen verwendet.

- Kunststoffprofildichtungen, siehe Abbildung 30

Um die Dichtheit zwischen zwei benachbarten Tübbing zu gewährleisten, sollten diese Dichtungen mit mindestens einer aufblasbaren Notdichtung ausgerüstet sein.

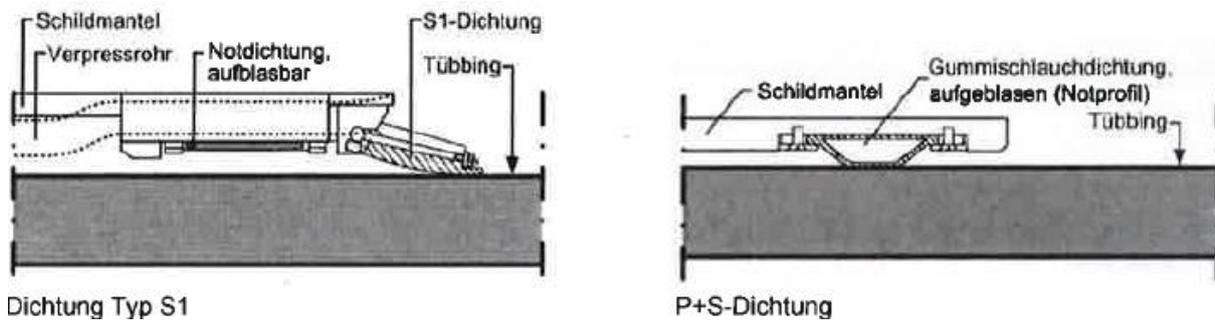


Abbildung 30: Varianten der Kunststoffprofildichtung

- Stahldrahtbürstendichtungen, siehe Abbildung 31

Der Hohlraum zwischen Tübbing und Gebirge wird mit Verpressmörtel verpresst um Setzungen hinter dem Schild zu reduzieren. Damit weder Verpressmörtel noch Boden bzw. Wasser ins Tunnelinnere gelangen, werden die Kammern, die sich zwischen den hintereinander angeordneten Bürstenringen befinden, mit Fett permanent unter Druck gehalten. Dies hat zur Folge, dass Fett an die Außenfläche der Tübbinge gelangt, das eventuell den Verbund zwischen Tübbing und Verpressmörtel an der Außenseite reduziert.

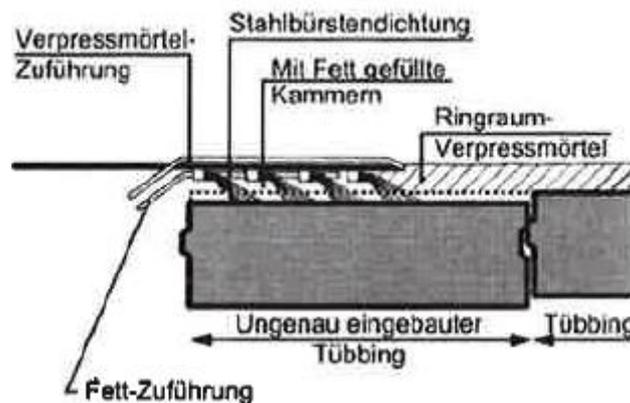


Abbildung 31: Systemskizze – Stahldrahtbürstendichtung

3.3.5 Abbauwerkzeuge

Die Abbauwerkzeuge sorgen für den produktiven Abtrag des Gesteins oder Bodens. Sie werden auf dem Bohrkopf – im Lockergestein Schneidrad genannt – verbaut. Das Lösen des Gesteins/Bodens erfolgt durch die rotierende Bewegung des Schneidrads (Bohrkopfes) an der Ortsbrust. Im Zuge dieser Arbeit werden hier nur Abbauwerkzeuge für kohäsive Böden und Lockergesteine beschrieben. [25]

3.3.5.1 Schälmesser

Schälmesser wirken nicht alleine sondern im Zusammenspiel aller am Schneidrad angeordneten Schälmesser. Sie streichen so über die gesamte Ortsbrustfläche und lösen somit den Boden. Einige Beispiele für Schälmesserformen finden sich in den unten angeordneten Abbildungen, siehe Abbildung 32 bis Abbildung 35. [2]



Abbildung 32: schmales Schälmesser mit eingelassenem Halter im Schneidrad [2]



Abbildung 33: schmale Schälmesser mit unterschiedlichem Freiwinkel und Rückenschutz in aufgesetzten Haltern [2]

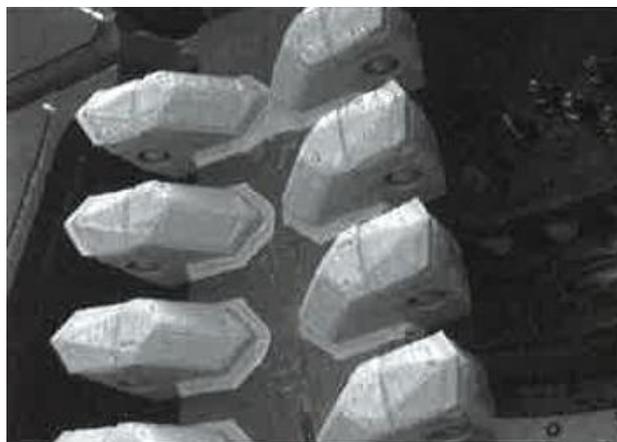


Abbildung 34: schmale Schälmesser in aufgesetzten Haltern [2]



Abbildung 35: breites Schälmesser mit HM-Streifen als Rückenstutz in aufgesetztem Halter [2]

Ursprünglich wurden Schälmesser für den Einsatz in tonigen Böden entwickelt, jedoch werden sie heutzutage sehr oft auch in Lockergesteinen eingesetzt.

3.3.5.2 Stacheln

Stacheln sind senkrecht zur Ortsbrust eingebaute, stumpfe Werkzeuge, die aus Rund- oder Vierkantmaterial bestehen, siehe Abbildung 36.

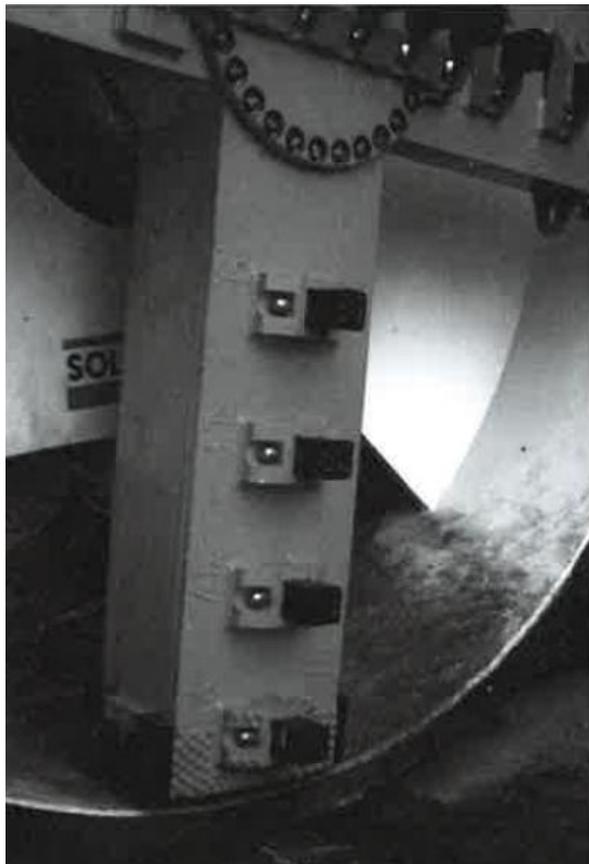


Abbildung 36: Vierkantstichel (80x80mm), Mixschild [2]

In Schluff-, Sand- und Kiesböden zerstören Stachel das Gefüge des Bodens, wohingegen in kohäsiven Böden der Abbau durch Kneten erfolgt. Stachel sind durch die Stellung normal zur

Ortsbrust drehrichtungsunabhängig, d.h. es ist in jede Drehrichtung die gleiche Abbauleistung erreichbar.

3.3.5.3 Schneidkanten

Sie bestehen aus durchgehenden, geschärften, etwas vorstehenden Plattenrändern. Schneidkanten kommen idealerweise in Böden mit homogenen, plastischen Eigenschaften oder in rolligen, locker gelagerten Böden aus Sanden und Kiesen zum Einsatz, siehe Abbildung 37.

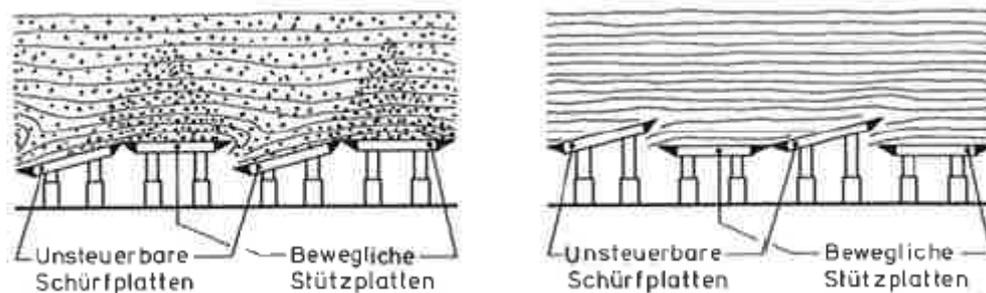


Abbildung 37: Einsatzschema von Stützplatten mit Schneidkanten (links: Einsatz im rolligen Boden; recht: Einsatz im standfesten Boden) [2]

Zum Abtransport des abgebauten Bodens nach Übertage sind spezielle Fördersysteme erforderlich. Die Art des Fördersystems richtet sich nach der Art des Gebirges und der daraus resultierenden Ortsbruststabilisierungsart, da dies zur Konsistenz des abzutragenden Materials beiträgt.

3.3.6 Arten der Fördersysteme [14]

Das Fördersystem hängt von der maximalen Leistung der Vortriebsgeschwindigkeit der Schildvortriebsmaschine ab. Bei Schildmaschinen gibt es drei unterschiedliche Abbaumaterialförderabschnitte. Der erste Abschnitt ist die Förderung aus der Abbaukammer, die sich in der Maschine befindet, zum Nachläufer. Im zweiten Abschnitt wird das abgetragene Material durch eine horizontale Förderung, die sich im Nachläuferbereich befindet, weitergeleitet. Da erfolgt die Übergabe des Abbaumaterials an die Streckentransporteinrichtung und diese liefert das Material zur Startbaugrube, die sich im bereits fertiggestellten Tunnel befindet. Als dritter Abschnitt zählt die vertikale Förderung aus der Startbaugrube zur Verlade- oder Zwischenlagerstätte über Tage unter Verwendung von Elevatorenbändern/Taschenförderbändern bei Trocken- oder Dickstoffen, bei der Flüssigkeitsförderung wird eine Rohrleitung verwendet, die zur Separationsanlage führt.

3.3.6.1 Trocken- und Dickstoffförderung

Hierbei wird das zu fördernde Material auf ein Übergabeband des Nachläufers gegeben. Diese Förderungsart erfolgt entweder diskontinuierlich mittels Schutterzügen bzw. Dumpfern oder kontinuierlich mittels Streckenförderbandes während der Vortriebs- und Verpressphase.

3.3.6.2 Flüssigkeitsförderung

Bei dieser Förderungsart wird das abgebaute Material kontinuierlich in ein System gefördert. In diesem System wird die Flüssigkeit durch eine Separationsanlage im Kreislauf geführt, das Abbruchmaterial wird ausgeschieden und deponiert.

3.3.7 Tunnelausbau [2]

Die endgültige Tunnelauskleidung hat zur Aufgabe die Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit für die gesamte Nutzungszeit des Tunnels zu erfüllen. Sie schützt vor eindringendem oder austretendem Wasser, schützt den Tunnelhohlraum vor einfallendem Gebirge und leitet alle Lasten (Druck der Vortriebspresen, Innenlasten, Verkehrslasten) weiter.

Für die Dimensionierung der Auskleidung sind alle statischen Einwirkungen, in erster Linie der Gebirgs- und Wasserdruck, notwendig. Durch die vom System vorgegebene kreisrunde Form ergibt sich in der Tunnelschale neben der Druckbelastung auch eine Biegebeanspruchung in Querrichtung, die eine erforderliche Bewehrung zur Folge hat. Laut Herstellern beträgt der durchschnittliche Bewehrungsgehalt von Tübbing 90 bis 110kg/m³. [26]

Maulprofile sind ebenfalls möglich, aber sie werden nicht oft im Schildvortrieb ausgeführt.

Die Tunnelauskleidung kann einschalig, zweischalig oder mehrschalig ausgeführt werden. In dieser Diplomarbeit wird durch die gegebenen Randbedingungen nur die einschalige Konstruktionsweise betrachtet.

Einschalige Konstruktionen werden in zwei Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe ist die echte einschalige Bauweise, die z.B. aus einer einschaligen Tübbingauskleidung oder einer Betonschale aus Extrudierbeton besteht oder ein Tunnel, der sich im standfesten Gebirge befindet und aus statischer Sicht keinerlei zusätzliche Sicherung benötigt. Die zweite Gruppe ist eine Verbundkonstruktion, die aus einer Spritzbetonschicht zur sofortigen Vortriebsicherung und einer nachträglich erstellten Ortbetonschale zur Erfüllung der Tunnelsicherung besteht.

In Abbildung 38 ist das Konstruktionsprinzip wasserdichter und dränierter Tunnel mit Tübbingauskleidung ersichtlich.

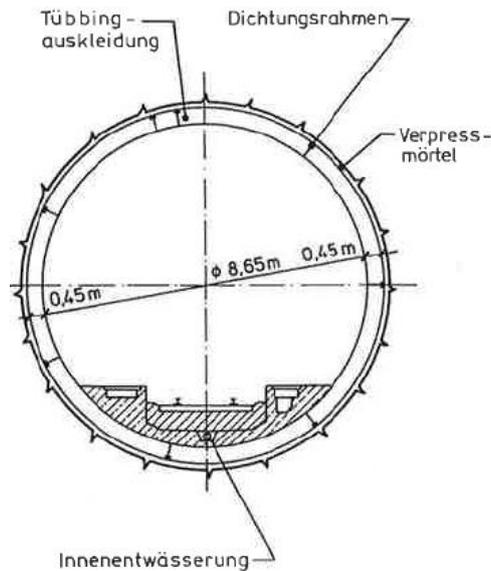


Abbildung 38: Botlektunnel, Innendurchmesser 8,65m, einschalig, Druckwasser haltend [2]

Ausführungsformen von Tübbingringen

Tübbinge werden in einem Fertigteilwerk oder, falls es die Größe des Projektes erfordert, in extra in der Nähe des zu errichtenden Tunnels gebauten Werken hergestellt. Tübbinge werden zu einem Ring zusammengebaut und dienen als Tunnelauskleidung.

Sollte die Gebirgsfestigkeit des umgebenden Gebirges zu gering sein um die aus dem TBM-Vortrieb entstandenen Vortriebskräfte aufnehmen zu können, dient der erstellte Tübbingring als Widerlager. Dafür ist eine sofortige Tragfähigkeit erforderlich, die nur von Tübbingringen als Fertigteile gewährleistet werden kann.

Tübbinge werden mit Hilfe des Erektors zu einem Ring montiert. Der Ringspalt, der sich zwischen Tübbingring und Ausbruchslaibung befindet, wird mit geeigneten Mitteln verfüllt oder verpresst. Dadurch entsteht eine direkte Verbindung zwischen Tübbingring und Gebirge, was eine kontinuierliche Ableitung der Kräfte zur Folge hat.

Tübbinge aus Beton haben aus Kostengründen die Tunnelauskleidungen aus Stahl und Gusseisen weitgehend verdrängt.

Die Tübbingstärke ergibt sich aus den auftretenden Kräften zur Abtragung der Presse. In der Regel sind Dicken zwischen 20 bis 50cm erforderlich. Mit größer werdendem Querschnitt steigt auch die Dicke der Tübbinge an.

- Blocktübbinge mit rechteckigem Grundriss

Diese Konstruktionsvariante wird am häufigsten angewendet. Ein Tübbingring besteht hierbei aus fünf bis acht Einzeltübbingungen und einem Schlussstein, der erst zum Schluss eingesetzt wird. Jeder Tübbingring ist in sich stabil. Die erforderlichen Arbeitsschritte für die Erstellung eines Tübbingrings sind in Abbildung 39 ersichtlich.

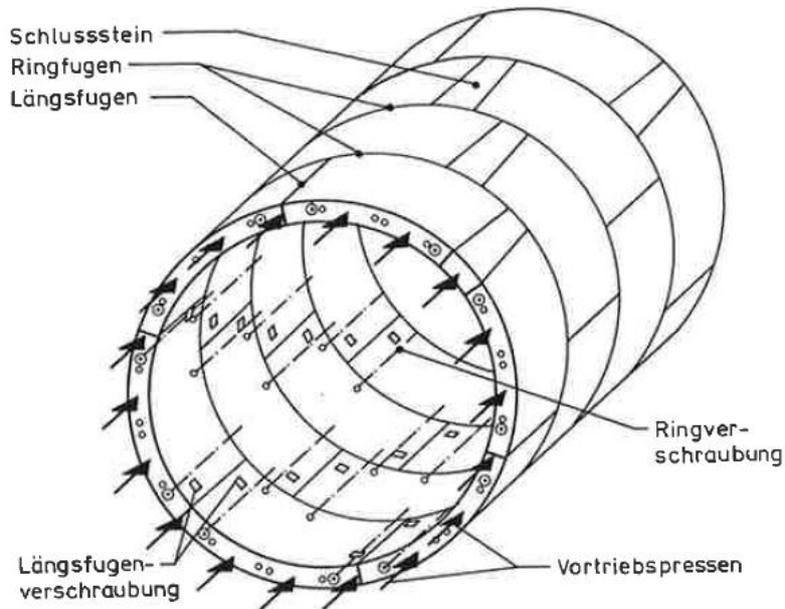
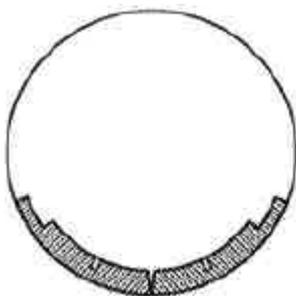


Abbildung 39: Ringbau bei der fünfteiligen Tübbingauskleidung mit unten liegendem Schlusstein [2]

Für einschalige, wasserdicht hergestellte Tunnel hat sich diese Ausführungsvariante durchgesetzt. Durch das Einsetzen von umlaufenden Dichtprofilbändern in der dafür vorgesehenen Nut ist die erforderliche Dichtigkeit erfüllt.

- Hexagonaltübbing (siehe Abbildung 40)

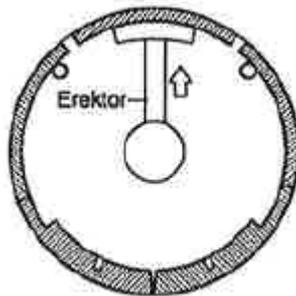
Seit 1961 ist die Konstruktionsvariante, entweder als Außenschale bei zweischaliger Tunnelausführung oder auch bei einschaliger Tunnelauskleidung insbesondere für Wasserstollen unter dem Einsatz von Doppelschild-TBM, im Einsatz.



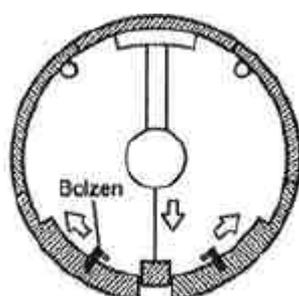
Zurückziehen des Pressendruckringes und Setzen der Sohltübbinge



Setzen des linken und rechten Ulmentübbings



Setzen des Firsttübbings



Spreizen der Sohltübbinge und Setzen des Schlussteins



Vorschieben des Pressen-
druckringes und Verblasen des
Ringspaltes mit Einkornkies

Abbildung 40: Schematischer Aufbau einer Röhre mit Hexagonaltübbingen [2]

Auf diese Ausführungsvariante wird im Zuge dieser Diplomarbeit nicht näher eingegangen.

Weitere Ausführungsmöglichkeiten sind:

- Rhomboide und trapezoide Tübbingsysteme
- Spreitzübbinge

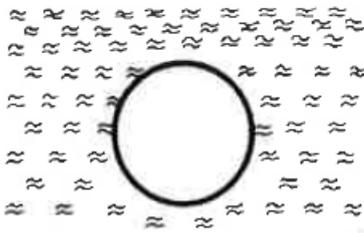
Näheres dazu siehe [2].

3.4 Wasserhaltungsmaßnahmen für NÖT und Schildvortrieb

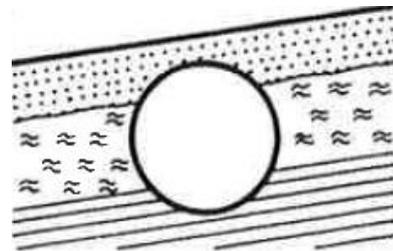
Die Wasserhaltung ist ein wesentlicher Teil der Vorbereitungen für den Vortrieb. Je nach den vorherrschenden Randbedingungen kann die Wasserhaltung entweder vor dem Vortrieb oder im Zuge des Vortriebs erfolgen. Abhängig vom Vorhandensein von Wasser werden Bauausführung und Betrieb von unterirdischen Anlagen beeinflusst. Wassereinbrüche sind zu vermeiden um einen sicheren Vortrieb zu gewährleisten. Daher ist eine der wichtigsten Aufgaben bei der Herstellung von unterirdischen Hohlräumbauten eine effektive Wasserhaltung. Dieses Wasserhaltungssystem muss solange intakt sein, bis der Gebrauchszustand im Bauwerkinneren erreicht ist. [8]

Es wird zwischen folgenden Wasserführungsarten im Gebirge unterschieden: [13]

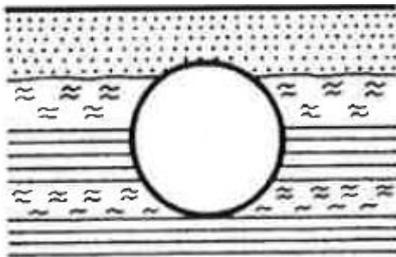
- Grundwasser



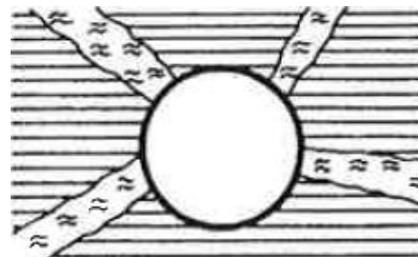
- Hangwasser



- Schichtenwasser



- Kluftwasser



Es gibt vier Arten der Wasserhaltung:

- Wasserableitung
- Wasserverdrängung/ Vortrieb unter Druckluft
- Wasserabsenkung
- Wasserabspernung

3.4.1 Wasserableitung [13]

Durch diese Art der Wasserhaltung soll das austretende Wasser bereits an der Tunnelaibung gefasst und möglichst ungestört durch geeignete Methoden (z.B. Baudrainage) abgeleitet werden ohne den Vortrieb negativ zu beeinflussen. Bei steigendem Vortrieb wird das Wasser durch das natürliche Gefälle abgeleitet werden, bei fallendem Vortrieb muss es in geeigneten Wasserfassungen gefasst (z.B. Pumpensumpf) und nach außen gepumpt werden. Es gibt drei Arten von Wasserfassungen:

3.4.1.1 Punktförmige Wasserfassungen

Bei dieser Variante der Wasserfassung wird ein Kunststoffschlauch in die Kluft oder in das Bohrloch, aus dem das Wasser austritt, eingebracht und mit Zementmörtel mit schnellbindendem Zusatzmittel abgedichtet.

3.4.1.2 Linienförmige Wasserfassungen

Dieses Verfahren wird angewandt, wenn mehrere Wasseraustrittsstellen vorhanden sind. Das Wasser wird gefasst und in Drainagen eingeleitet. Es gibt folgende Varianten der linienförmigen Wasserfassungen:

- Oberhasli-Verfahren (veraltet)
- Halbschalendrainagierung
- Filterstreifen
- Filterschläuche

Im Zuge dieser Diplomarbeit wird auf diese Arten von Wasserfassungen nicht näher eingegangen.

3.4.1.3 Flächenhafte Wasserfassungen

Diese sind notwendig, wenn der Wasserzutritt nicht mehr mit einer linienförmigen oder punktförmigen Wasserfassung fassbar ist. Flächenhafte Wasserfassungen bestehen meist aus Kunststoff (z.B. Noppenmatten siehe Abbildung 41). Aufgabe dieser Kunststoffmatten ist es die Wasseraustrittsstelle wasserdicht abzuschließen, einen freien Abfluss des Wassers zu gewährleisten und einen tragfähigen Untergrund für den Spritzbeton zu schaffen.

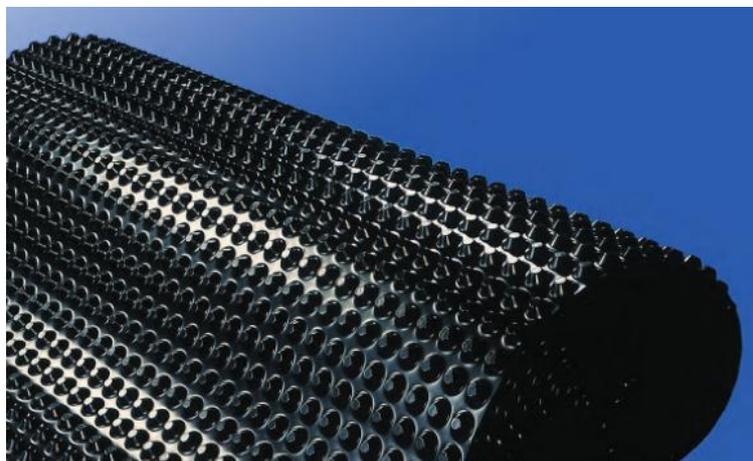


Abbildung 41: PM-S 20 mit 20 mm hohen Noppen – leistungsstark gegen Druck und Wasser [27]

3.4.2 Wasserverdrängung [13]

Die Wasserverdrängung wird v.a. im U-Bahnbau im Lockergestein eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird mittels Druckluft ein Überdruck im Arbeitsbereich geschaffen, der mindestens gleich groß sein muss wie der Wasserdruck an der Tunnelsohle um das Eindringen des

Wassers zu verhindern. Eine Stahl- oder Stahlbetondruckwand bildet den räumlichen Abschluss zwischen Überdruckbereich und dem restlichen Tunnelhohlraum.

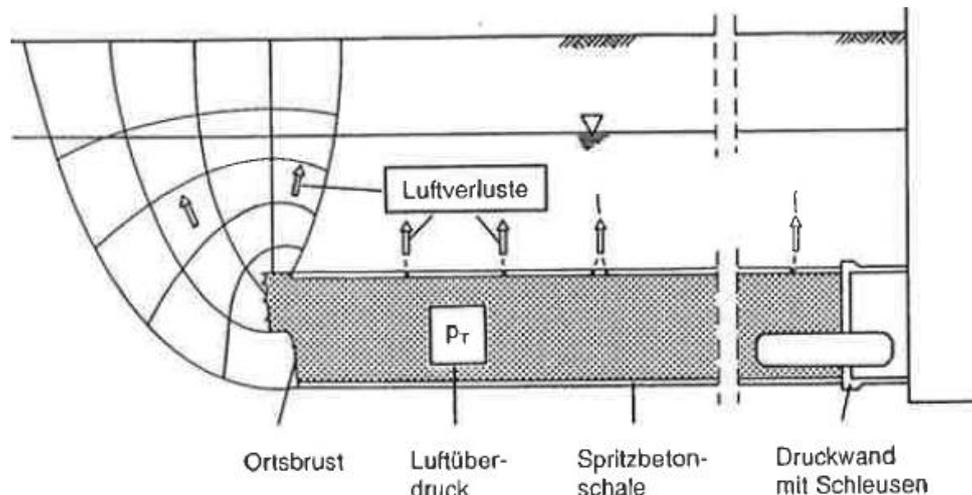


Abbildung 42: Wasserverdrängung/ Druckluftvortrieb [13]

Der in Abbildung 42 grau schraffierte Bereich (~ 30m Tunnel) wird mit Hilfe von konventionellen Wasserhaltungsmaßnahmen geschaffen, der Platz für die Drucklufteinrichtungen sowie hinter der Druckwand Platz für Abbau- und Ladegeräte bietet.

Anwendungsbereich und Vorteile von Druckluftvortrieben: [13]

- 1.) „Bodenarten, bei denen eine Grundwasserabsenkung technisch nicht möglich oder nicht wirtschaftlich ist.“
- 2.) „geringere Setzungen im Vergleich zur Absenkung,“
- 3.) „Stabilisierung der Ortsbrust,“
- 4.) „Unterfahrung von Gewässern,“
- 5.) „Anpassung an unterschiedliche Wasserstände durch Veränderung des Überdruckes rasch möglich,“
- 6.) „keine Arbeiten von der Oberfläche erforderlich.“

Die effektive Arbeitszeit der Mannschaft ist durch die gesetzlich vorgeschriebenen Ausschleuszeiten stark verkürzt. Weitere Merkmale dieser Vortriebsart sind in Abschnitt 3.3.4.3 nachzulesen.

3.4.3 Wasserabsenkung [13]

Diese Art der Wasserhaltung wird vor dem Beginn des Vortriebs und bei seicht liegenden Tunnels im Lockergestein durchgeführt und wird als geschlossene Wasserhaltung bezeichnet. Dabei wird der Grundwasserspiegel bis unter die Tunnelsohle abgesenkt und so lange gehalten, bis der Endzustand erreicht ist, siehe Abbildung 43.

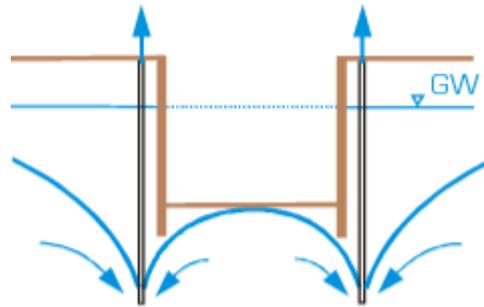


Abbildung 43: Prinzip der Wasserabsenkung mit Brunnen [28]

Danach wird der Grundwasserspiegel wieder auf seine ursprüngliche Lage zurückgesetzt. Das Absenken des Grundwasserspiegels kann je nach Wasserdurchlässigkeit durch Gravitations-, Vakuumbrunnen oder Elektrosmose erfolgen. [13]

3.4.3.1 Gravitationsbrunnen [28], [13]

Aufgrund der Schwerkraft gelangt das Wasser in den Brunnen, von dem aus es dann mit einer Pumpe abgesaugt wird. Gravitationsbrunnen werden bei Böden mit Durchlässigkeiten von 10^{-3} bis 10^{-6} m/s angewendet.

3.4.3.2 Vakuumbrunnen [28], [13]

Vakuumbrunnen werden in gering durchlässigen Böden (10^{-4} bis 10^{-7} m/s) eingesetzt und es werden Tiefen von ca. 5-7m erreicht. Durch die geringe Durchlässigkeit des Bodens kann das Wasser nicht mehr nur durch die Schwerkraft dem Brunnen zufließen. Deshalb wird ein Unterdruck im Brunnen erzeugt, der das Wasser dem Boden entzieht, siehe Abbildung 44.

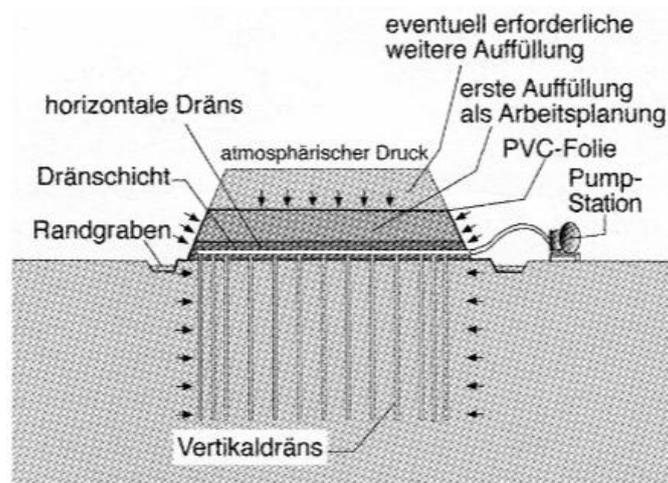


Abbildung 44: Systemskizze einer Vakuumentwässerung [28], [29]

3.4.3.3 Elektrosmose [28], [13]

Das Einsatzgebiet dieses Verfahrens sind sehr tonige Böden (Durchlässigkeit $\leq 10^{-8}$ m/s) und wenn weder Vakuumbrunnen noch Gravitationsbrunnen angewendet werden können. In diesen Böden herrschen elektrostatische Bindungskräfte, die die Wassermoleküle an die Oberfläche der Bodenteilchen binden. Bei der Elektrosmose werden zwei Stahlkörper, zwischen denen eine Gleichspannung herrscht, in den Boden eingebracht. Durch die Gleich-

spannung bewegen sich die freien, ungebundenen Wasserteilchen des Bodens von der Kathode zur Anode, die als Filterbrunnen ausgebildet ist. Mittels einer Pumpe kann der Grundwasserspiegel auf das gewünscht Niveau gebracht werden. (siehe Abbildung 45)

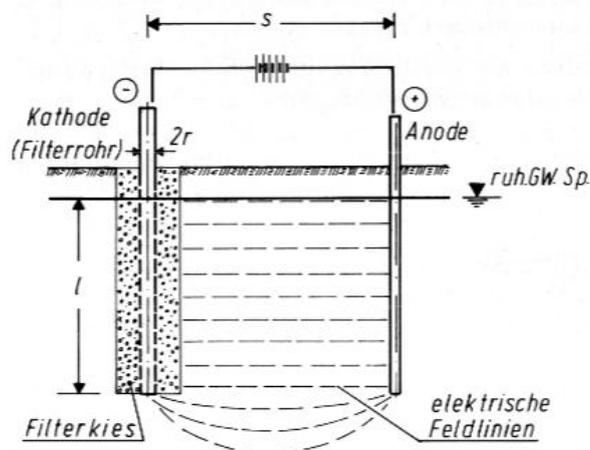


Abbildung 45: Systemskizze einer Elektroosmose [28], [29]

3.4.4 Wasserabspernung [13]

Die Wasserabspernung kann entweder von der Oberfläche aus durch Schlitz-, Schmal-, Spund- oder Bohrfahlwände (v.a. bei offenem Tunnelbau) erfolgen, indem man diese in eine grundwasserstauende Schichte (siehe Abbildung 46 grau schraffierter Bereich) einbaut. Diese Variante wird v.a. im offenen Tunnelbau eingesetzt. Weitere mögliche Ausführungen sowohl von der Oberfläche aus als auch im Zuge des Vortriebs sind Vereisung, Injektionen oder DSV(Düsenstrahlverfahren)-Säulen.

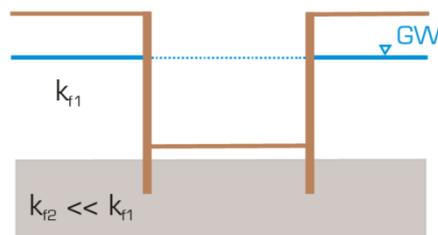


Abbildung 46: Prinzip einer Wasserabspernung

3.4.4.1 Vereisung [13] (siehe Abbildung 47)

Die Vereisung zählt zu den temporären Bodenverbesserungsmaßnahmen, die für die Abdichtung gegen eindringendes Grundwasser sorgt und ein tragfähiges Gewölbe aus gefrorenem Boden herstellt. Für dieses Verfahren muss ein ausreichender Wassergehalt des Bodens (>5 bis 7%) und eine geringe Fließgeschwindigkeit des Grundwassers (1-3m/d) vorhanden sein. Dem Boden wird solange durch ein Kältemittel, das in Stahlrohren zirkuliert, Wärme entzogen bis das Wasser, das sich in den Poren befindetet, gefroren ist. Dies wird mit Temperaturfühlern überwacht. Es wird zwischen dem Soleverfahren und dem Stickstoffverfahren unterschieden. Näheres dazu siehe [13].



Abbildung 47: Beispiel einer Bodenvereisung im Tunnelbau [28]

3.4.4.2 Injektionen [13]

Das Injektionsverfahren eignet sich besonders gut bei hohen Kluftwasserdrücken mit geringem Kluftvolumen. Bei diesem Verfahren wird Verpressgut in die Hohlräume des Bodens injiziert. Das Gebirge erreicht dadurch eine höhere Standfestigkeit und eine geringere Durchlässigkeit. Die Injizierbarkeit des Bodens ist die wichtigste Voraussetzung. Injektionen erfolgen dem Vortrieb vorausgehend und es entsteht ein Injektionskörper in Form eines geschlossenen Ringes, wobei der umgebende Baugrund zur Lastabtragung herangezogen wird.

3.4.4.3 DSV-Säulen [13], [28]

Beim Düsenstrahlverfahren (siehe Abbildung 48) wird der Boden entweder mit Wasser oder mit Suspension während des Ziehens (und Drehens) „aufgeschnitten“ und vermischt. Dadurch entsteht ein verfestigter Körper im Untergrund. DSV-Säulen können sowohl vor dem Vortrieb als auch während des Vortriebs hergestellt werden. Zur Ausführung kommen das Ein-, Zwei- oder Dreiphasensystem. Näheres dazu siehe [28].

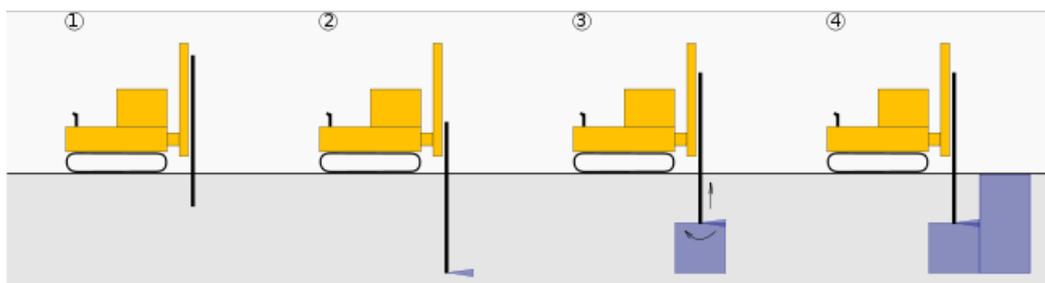


Abbildung 48: Systemskizze des Düsenstrahlverfahrens (allgemein) [30]

4 Systemdefinition

4.1 Ziel

Ziel ist es die wichtigsten Prozesse im Tunnelbau bezüglich der zwei zu vergleichenden Methoden hervorzuheben und den erforderlichen Ressourcenbedarf zu ermitteln. Dafür ist eine Systemdefinition mit den dazugehörigen Systemgrenzen erforderlich.

Das System ist ein ein Meter langer Tunnelabschnitt für die zukünftige U-Bahn-Linie U5 erbaut mit den beiden Varianten: Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) bzw. Schildvortrieb.

4.2 Systemgrenzen NÖT

Die Abbildung 49 beschreibt die Stoffflussanalyse für die Neue Österreichische Tunnelbaumethode. Die Berechnung der Importstoffmengen erfolgt aufgrund von Zuhilfenahme von Webseiten sowie der ÖN B 4710-1 und wird in den Abschnitten 5.2, 5.3 und 5.5 näher erklärt.

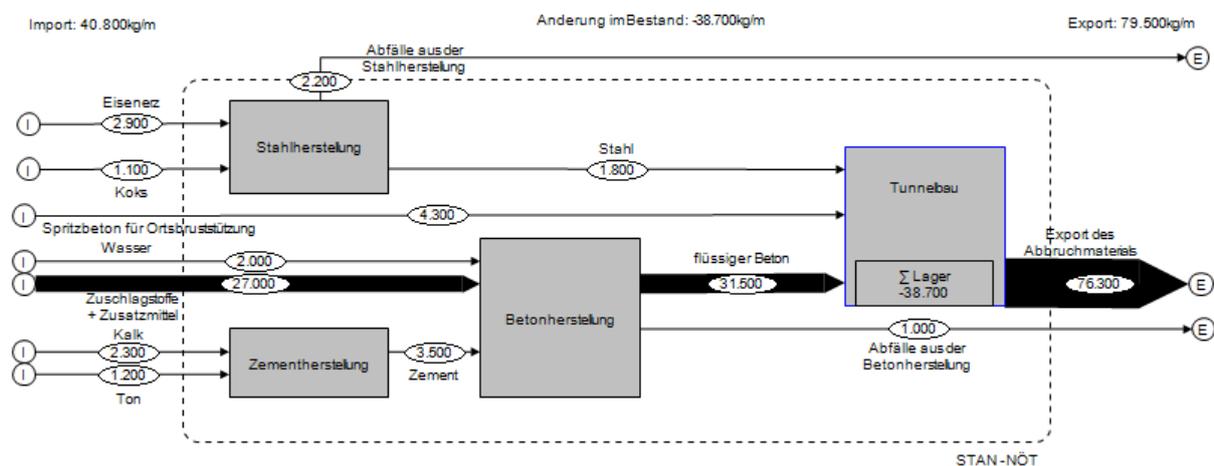


Abbildung 49: Stoffflussanalyse für NÖT

Die Prozesse, die betrachtet werden, liegen innerhalb der Systemgrenze. Systeme wie Antransport von Baumaterial o.Ä. haben einen zu geringen Einfluss auf die Stoffflussanalyse und bleiben deshalb in diesen Berechnungen unberücksichtigt.

Die Mengen der betrachteten Stoffflüsse, die in den bzw. aus dem jeweiligen Prozess fließen, wurden in den Punkten 5.1, 5.2.1 und 5.4 berechnet.

Der Prozess „Tunnelbau“ wurde mit einem Subsystem ausgestattet, das in Abbildung 50 dargestellt wird.

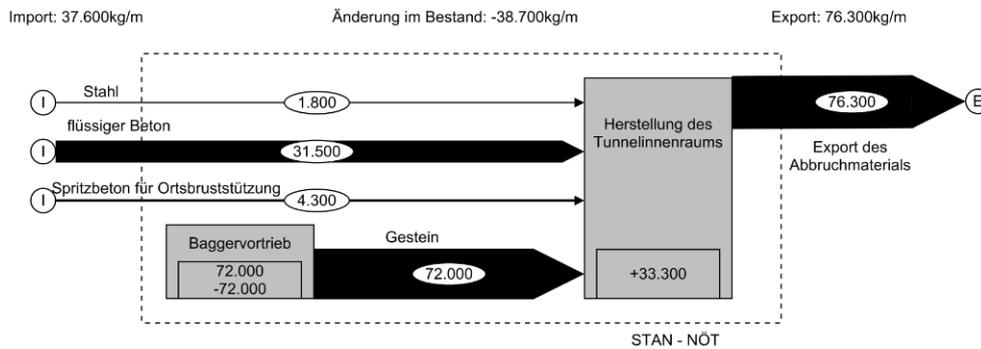


Abbildung 50: Subsystem der STAN für Nöt

In diesem Subsystem sind die Lager sowie die Stoffflüsse des Prozesses „Tunnelbau“ genau erkennbar.

Durch den Bau des Tunnels wird ein Lager erstellt, welches in der Stoffflussanalyse (STAN) als „Herstellen des Tunnelinnenraums“ bezeichnet wird. Der Untergrund, in dem der Tunnel gebaut werden soll, wird mittels Baggervortrieb abgebrochen, wodurch das Lager, welches im STAN-Diagramm als „Baggervortrieb“ bezeichnet wird, abgebaut wird. Durch das Erstellen eines Lagers und den Abbau eines anderen entsteht eine Lageränderung im System.

Die Exporte im betrachteten System setzen sich aus den Abfällen aus der Stahlherstellung sowie Betonherstellung und dem Export des Abbruchmaterials.

4.3 Systemgrenzen Schildvortrieb (eingleisig)

Die Stoffflussanalyse für den eingleisigen Schildvortrieb zeigt Abbildung 51. Die Importe wurden wie in Absatz 4.2 ermittelt und werden ebenfalls in den Abschnitten 5.2, 5.3 und 5.5 beschrieben.

Die Dicke der Ortsbruststützung aus Bentonit wird mit 5cm angenommen. Mit der Dichte von Bentonit, die laut [31] 2.600kg/m^3 beträgt, wird die benötigte Bentonitmenge pro Meter Tunnel berechnet.

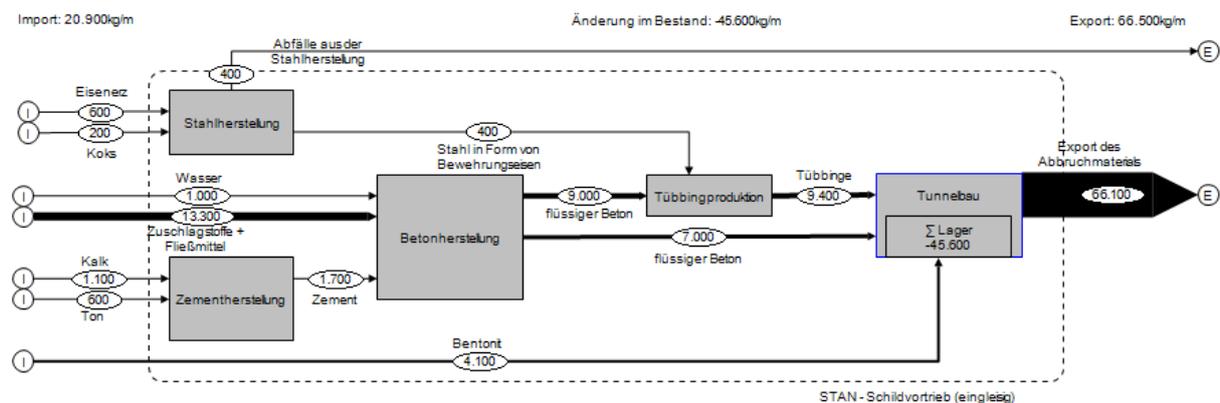


Abbildung 51: Stoffflussanalyse für eingleisigen Schildvortrieb

Aufgrund der unterschiedlichen Querschnittsformen der beiden Tunnelbaumethoden und der Betonherstellungsverfahren entsteht ein Unterschied bei den erforderlichen Betonmen-

gen. Durch die Möglichkeit der Herstellung der Tübbinge im Fertigteilwerk entstehen beim Schildvortrieb vernachlässigbar kleine Betonabfälle.

Ebenso wie in 4.2 wurde auch für den eingleisigen Schildvortrieb bei der Erstellung der Stoffflussanalyse ein Subsystem erstellt, welches in Abbildung 52 gezeigt wird.

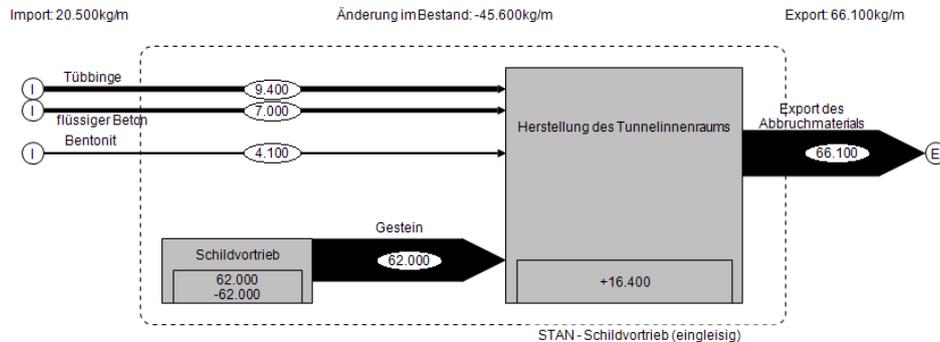


Abbildung 52: Subsystem der STAN für eingleisigen Schildvortrieb

Wie bereits in 4.2 beschrieben werden hier die Lager sowie die Stoffflüsse für den Prozess „Tunnelbau“ näher erläutert.

4.4 Systemgrenzen Schildvortrieb (zweigleisig)

Die Stoffflussanalyse in Abbildung 53 beschreibt alle Importe und Exporte, sowie die gesamten Stoffflüsse, die vorhandenen Prozesse und deren Lager des zweigleisigen Schildvortriebs.

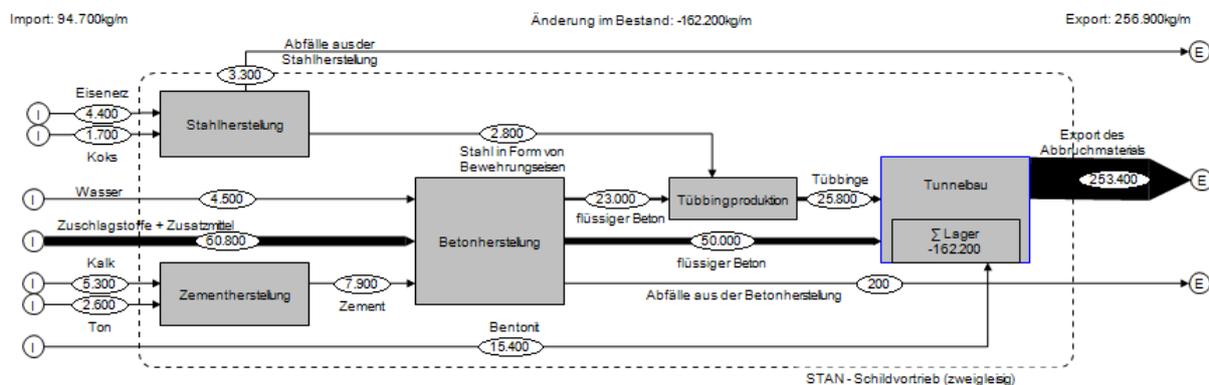


Abbildung 53: Stoffflussanalyse für zweigleisigen Schildvortrieb

Die Berechnungen, die für die in Abbildung 53 dargestellte Stoffflussanalyse erforderlich waren, sind in den Abschnitten 5.2, 5.3 und 5.5 zu finden. Genauso wie für die vorherigen zwei Ausführungsvarianten gibt es für den zweigleisigen Schildvortrieb ein Subsystem, welches die Prozesse und Lager des Tunnelbaus darstellt. Das Subsystem für den zweigleisigen Schildvortrieb ist in Abbildung 54 dargestellt.

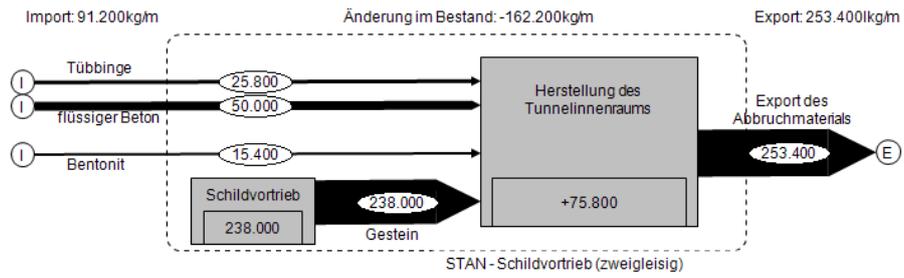


Abbildung 54:Subsystem der STAN für zweigleisigen Schildvortrieb

Der Vergleich dieser Ausführungsarten wird anhand von Diagrammen in Abschnitt 7.1 gezeigt.

5 Datengrundlage und Ressourcenbedarf

Aufgrund der in Punkt 2.1 definierten Fragestellung dieser Diplomarbeit sollen zwei Tunnelbaumethoden für die U-Bahn U5 hinsichtlich ihres Ressourcenverbrauches verglichen werden. Die zwei zu untersuchenden Baumethoden sind die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) und der Schildvortrieb. Die Beschreibungen der Funktionsprinzipien der beiden Methoden sind in Punkt 3.1 und 3.3 zu finden.

Des Weiteren soll der Ressourceneinsatz je Meter Tunnel ermittelt werden. Es sollen folgende Parameter verglichen werden:

- Beton (Spritzbeton, bewehrter Beton der Innenschale, Tübbingbeton)
- Stahl
- Energie

5.1 Ermittlung der Betonmengen

5.1.1 Betonmengen für NÖT (eingleisig)

Der Tunnelbau nach dieser Methode wird durch den Baggervortrieb durchgeführt. Auf erforderliche, zusätzliche Sicherungsmaßnahmen wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Eine Auflistung der möglichen Maßnahmen ist in Absatz 3.2.7 und 3.2.8. zu finden.

Der betrachtete Tunnel hat einen Innendurchmesser von 5,45m. Die Tragstruktur wird in einschaliger Bauweise ausgeführt. Hierbei befindet sich eine Spritzbetonschale an der Außenseite angrenzend an den anstehenden Untergrund und eine bewehrte Ortbetoninnenschale im Tunnelhohlraum.

Bei der Ermittlung der Betonmengen für die NÖT wurde von einer zweiröhrigen, eingleisigen Tunnelausführungsvariante ausgegangen. Der in Abbildung 55 dargestellte Regelquerschnitt ist repräsentativ für diese Baumethode [32] und wurde für die nachfolgenden Berechnungen herangezogen.

Die erforderliche Dicke der Tragkonstruktion ist abhängig von der Tiefe des geplanten Tunnels, den vorhandenen Boden- und Grundwasserverhältnissen, sowie von der örtlichen Bebauung. Wie in der Einleitung erwähnt, befindet sich der geplante U-Bahntunnel im Wiener Tegel im innerstädtischen Bereich (Wien).

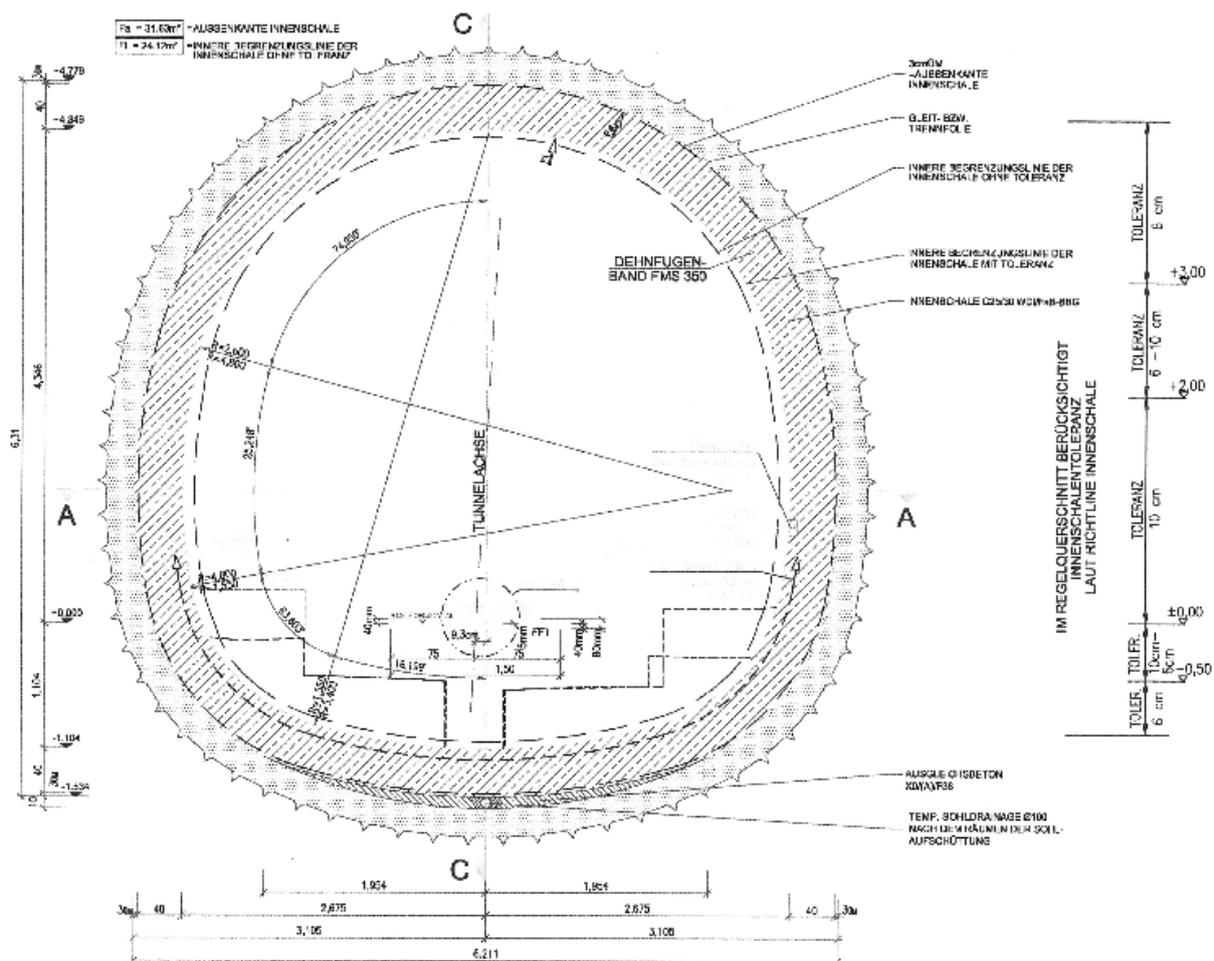


Abbildung 55: Querschnitt für eine eingleisige Streckenröhre; Darstellung der tragenden Außenschale [32]

Laut Wiener Linien besitzt der tragende Außenring des U-Bahntunnels eine Dicke von 40cm. Die gewählte einschalige Tunnelausführung besteht aus einer 25cm dicken äußeren Spritzbetonschicht und einer 40cm dicken, bewehrten Innenschale aus Ortbeton. Aufgrund der genauen Angaben der Abbildung 55 konnte die Betonfläche des äußeren Tragringes ermittelt werden. Die Fläche der jeweiligen Schicht wird mit der Dichte des vorhandenen Betons multipliziert, um die Masse in Kilogramm pro Meter Tunnel zu ermitteln. Die Dichte eines unbewehrten Betons beträgt 2400kg/m^3 . Somit ergeben sich die in Tabelle 2 errechneten Massen pro Meter Tunnel.

Tabelle 2: Berechnung der Betonmassen für die NÖT des äußeren Tunneltragringes (eingleisig)

Schicht	Fläche [m ²]	Dichte Beton [kg/m ³]	Masse [kg/m]
25cm dicke Spritzbetonaußenschale	4,13	2.400	9.912
40cm dicke, bewehrte Ortbetoninnenschale	7,50	2.400	18.000

5.1.2 Betonmengen für NÖT (zweigleisig)

Für eine zweigleisige Ausführung mit der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode haben wir leider keinen Tunnelquerschnitt zur Verfügung.

Für die Berechnung der erforderlichen Betonmengen werden die in 5.1.1 ermittelten Mengen verdoppelt und wird in Tabelle 5 gezeigt.

Tabelle 4: Berechnung der Betonmassen für die NÖT (zweigleisig)

Schicht	Fläche [m²]	Dichte Beton [kg/m³]	Masse [kg/m]
25cm dicke Spritzbetonaußenschale	8,26	2.400	19.824
40cm dicke, bewehrte Ortbetoninnenschale	15,00	2.400	36.000
Unterbeton	3,00	2.400	7.200
Ortsbruststützung	48,00	2.400	5.760

Die Gesamtbetonmengen für die zweigleisige Ausführung der NÖT betragen 68.784kg pro Meter Tunnel.

5.1.3 Betonmengen für den Schildvortrieb (eingleisig)

Der Abbau des Untergrundes erfolgt hier mittels vollflächigem Schildvortrieb mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrüst. Als Stützflüssigkeit wird Bentonitsuspension eingesetzt. Der abgebaute Boden inklusive Suspension gelangt anschließend in eine Separationsanlage, wo die Suspension vom Boden getrennt und wieder verwendet werden kann.

Der eingleisige U-Bahntunnel hat einen Innendurchmesser von 5,45m. Der tragende Außenring aus Tübbing hat eine Dicke von 40cm. Der Tunnelquerschnitt ist in Abbildung 57 dargestellt.

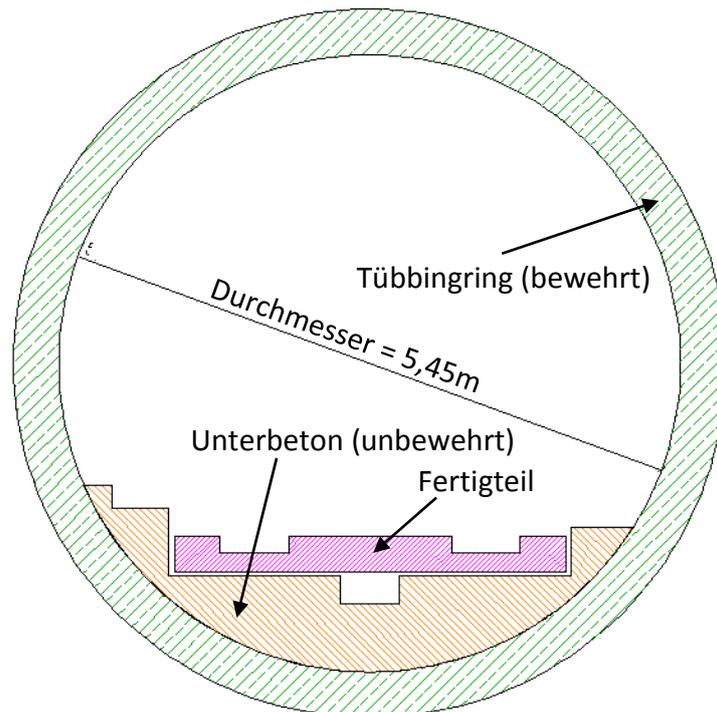


Abbildung 57: Tunnelquerschnitt bei eingleisigem Schildvortrieb

Der grün schraffierte Bereich symbolisiert die Tübbingfläche, der orange schraffierte Bereich die Fläche des Unterbetons und der pink schraffierte Bereich das Fertigteil für die Gleisebene. Für die weiteren Berechnungen sind die Tübbingfläche und die Fläche des Unterbetons relevant. Der Ringraum, der mit Verpressmörtel verfüllt wird, wird in dieser Berechnung vernachlässigt.

Die Fläche des Tübbingringes wird mit der Dichte des Betons multipliziert, um die Masse in Kilogramm pro Meter Tunnel zu ermitteln. Somit ergeben sich die in Tabelle 5 errechneten Massen pro Meter Tunnel.

Tabelle 5: Berechnung der Betonmassen des Tübbingrings für den Schildvortrieb (eingleisig)

Schicht	Fläche [m ²]	Dichte Beton [kg/m ³]	Masse [kg/m]
Tübbingring	3,68	2.400	8.832

Im Tunnelinneren wird ein unbewehrter Unterbeton für die Erstellung der Gleisebene benötigt. Die Massenermittlung ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Berechnung der Betonmassen des Tunnelinnenraums für den Schildvortrieb

Schicht	Fläche [m ²]	Dichte Beton [kg/m ³]	Masse [kg/m]
Unterbeton (orange schraffierter Bereich)	2,80	2.400	6.720

5.1.4 Betonmengen für den Schildvortrieb (zweigleisig)

Für die zweigleisige Streckenführung wurden von den Wiener Linien Querschnittsprofile zur Verfügung gestellt. Das gewählte Profil ist in Abbildung 58 angeführt.

Bei der gewählten zweigleisigen Streckenführung hat die Tunnelröhre einen Innendurchmesser von 11,30m und eine Tübbingringstärke von 50cm.

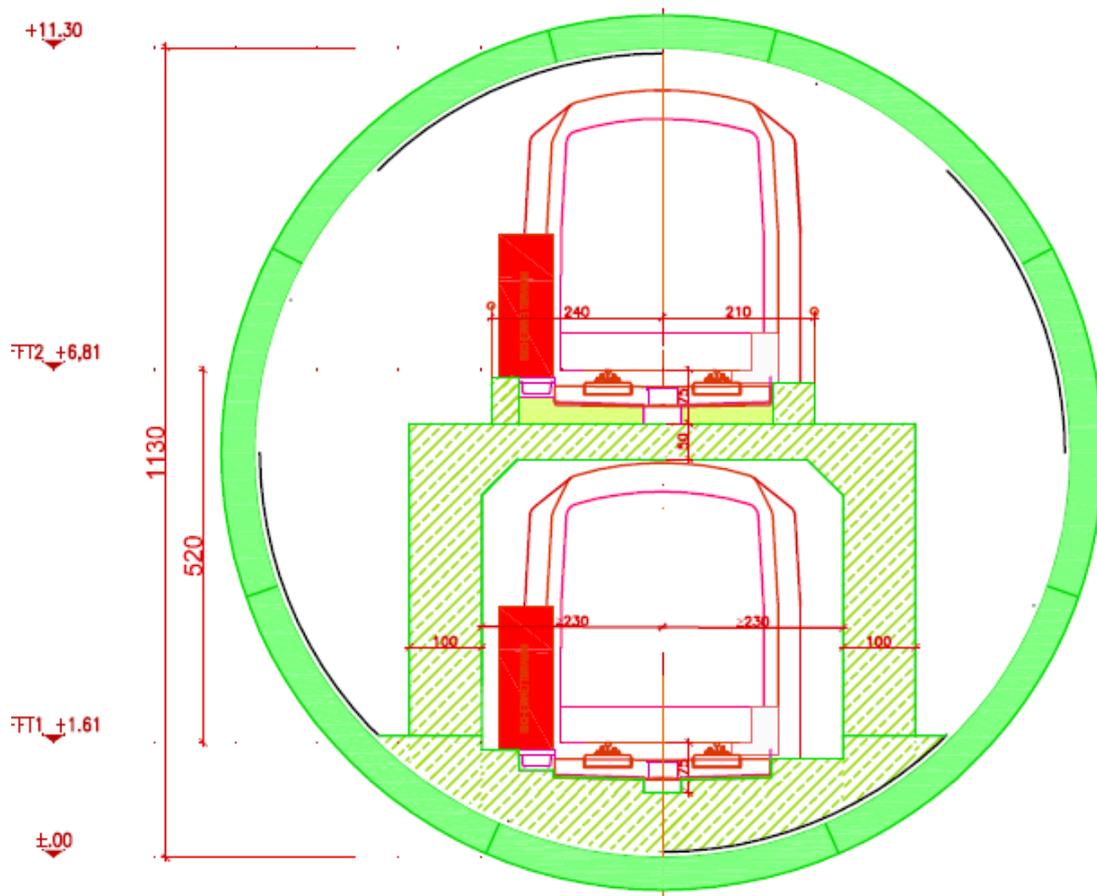


Abbildung 58: Querschnittsprofil zweigleisige Streckenröhre mittels Schildvortrieb

Der grün vollflächig gefärbte Bereich symbolisiert die Tübbingfläche, der grün schraffierte Bereich die Fläche des Unterbetons sowie der Tragkonstruktion für die obere Gleisstrasse.

Das Fertigteil für die Gleisebene wird bei der Berechnung des Ressourcenbedarfs nicht berücksichtigt, da es in jeder Ausführungsvariante gleichermaßen vorhanden ist. Für die weiteren Berechnungen sind die Tübbingfläche und die Fläche des Unterbetons sowie der Tragkonstruktion für die obere Gleistrasse relevant.

Somit ergeben sich die in Tabelle 7 errechneten Betonmassen für Tübbingring, Unterbeton und für die Tragkonstruktion der oberen Gleisebene pro Meter Tunnel.

Tabelle 7: Berechnung der Betonmassen für den Schildvortrieb (zweigleisig)

Schicht	Fläche [m²]	Dichte Beton [kg/m³]	Masse [kg/m]
Tübbingring	9,27	2.400	22.248
Unterbeton (unbewehrt)	8,74	2.400	20.976
Tragkonstruktion (bewehrt)	11,72	2.400	28.128

5.2 Ermittlung der erforderlichen Stoffmengen bei der Betonherstellung

Zement gehört zu den wichtigsten Bindemitteln in der Betonherstellung. Zuzufolge Recherchearbeiten im Bereich Betontechnologie werden Zuschlagstoffe wie Schotter und Flugasche bei der Betonherstellung hinzugefügt ebenso auch Zusatzmittel, wie beispielsweise Fließmittel. Da es notwendig ist einen bestimmten Wasser/Bindemittel-Wert (W/B-Wert) zu erreichen, wird noch Wasser zugefügt. In Tabelle 8 sind die erforderlichen Mengen pro Kubikmeter Beton aufgelistet.

Tabelle 8: Zuschlagstoff-, Zusatzmittel- und Wassermengen pro Kubikmeter Beton

Stoffart	Menge [kg/m ³]
Zement	265
Schotter	1878
Flugasche	88
Fließmittel	80
Wasser	150

5.2.1 Ermittlung der Bindemittelmengen

Um die erforderlichen Zementmengen zu erhalten, wird das vorhandene Betonvolumen pro einen Meter Tunnel mit den in Tabelle 8 aufgelisteten Werten multipliziert. Somit ergeben sich die in Tabelle 9 ermittelten Zementmengen je Baumethode.

Tabelle 9: erforderliche Zementmengen je Baumethode

Tunnelbaumethode	Betonvolumen [m ³ /m]	Zementmengen [kg/m]
NÖT (eingleisig)	13,13	3.479
NÖT (zweingleisig)	26,26	6.959
Schildvortrieb (eingleisig)	6,48	1.717
Schildvortrieb (zweingleisig)	29,73	7.878

5.2.2 Ermittlung der Wassermengen

Laut [34] beträgt die erforderliche Wassermenge pro Kubikmeter Beton 150kg. Um die erforderlichen Wassermengen zu ermitteln, wird dieser Wert mit dem vorhandenen Betonvolumen multipliziert. Die errechneten Werte sind in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10: erforderliche Wassermengen je Baumethode

Tunnelbaumethode	Betonvolumen [m ³ /m]	Wassermengen [kg/m]
NÖT (eingleisig)	13,13	1.970
NÖT (zweingleisig)	26,26	3.939
Schildvortrieb (eingleisig)	6,48	972
Schildvortrieb (zweingleisig)	29,73	4.460

5.2.3 Ermittlung der Zusatzmittelmengen

Als Zusatzmittel werden Fließmittel eingesetzt. Laut [34] beträgt die erforderliche Fließmittelmenge pro Kubikmeter Beton 80kg. Um die erforderlichen Fließmittelmengen zu ermitteln, wird die laut Norm vorgeschriebene Fließmittelmenge mit dem vorhandenen Betonvolumen multipliziert. Die errechneten Fließmittelmengen sind in Tabelle 11 ersichtlich.

Tabelle 11: erforderliche Fließmittelmengen je Baumethode

Tunnelbaumethode	Betonvolumen [m ³ /m]	Fließmittelmengen [kg/m]
NÖT (eingleisig)	13,13	1.050
NÖT (zweingleisig)	26,26	2.100
Schildvortrieb (eingleisig)	6,48	518
Schildvortrieb (zweingleisig)	29,73	2.378

5.2.4 Ermittlung der Zuschlagstoffmengen

Bei der Betonherstellung werden Schotter und Flugasche als Zuschlagstoffe eingesetzt. Die erforderlichen Mengen erhält man, indem man das Betonvolumen je Baumethode mit dem Wert aus Tabelle 8 multipliziert. Diese sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: erforderliche Zuschlagstoffmengen je Baumethode

Tunnelbaumethode	Betonvolumen [m ³ /m]	Flugaschemengen [kg/m]	Schottermengen [kg/m]
NÖT (eingleisig)	13,13	1.155	24.658
NÖT (zweingleisig)	26,26	2.310	49.316
Schildvortrieb (eingleisig)	6,48	570	12.169
Schildvortrieb (zweingleisig)	29,73	2.616	55.833

5.3 Ermittlung der erforderlichen Stoffmengen bei der Zementherstellung

Laut [35] wird Zement aus Kalk und Ton hergestellt. Diese werden in einem Verhältnis von 2:1 hinzugefügt. Die Gewinnung dieser Rohstoffe erfolgt in Steinbrüchen bzw. Tongruben. Danach werden sie mittels Brechern zerkleinert, ins Zementwerk geführt und gelagert. Weitere Information zur Zementherstellung sind näher in [35] erläutert.

5.3.1 Ermittlung der erforderlichen Kalkmengen

In Punkt 5.2. wurden die erforderlichen Zementmengen ermittelt. Nun werden diese bei der Ermittlung der Kalkmengen mit dem Wert $\frac{2}{3}$ multipliziert. In Tabelle 13 sind die erforderlichen Kalkmengen je Baumethode für die Zementherstellung angegeben.

Tabelle 13: erforderliche Kalkmengen je Baumethode

Tunnelbaumethode	Zementmengen [kg/m]	Kalkmengen [kg/m]
NÖT (eingleisig)	3.479	2.319
NÖT (zweingleisig)	6.959	4.639
Schildvortrieb (eingleisig)	1.717	1.145
Schildvortrieb (zweingleisig)	7.878	5.252

5.3.2 Ermittlung der erforderlichen Tonmengen

In Punkt 5.2. wurden die erforderlichen Zementmengen ermittelt. Nun werden diese bei der Ermittlung der Tonmengen mit dem Wert $\frac{1}{3}$ multipliziert. In Tabelle 14 sind die erforderlichen Tonmengen je Baumethode für die Zementherstellung ersichtlich.

Tabelle 14: erforderliche Tonmengen je Baumethode

Tunnelbaumethode	Zementmengen [kg/m]	Tonmengen [kg/m]
NÖT (eingleisig)	3.479	1.160
NÖT (zweingleisig)	6.959	2.320
Schildvortrieb (eingleisig)	1.717	572
Schildvortrieb (zweingleisig)	7.878	2.626

5.4 Ermittlung der Stahlmengen

Stahl spielt eine wichtige Rolle für die Standfestigkeit des Gebirges und für die Tragfähigkeit des Tragrings. Die Stahlmengen werden wie folgt ermittelt:

- Ermittlung der erforderlichen Betonmengen je Tunnelbaumethode und Variante
- Ermittlung des erforderlichen Bewehrungsgrads
- Berechnung der erforderlichen Stahlmengen

5.4.1 Stahlmengen für NÖT (eingleisig)

Laut [36] ist ein Raster von einem Durchmesser 16mm alle 15cm für die Tragfähigkeit des Tragrings der NÖT ausreichend. Daraus folgt ein Bewehrungsgrad von rund 120kg/m^3 bei einer Tragringsstärke von 40cm. Die Spritzbetonaußenschale wird an der Innenseite mit einer Lage an Baustahlgitter AQ55 ausgestattet, die nach [37] ein Gewicht von $3,74\text{kg/m}^2$ hat.

Zusätzlich werden für die Sicherheit des Vortriebs 70 Vorpfändnägel eingebaut, die das Einstürzen des frisch abgebauten Hohlraums verhindern. Diese werden mit einem Durchmesser von 40mm und einer Länge von 1,80m angenommen und in einem Abstand von 10cm im Bereich der Kalotte (von 10 bis 14 Uhr) eingebaut. Des Weiteren kommen Gitterbögen, die eine Stahlgüte von ST 510/560 entsprechen und Abmessungen von 70/20/30 haben, im Abstand von 1m zum Einsatz. Sie werden in einer Länge von 16m benötigt und haben nach [38] ein Gewicht von $12,5\text{kg/m}$. Daraus ergibt sich ein Gesamtgewicht bezogen auf einen Meter Tunnel von 200kg.

Die Stahlmengen ergeben sich somit zu (siehe Tabelle 15):

Tabelle 15: Berechnung der Stahlmengen für die NÖT (eingleisig)

Schicht	Fläche [m^2]	Bewehrungsgrad	Stahlmengen [kg/m]
Ortbetoninnenschale 40cm dick	7,50	120kg/m^3	900
Spritzbetonaußenschale 25cm dick	4,13	$3,74\text{kg/m}^2$	16
Vorpfändnägel (70 Stück)	0,001257	7850kg/m^3	691
Gitterbögen (1 Stück)	---	---	200

5.4.2 Stahlmengen für NÖT (zweingleisig)

Es werden dieselben Annahmen wie bei der eingleisigen Ausführungsvariante der NÖT und somit ergeben sich die in Tabelle 16 dargestellten Werte.

Tabelle 16: Berechnung der Stahlmengen für die NÖT (zweigleisig)

Schicht	Fläche [m ²]	Bewehrungsgrad	Stahlmengen [kg/m]
Ortbetoninnenschale 40cm dick	15	120kg/m ³	1.800
Spritzbetonaußenschale 25cm dick	8,26	3,74kg/m ²	32
Vorpfändnägel (140 Stück)	0,001257	7850kg/m ³	1382
Gitterbögen (1 Stück)	---	---	400

5.4.3 Stahlmengen für den Schildvortrieb (eingleisig)

Beim Schildvortrieb wird nur der Bereich des Tübbingrings für die Ermittlung der Stahlmengen berücksichtigt. Nach Kontaktaufnahme zur Firma Herrenknecht bekamen wir einen Bewehrungsgrad von 90-110kg/m³ von [39] zugeschickt. Weitere Berechnungen basieren auf einem durchschnittlichen Bewehrungsgrad von 100kg/m³.

Tabelle 17: Berechnung der Stahlmengen für den Schildvortrieb (eingleisig)

Schicht	Fläche [m ²]	Bewehrungsgrad [kg/m ³]	Stahlmengen [kg/m]
Tübbingring (Dicke 40cm)	3,68	100	368

5.4.4 Stahlmengen für den Schildvortrieb (zweigleisig)

Hier wird der gleiche Bewehrungsgrad wie in 5.4.2 angesetzt. Die Dicke des Tübbingrings beträgt hier 50cm.

Der Bewehrungsgrad für die Tragkonstruktion wird mit 157kg/m³ angenommen. Dies entspricht einem Stahlanteil von 2% des Betonvolumens multipliziert mit der Dichte von Stahl, die 7850kg/m³ beträgt.

Tabelle 18: Berechnung der Stahlmengen für den Schildvortrieb (zweigleisig)

Schicht	Fläche [m ²]	Bewehrungsgrad [kg/m ³]	Stahlmengen [kg/m]
Tübbingring (Dicke 50cm)	9,27	100	927
Tragkonstruktion	11,72	157	1.837

5.5 Ermittlung der erforderlichen Stoffmengen bei der Stahlherstellung

Laut [40] werden hauptsächlich Eisenerz und Koks für die Stahlerzeugung eingesetzt. Pro Tonne Roheisen sind 1,6t Eisenerz und 0,6t Koks erforderlich.

Für die Stoffflussanalyse sind diese Werte von Bedeutung und auch für die Berechnung der Input- und Outputflüsse erforderlich.

5.5.1 Ermittlung der erforderlichen Eisenerzmengen

In Punkt 5.4 wurden die erforderlichen Stahlmengen ermittelt. Nun werden diese bei der Ermittlung der Eisenerzmengen mit dem oben genannten Wert multipliziert. In Tabelle 19 sind die erforderlichen Eisenerzmengen je Baumethode für die Stahlerzeugung angegeben.

Tabelle 19: erforderliche Eisenerzmengen je Baumethode

Tunnelbaumethode	Stahlmengen [kg/m]	Eisenerzmengen [kg/m]
NÖT (eingleisig)	1.807	2.891
NÖT (zweigleisig)	3.614	5.782
Schildvortrieb (eingleisig)	368	589
Schildvortrieb (zweigleisig)	2.764	4.422

5.5.2 Ermittlung der erforderlichen Koksmengen

In Punkt 5.4 wurden die erforderlichen Stahlmengen ermittelt. Nun werden diese bei der Ermittlung der Koksmengen mit dem oben genannten Wert multipliziert. In Tabelle 20 sind die erforderlichen Koksmengen je Baumethode für die Stahlerzeugung dargestellt.

Tabelle 20: erforderliche Koksmengen je Baumethode

Tunnelbaumethode	Stahlmengen [kg/m]	Koksmengen [kg/m]
NÖT (eingleisig)	1.807	1.084
NÖT (zweigleisig)	3.614	2.168
Schildvortrieb (eingleisig)	368	221
Schildvortrieb (zweigleisig)	2.764	1.658

5.6 Ermittlung des Energiebedarfs für die Herstellung erforderlicher Baumaterialien

Die Ermittlung des Energiebedarfs spielt bei der Ermittlung des erforderlichen Ressourcenbedarfs eine große Rolle. Dazu gehören die Stahl-, Zement-, Betonherstellung sowie der Energieverbrauch der erforderlichen Baumaschinen für die Herstellung eines ein Meter langen Tunnelabschnitts. Die Energie, die für den Bau der Maschinen erforderlich ist, wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Laut [41] werden folgende Werte für die Energieberechnung angenommen:

Tabelle 21: Energiewerte für die Herstellung von erforderlichen Materialien bei NÖT [41]

Prozess	Graue Energie [kWh/kg]
Stahlherstellung	10,60
Zementherstellung	1,60
Herstellung von Ortbeton und Betonfertigteilen	0,53

Der Begriff „Graue Energie“ beschreibt die erforderliche Leistung für die Herstellung je Kilogramm des geforderten Materials.

5.6.1 Energiebedarf für die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (eingleisig)

5.6.1.1 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Zementmengen

In Punkt 5.2.1 wurden die erforderlichen Zementmengen berechnet. Diese betragen 2390kg pro Meter Tunnel. Um nun den erforderlichen Energiebedarf für die Herstellung dieser Zementmengen zu ermitteln, wird dieser Wert mit dem Wert für Graue Energien aus Tabelle 21 multipliziert. Daraus ergibt sich folgender Energiebedarf für die Zementherstellung (siehe Tabelle 22):

Tabelle 22: Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Zementmengen für die NÖT (eingleisig)

Zementmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
3.479	5.566

5.6.1.2 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Betonmengen

In Punkt 5.1.1 wurden die erforderlichen Betonmengen errechnet. Diese werden mit dem Wert (Graue Energie – siehe Tabelle 21) für die Herstellung von Ortbeton und Betonfertigteilen multipliziert. Somit ergibt sich ein in

Tabelle 23 ersichtlicher Energiebedarf für die Herstellung der erforderlichen Betonmengen.

Tabelle 23: Energiebedarf für Betonherstellung für die NÖT (eingleisig)

Betonmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
31.512	16.701

5.6.1.3 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Stahlmengen

In Absatz 5.4.1 wurden die erforderlichen Stahlmengen berechnet. Diese werden mit dem Wert für die graue Energie multipliziert. Somit ergibt sich ein in Tabelle 24 ersichtlicher Energiebedarf für die Herstellung der erforderlichen Stahlmengen.

Tabelle 24: Energiebedarf für Stahlherstellung für NÖT

Stahlmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
1.807	19.154

5.6.2 Energiebedarf für die NÖT (zweigleisig)

Um den erforderlichen Energiebedarf für die zweigleisige Ausführungsvariante der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode werden aufgrund der fehlenden Querschnittsform die Werte aus der eingleisigen Ausführung mit dem Faktor 2 multipliziert.

5.6.2.1 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Zementmengen

Der erforderliche Energiebedarf für die Herstellung der berechneten Zementmengen ist in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Zementmengen für die NÖT (zweigleisig)

Zementmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
6.959	11.134

5.6.2.2 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Betonmengen

In wird der Energiebedarf für die erforderlichen Betonmengen gezeigt.

Tabelle 26: Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Betonmengen für die NÖT (zweigleisig)

Betonmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
63.024	33.403

5.6.2.3 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Stahlmengen

Die Berechnung für den Energiebedarf der erforderlichen Stahlmengen ist in aufzufinden.

Tabelle 27: Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Stahlmengen für die NÖT (zweigleisig)

Stahlmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
3.614	38.308

5.6.3 Energiebedarf für den Schildvortrieb (eingleisig)

5.6.3.1 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Zementmengen

In Absatz 5.2.1 wurden die erforderlichen Zementmengen je Baumethode ermittelt. Diese betragen für den eingleisigen Schildvortrieb 1717kg pro Meter Tunnel. Den erforderlichen Energiebedarf für die Herstellung dieser Mengen errechnet man sich nun wie folgt:

$$E = Z \cdot E(g) = 1717kg/m \cdot 1,6kWh/kg \quad (1)$$

Dadurch ergibt sich folgender Energiebedarf (siehe Tabelle 28):

Tabelle 28: Energiebedarf für die Zementherstellung für den Schildvortrieb (eingleisig)

Zementmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
1.717	2.747

5.6.3.2 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Betonmengen

In Punkt 5.1.2 wurden die erforderlichen Betonmengen errechnet. Die Betonmengen werden mit dem Wert (Graue Energie – siehe Tabelle 21) für die Herstellung von Ortbeton und

Betonfertigteilen multipliziert. Somit ergibt sich ein in Tabelle 29 ersichtlicher Energiebedarf für die Herstellung der erforderlichen Betonmengen.

Tabelle 29: Energiebedarf für Betonherstellung für den Schildvortrieb (eingleisig)

Betonmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
15.552	8.243

5.6.3.3 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Stahlmengen

In Absatz 5.4.2 wurden die erforderlichen Stahlmengen berechnet. Diese werden mit dem Wert für die graue Energie multipliziert. Somit ergibt sich ein in Tabelle 30 ersichtlicher Energiebedarf für die Herstellung der erforderlichen Stahlmengen.

Tabelle 30: Energiebedarf für Stahlherstellung für den Schildvortrieb (eingleisig)

Stahlmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
368	3.901

5.6.4 Energiebedarf für den Schildvortrieb (zweigleisig)

5.6.4.1 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Zementmengen

In Absatz 5.2.1 wurden die erforderlichen Zementmengen je Baumethode ermittelt. Diese betragen für den eingleisigen Schildvortrieb 7878kg pro Meter Tunnel. Den erforderlichen Energiebedarf für die Herstellung dieser Mengen errechnet man sich nun wie folgt:

$$E = Z \cdot E(g) = 7878 \text{ kg/m} \cdot 1,6 \text{ kWh/kg} \quad (2)$$

Dadurch ergibt sich folgender Energiebedarf für die Zementherstellung (siehe Tabelle 31):

Tabelle 31: Energiebedarf für die Zementherstellung für den Schildvortrieb (zweigleisig)

Zementmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
7.878	12.605

5.6.4.2 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Betonmengen

In Punkt 5.1.2 wurden die erforderlichen Betonmengen errechnet. Die Betonmengen werden mit dem Wert (Graue Energie – siehe Tabelle 21) für die Herstellung von Ortbeton und Betonfertigteilen multipliziert. Somit ergibt sich ein in Tabelle 32 ersichtlicher Energiebedarf für die Herstellung der erforderlichen Betonmengen.

Tabelle 32: Energiebedarf für Betonherstellung für den Schildvortrieb (zweigleisig)

Betonmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
71.352	37.817

5.6.4.3 Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Stahlmengen

In Absatz 5.4.2 wurden die erforderlichen Stahlmengen berechnet. Diese werden mit dem Wert für die graue Energie multipliziert. Somit ergibt sich ein in Tabelle 33 ersichtlicher Energiebedarf für die Herstellung der erforderlichen Stahlmengen.

Tabelle 33: Energiebedarf für Stahlherstellung für den Schildvortrieb (zweigleisig)

Stahlmengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
2.764	29.298

6 Energiebedarf der erforderlichen Baugeräte

Den Berechnungen des Energiebedarfs der Baugeräte für beide Tunnelbaumethoden werden folgende Annahmen zugrunde gelegt: Betrachtet wird ein 1.000m langer Tunnelabschnitt der Wiener U-Bahnlinie U3 (Baulos U3/20). Anhand dieses Mustertunnels wird für jede Tunnelbaumethode eine Baugeräteliste erstellt. Die Einsatzdauer dieser Baugeräte wird mit 12 Stunden pro Tag angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die Baugeräte mit voller Leistung angetrieben werden. Zusätzlich wird zwischen zwei Energieträgern unterschieden: Strom und Diesel. Ebenfalls wird in den Berechnungen der Wirkungsgrad von Elektro- und Dieselmotoren berücksichtigt.

Zufolge der Angaben aus [42] und den angenommenen Randbedingungen konnte der Energiebedarf der erforderlichen Baugeräte berechnet werden. Das Ergebnis ist in Abschnitt 7 zu finden.

7 Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

7.1 Vergleich der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT) und des Schildvortriebs hinsichtlich des Ressourcenbedarfs

In Tabelle 34 sind die errechneten Werte für den Ressourcenbedarf für die zu vergleichenden Baumethoden dargestellt. Die berechneten Mengen je Meter Tunnel wurden, um Unsicherheiten entgegenzuwirken, gerundet.

Die Daten wurden in Tabellen sowie Diagrammen übersichtlich zusammengefasst.

7.1.1 Vergleich des Materialbedarfs (Zement, Beton, Stahl)

Tabelle 34 zeigt die erforderlichen Mengen an Zement, Beton und Stahl für die jeweilige Tunnelbaumethode und Ausführungsvariante.

Tabelle 34: Vergleich des Ressourcenbedarfs für NÖT und Schildvortrieb

Ressourcen	NÖT (eingleisig)	Schildvortrieb (eingleisig)	NÖT (zweingleisig)	Schildvortrieb (zweingleisig)
Zement	3.500kg/m	1.700kg/m	7.000kg/m	7.900kg/m
Beton	31.500kg/m	16.000kg/m	63.000kg/m	71.400kg/m
Stahl	1.800kg/m	400kg/m	3.600kg/m	2.800kg/m

In Abbildung 59 und Abbildung 60 wird der Materialbedarf der NÖT und des Schildvortriebs für die eingleisige und zweingleisige Tunnelausführung verglichen. Die genau ermittelten Mengen sind in Abschnitt 5 zu finden.

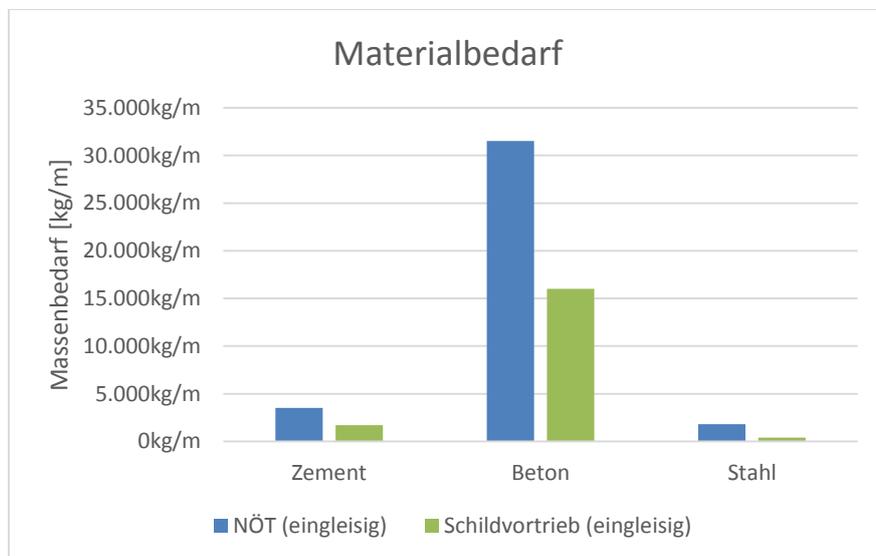


Abbildung 59: Vergleich des Materialbedarfs für eingleisige Tunnelausführungen

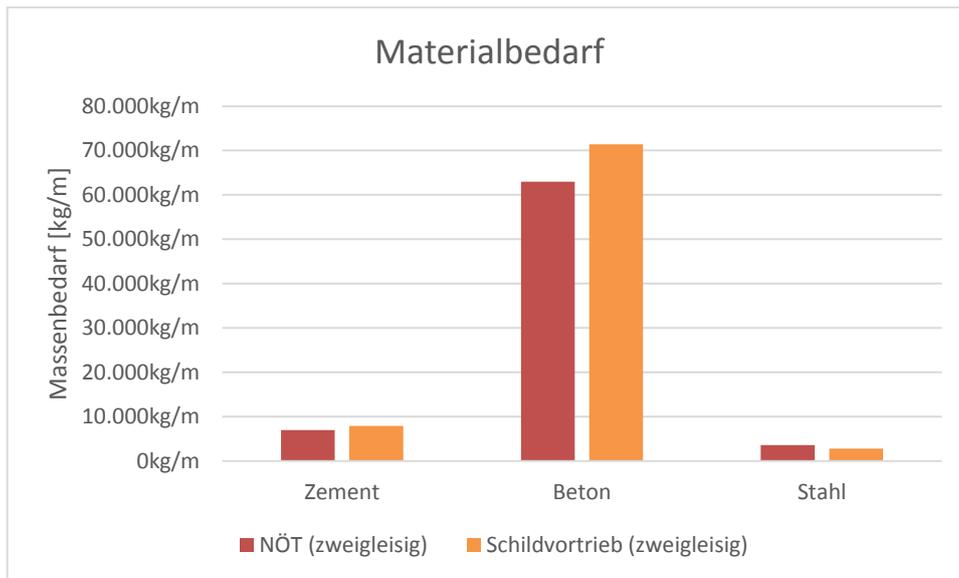


Abbildung 60: Vergleich des Materialbedarfs für zweigleisige Tunnelausführungen

7.1.2 Vergleich des Energiebedarfs

Tabelle 35 zeigt den Energiebedarf, der für die Herstellung der erforderlichen Mengen an Zement, Beton und Stahl für die jeweilige Tunnelbaumethode und Ausführungsvariante erforderlich ist.

Tabelle 35: Vergleich des Energiebedarfs für NÖT und Schildvortrieb

Ressourcen	NÖT (eingleisig)	Schildvortrieb (eingleisig)	NÖT (zweigleisig)	Schildvortrieb (zweigleisig)
Energiebedarf für die Zementherstellung	5.600kWh/m	2.800kWh/m	11.100kWh/m	12.600kWh/m
Energiebedarf für die Betonherstellung	16.700kWh/m	8.200kWh/m	33.400kWh/m	37.800kWh/m
Energiebedarf für die Stahlherstellung	19.200kWh/m	3.900kWh/m	38.300kWh/m	29.300kWh/m

Wie auch in 7.1.1 wurden hier die Werte sinnvoll gerundet und übersichtlich in Diagrammen dargestellt, welche in Abbildung 61 und Abbildung 62 ersichtlich sind.

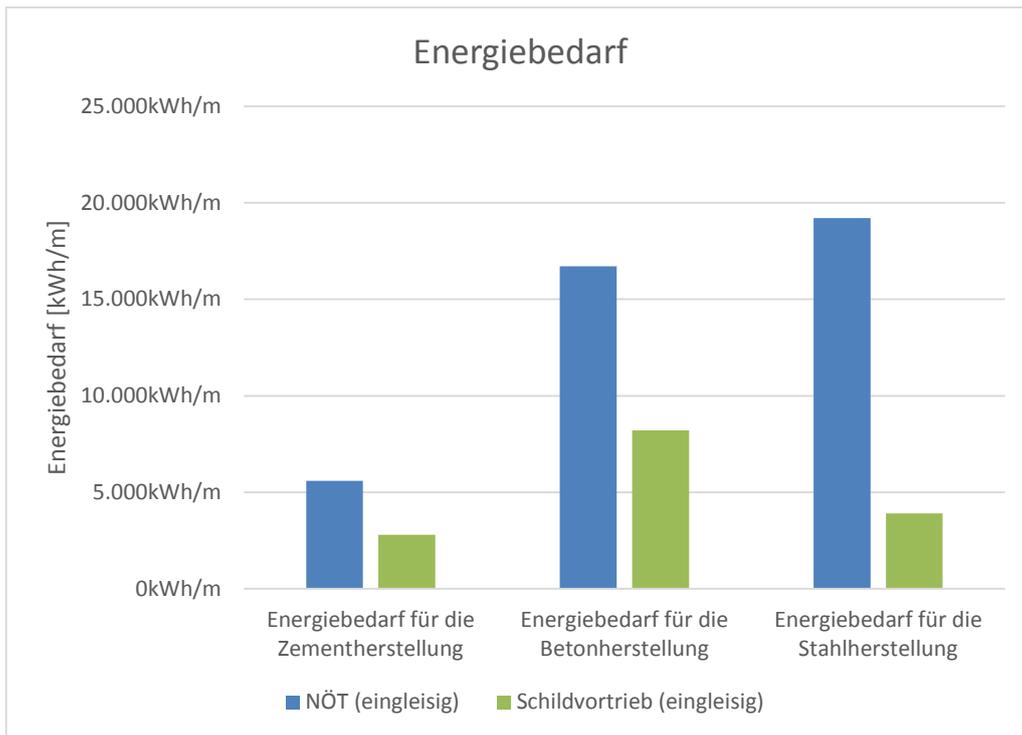


Abbildung 61: Vergleich des Energiebedarfs für eingleisige Tunnelausführungen

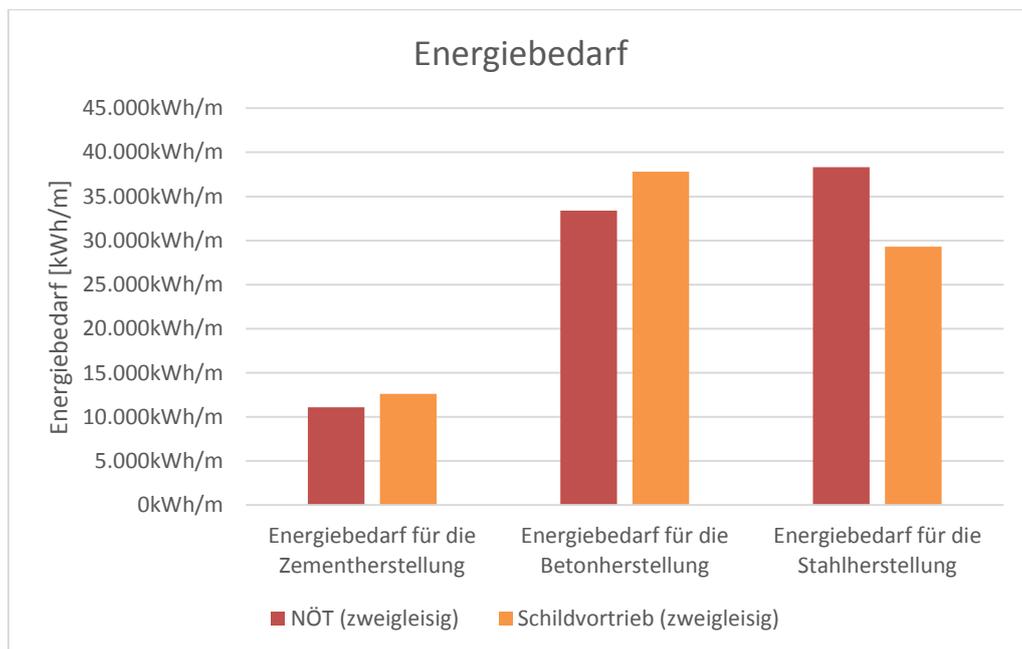


Abbildung 62: Vergleich des Energiebedarfs für zweigleisige Tunnelausführungen

Die genau ermittelten Energiebedarfe sind in Abschnitt 5.6 festgehalten.

7.1.3 Vergleich des Materialbedarfs bei der Zementherstellung

In Die in Abschnitt 5.2 errechneten Werte für den Ressourcenbedarf bei der Betonherstellung sind gerundet in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37 werden die gerundeten Mengen der Ressourcen, die für die Zementherstellung notwendig sind, für alle Tunnelbaumethoden gezeigt.

Tabelle 36: Vergleich des Ressourcenbedarfs bei der Zementherstellung

Ressourcen	NÖT (eingleisig)	Schildvortrieb (eingleisig)	NÖT (zweigleisig)	Schildvortrieb (zweigleisig)
Kalk	2.300kg/m	1.100kg/m	4.600kg/m	5.300kg/m
Ton	1.200kg/m	600kg/m	2.300kg/m	2.600kg/m

Um einen schnellen Vergleich führen zu können, werden die errechneten Werte in Diagrammen dargestellt, die in Abbildung 63 und Abbildung 64 enthalten sind.

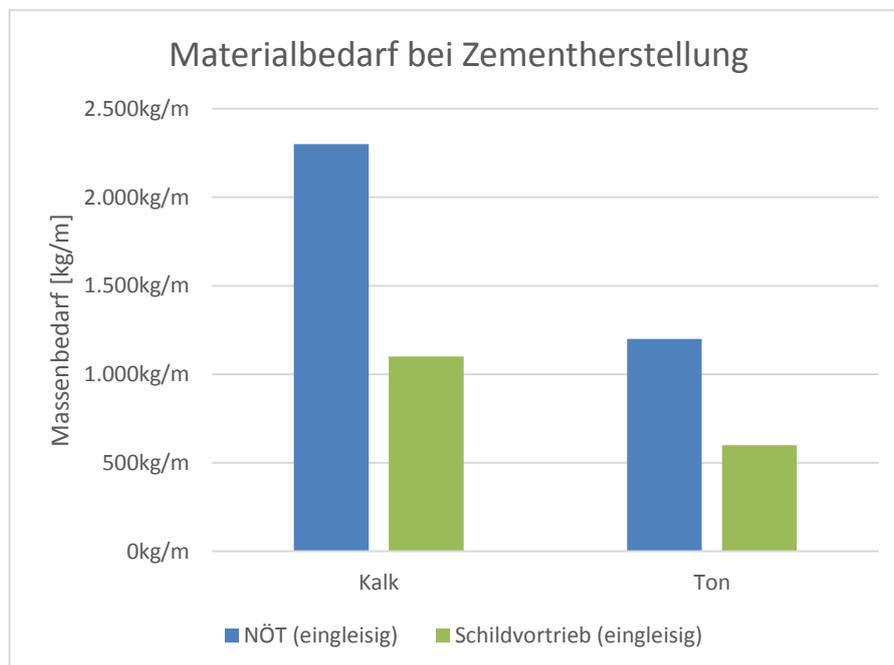


Abbildung 63: Vergleich des Materialbedarfs bei der Zementherstellung für eingleisige Tunnelausführungen

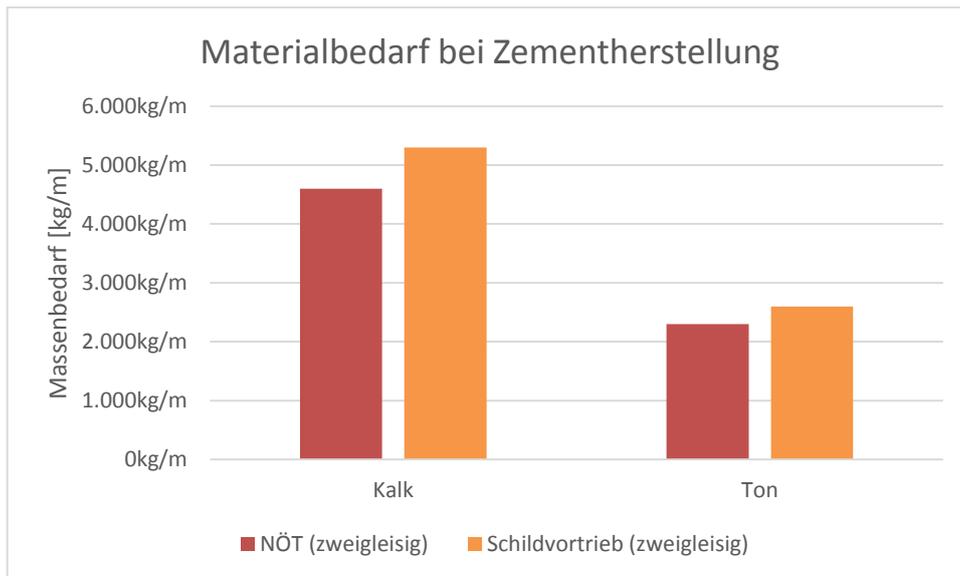


Abbildung 64: Vergleich des Materialbedarfs bei der Zementherstellung für zweigleisige Tunnelausführungen

7.1.4 Vergleich des Materialbedarfs bei der Betonherstellung

Die in Abschnitt 5.2 errechneten Werte für den Ressourcenbedarf bei der Betonherstellung sind gerundet in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Vergleich des Ressourcenbedarfs bei der Betonherstellung

Ressourcen	NÖT (eingleisig)	Schildvortrieb (eingleisig)	NÖT (zweigleisig)	Schildvortrieb (zweigleisig)
Zement	3.500kg/m	1.700kg/m	7.000kg/m	7.900kg/m
Schotter	24.700kg/m	12.200kg/m	49.300kg/m	55.800kg/m
Flugasche	1.200kg/m	600kg/m	2.300kg/m	2.600kg/m
Fließmittel	1.100kg/m	500kg/m	2.100kg/m	2.400kg/m
Wasser	2.000kg/m	1.000kg/m	3.900kg/m	4.500kg/m

Die für einen übersichtlichen Vergleich erforderlichen Diagramme sind in Abbildung 65 und Abbildung 66 dargestellt.

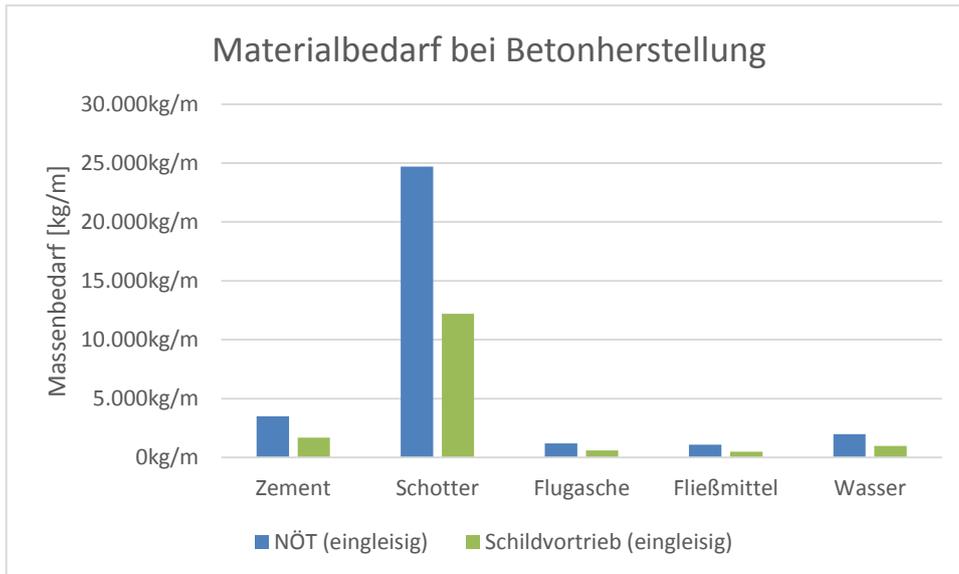


Abbildung 65: Vergleich des Materialbedarfs bei der Betonherstellung für eingleisige Tunnelausführungen

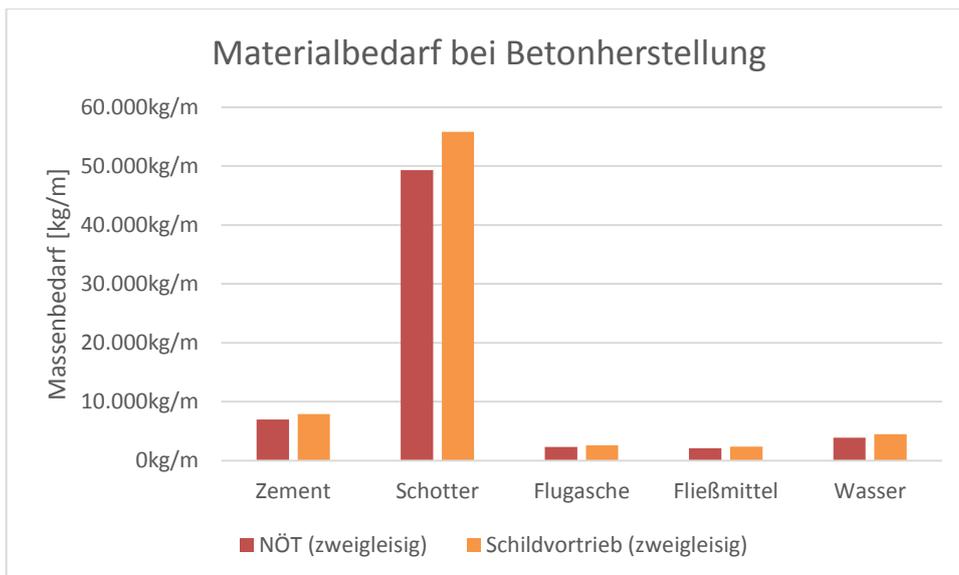


Abbildung 66: Vergleich des Materialbedarfs bei der Betonherstellung für zweigleisige Tunnelausführungen

7.1.5 Vergleich des Materialbedarfs bei der Stahlherstellung

Tabelle 38 zeigt den Materialbedarf, der für die Herstellung der erforderlichen Stahlmengen für die jeweilige Tunnelbaumethode und Ausführungsvariante erforderlich ist.

Tabelle 38: Vergleich des Ressourcenbedarfs bei der Stahlherstellung

Ressourcen	NÖT (eingleisig)	Schildvortrieb (eingleisig)	NÖT (zweigleisig)	Schildvortrieb (zweigleisig)
Eisenerz	2.900kg/m	600kg/m	5.800kg/m	4.400kg/m
Koks	1.100kg/m	200kg/m	2.200kg/m	1.700kg/m

In Abbildung 67 und Abbildung 68 ist dieser Materialbedarf in übersichtlicher Form dargestellt.

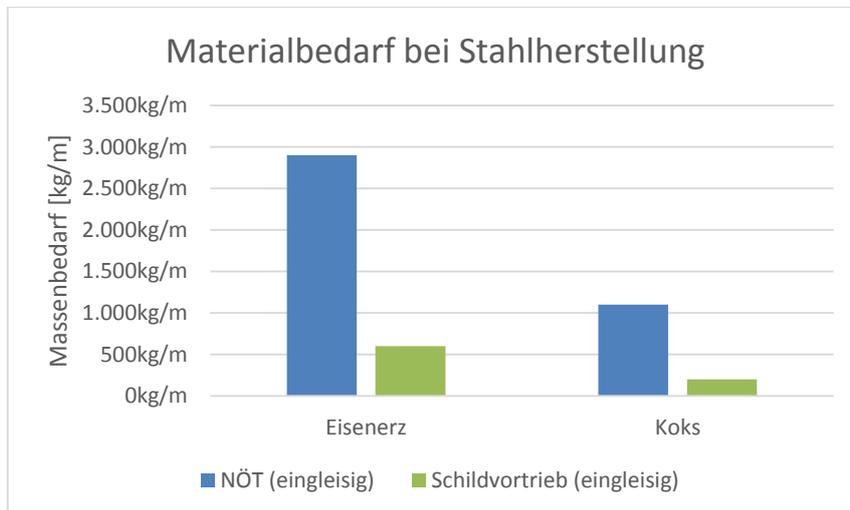


Abbildung 67: Vergleich des Materialbedarfs bei der Stahlherstellung für eingleisige Tunnelausführungen

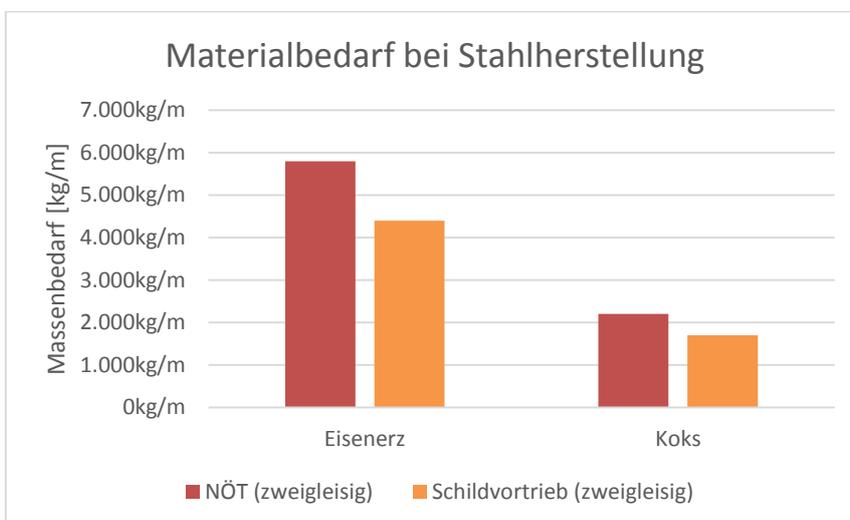


Abbildung 68: Vergleich des Materialbedarfs bei der Stahlherstellung für zweigleisige Tunnelausführungen

7.1.6 Vergleich des Materialbedarfs für die Herstellung erforderlicher Baugeräte

Tabelle 39 zeigt den in [43] berechneten Materialbedarf für die Herstellung der erforderlichen Baugeräte für die NÖT und den Schildvortrieb.

Tabelle 39: Vergleich des Materialbedarfs für die Herstellung der erforderlichen Baugeräte

Tunnelbaumethode	Materialbedarf [kg/m]
NÖT	78 kg/m
Schildvortrieb	30 kg/m

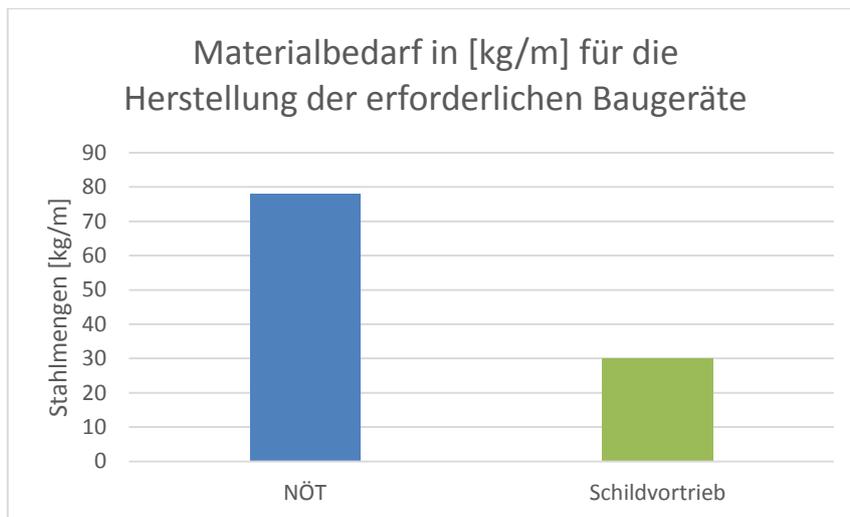


Abbildung 69: Vergleich des Materialbedarfs für die Herstellung der erforderlichen Baugeräte

7.1.7 Vergleich des Energiebedarfs der erforderlichen Baugeräte

In Tabelle 40 wird der berechnete Energiebedarf der erforderlichen Baugeräte gezeigt. Es wird zwischen den zwei Energieträgern Strom und Diesel unterschieden. Dieser Energiebedarf beinhaltet nicht die Herstellung der errechneten Materialmengen, die in Tabelle 39 dargestellt sind.

Tabelle 40: Vergleich des Energiebedarfs der erforderlichen Baugeräte

Tunnelbaumethode	Energiebedarf [kWh/m] - Strom	Energiebedarf [kWh/m] - Diesel
NÖT	4 kWh/m	11 kWh/m
Schildvortrieb	3 kWh/m	---

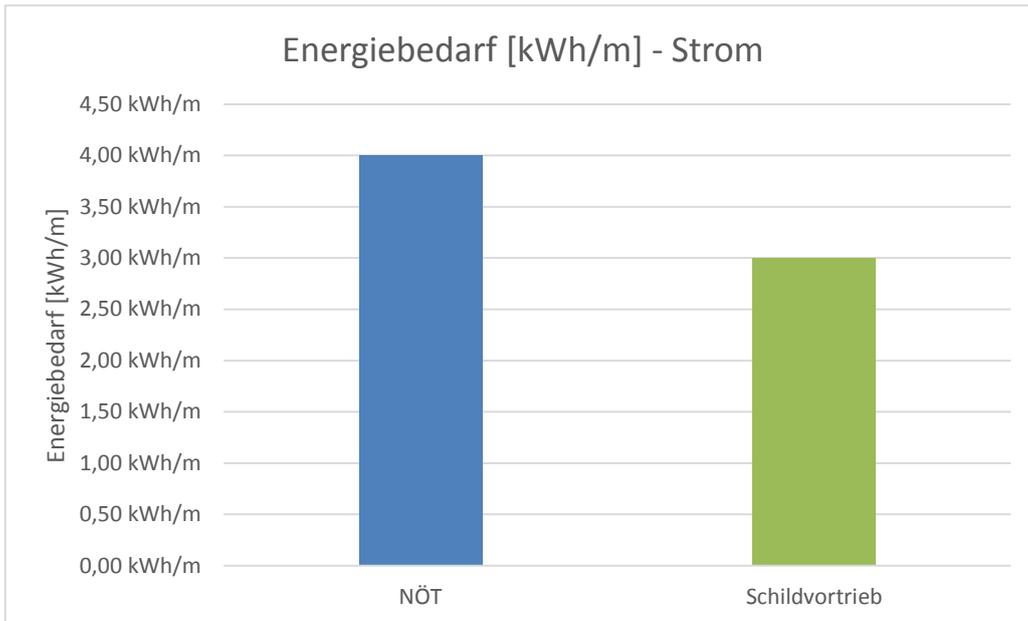


Abbildung 70: Vergleich des Energiebedarfs - Strom

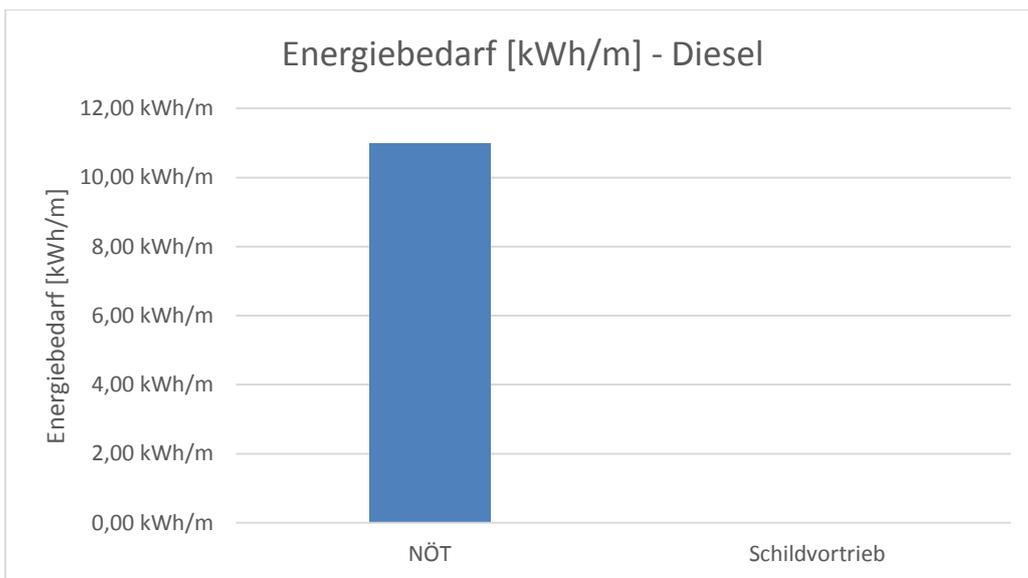


Abbildung 71: Vergleich des Energiebedarfs – Diesel

7.2 Interpretation der Ergebnisse

Abbildung 72 zeigt den Materialbedarf der zwei zu vergleichenden Tunnelbaumethoden. Dieser beinhaltet nicht die Materialmengen für die Herstellung der erforderlichen Baugeräte. Vergleicht man die nun die erforderlichen Betonmengen der eingleisigen Ausführungsvarianten der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode und des Schildvortriebs, zeigt sich, dass bei der Herstellung des Tunnels mittels NÖT wesentlich mehr Beton erforderlich ist. Die Begründung dafür ist in Abbildung 55 zu finden. Um die Standsicherheit des Untergrundes während des Vortriebs und einen guten Untergrund für die tragende Innenschicht aus Ortsbeton sicherzustellen, wird bei der NÖT eine Außenschicht aus Spritzbeton erstellt. Zusätzlich gibt es im Bereich der Ortsbrust eine Stützung mittels Suspension, die jedoch in den Berechnungen nicht berücksichtigt wird, da sie bei beiden Methoden in vergleichbarem Ausmaß erforderlich ist.

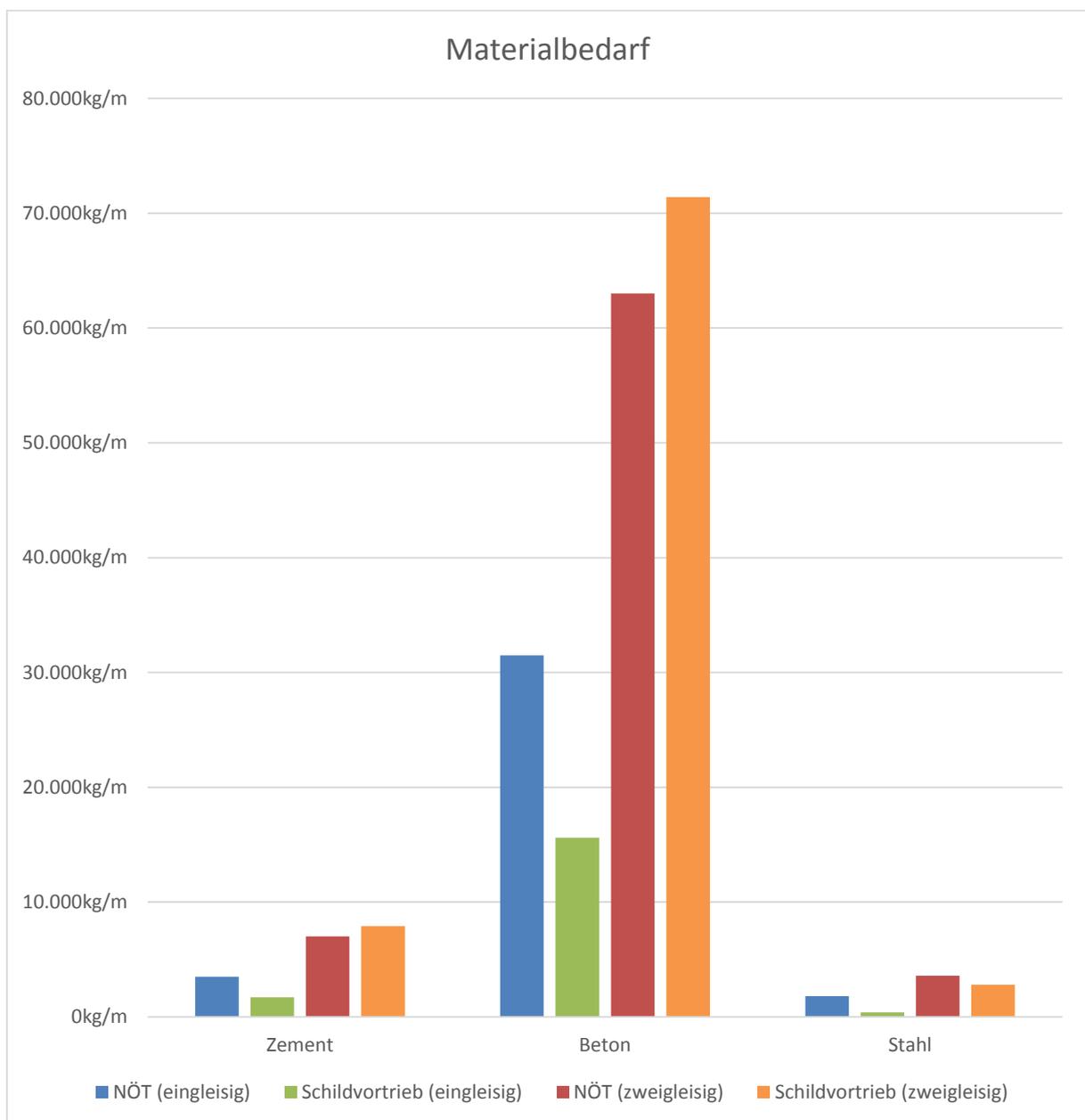


Abbildung 72: Vergleich des Materialbedarfs aller Methoden

Konzentriert man sich nun auf die errechneten Werte der erforderlichen Betonmengen für die zweigleisigen Varianten, so stellt sich heraus, dass hierbei beim Schildvortrieb größere Betonmengen für den Bau erforderlich sind. Dies liegt an der Ausführung der Führung der Gleisebenen, die in Abbildung 58 zu finden ist. Es befindet sich eine zusätzliche Tragkonstruktion mittig, damit die Züge in zwei Ebenen fahren können. Dies hat einen großen Einfluss auf die notwendigen Betonmengen und in weiterer Linie auf die erforderlichen Zementmengen, die für die Betonherstellung erforderlich sind.

Die erforderlichen Zementmengen sind rein von den notwendigen Betonmengen abhängig und stehen somit im direkten Verhältnis zu diesen.

Bezieht man sich nun auf die ermittelten Stahlmengen, so sieht man in Abbildung 72, dass für die Ausführung mittels Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode größere Stahlmengen erforderlich sind. Dies liegt daran, dass ein wesentlich größerer Aufwand für die Standsicherheit während des Baggervortriebs mittels Gitterbögen sowie Vorpfändnägel betrieben werden muss. Die genaue Ermittlung dieser Mengen ist in Absatz 5.4 zu finden.

Abbildung 73 zeigt den notwendigen Energiebedarf für die Herstellung der erforderlichen Materialien, ohne Berücksichtigung des Energiebedarfs der erforderlichen Baugeräte.

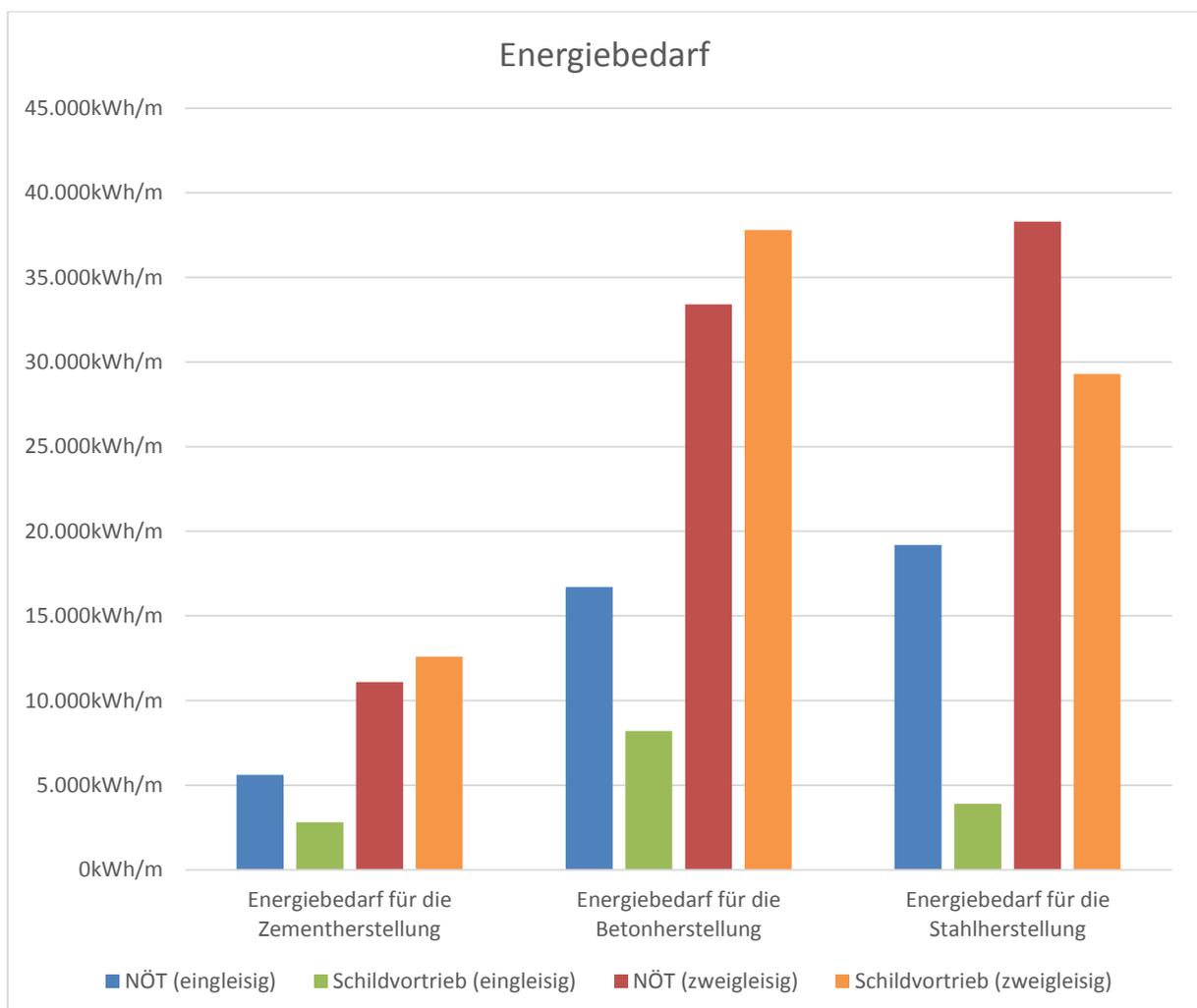


Abbildung 73: Vergleich des Energiebedarfs aller Methoden

Für die Ermittlung dieser in Abbildung 73 dargestellten Werte war es notwendig herauszufinden, wieviel Leistung notwendig ist, um ein Kilogramm des geforderten Materials herzustellen. Wie sich die genaue Leistung ermitteln lässt, wird in Absatz 5.6 mit dem Begriff „Graue Energie“ gezeigt. Diese Werte liegen im direkten Verhältnis zum erforderlichen Materialbedarf und sind somit gleich zu argumentieren wie die in Abbildung 72 dargestellten Ergebnisse.

Vergleicht man nun den Materialbedarf, der für die Herstellung der erforderlichen Baugeräte notwendig ist, erkennt man, dass der Schildvortrieb ressourcenschonender als die NÖT ist. Dies liegt am Bau des Tunnels mittels Baggervortrieb, bei dessen Herstellung mehr Baugeräte erforderlich sind als bei der NÖT. Dies wird in Abbildung 69 dargestellt.

Der erforderliche Energiebedarf der Baugeräte wird in Abbildung 74 gezeigt. Es ist auf den ersten Blick zu erkennen, dass der Schildvortrieb ressourcenschonender ist. Die errechneten Werte des Energiebedarfs beziehen sich auf einen Meter Tunnel.

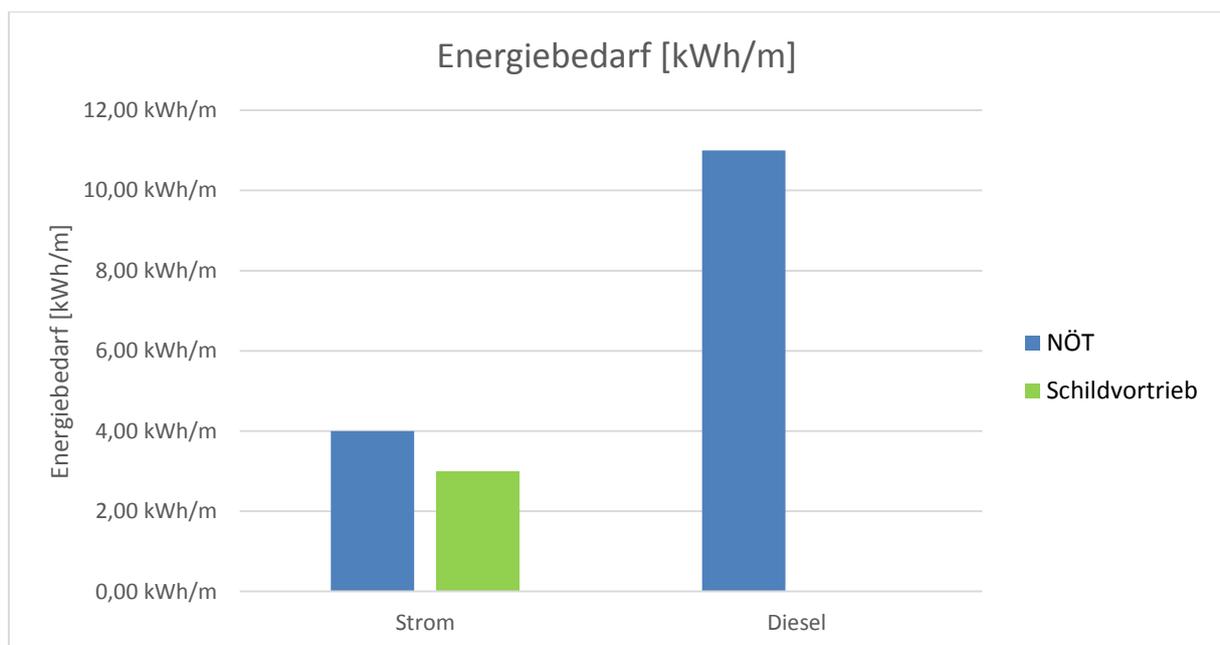


Abbildung 74: Vergleich des Energiebedarfs der erforderlichen Baugeräte

Ausführungsvariante ist dann ressourceneffizienter als die andere, wenn der notwendige Input an Ressourcen geringer ist. Das heißt in unserem Fall, dass beim Vergleich der eingleisigen Varianten der Schildvortrieb ressourceneffizienter als die NÖT ist. Jedoch ergibt sich bei zweigleisiger Ausführung der gegenteilige Effekt: hier ist die NÖT effizienter bezüglich der Ressourcen als der Schildvortrieb.

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

8.1 Zusammenfassung

Im Kontext der geplanten U5-Erweiterung der Wiener Linien sollen verschiedene Tunnelbaumethoden hinsichtlich der oben genannten Aspekte untersucht und verglichen werden. Es soll herausgearbeitet werden, in welchen Punkten sich die Methoden unterscheiden, und welche dieser Punkte im Kontext der U5 relevant sind.

Gezielt sollen die Neue Österreichische Tunnelbaumethode und der Schildvortrieb in ein- und zweigleisiger Ausführung bezüglich ihres erforderlichen Ressourcenbedarfs bearbeitet werden. Der ermittelte Unterschied wird in Tabellen und Diagrammen dargestellt.

In Abschnitt 3 wurden alle notwendigen Grundlagen bezüglich des Ressourcenmanagements und der zu vergleichenden Tunnelbaumethoden erläutert. Welche Maßnahmen unberücksichtigt bleiben und welche in die Berechnungen einfließen, wurden in Abschnitt 5 definiert und schriftlich festgehalten.

In Abschnitt 4 werden die Systemgrenzen der zu vergleichenden Methoden mittels Stoffflussanalyse (STAN) dargestellt. Sie zeigen die notwendigen Inputs, Stoffflüsse, Prozesse und Lager sowie die ermittelten Outputs, die für die Herstellung eines ein Meter langen Tunnelabschnittes erforderlich sind.

Es wird bei der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode von einem Baggervortrieb mit einer flüssigkeitsgestützten Ortsbrust ausgegangen. Die Ortsbrust besteht aus einer 5cm dicken Spritzbetonschicht. Der Tunnelhohlraum wird nach außen hin von einem Tragringsystem sowie von zusätzlichen Sicherungen gegen einbrechenden Untergrund, wie Gitterbögen und Vorpfändnägeln, gestützt. Gitterbögen bestehen aus Stahl und werden noch bevor der Tragringsystem betoniert werden kann, versetzt. Sie schützen den Tunnelinnenraum vor abfallendem Untergrund und dienen u.a. als Montagehalterung für die erforderliche Bewehrung. Der Tragringsystem besteht aus einer 25cm dicken Außenschicht aus Spritzbeton sowie einer Innenschicht aus Ort beton und hat einen Tunnelinnerdurchmesser bei der eingleisigen Ausführung von 5,45m. Die erforderlichen Gitterbögen, Vorpfändnägeln sowie die notwendige Bewehrung sind in Abschnitt 5 genau definiert. Für eine zweigleisige Ausführung mittels Baggervortrieb gab es leider keinerlei Querschnittsprofile zur Verfügung, deshalb erfolgte die Abschätzung der erforderlichen Ressourcen durch Multiplikation mit dem Faktor 2 der bereits errechneten Werte aus eingleisiger Ausführung.

Der Schildvortrieb erfolgt mit einem Mixschild, was bedeutet, dass die Ortsbrust mit einer Flüssigkeit, wie zum Beispiel Bentonit, gestützt wird. Es wird von einer 5cm dicken Bentonit-Schicht ausgegangen, die als Schutz vor einbrechendem Untergrund dient. Von weiteren Stützmaßnahmen wird nicht ausgegangen. Die Schildmaschine bricht einen größeren Tunneldurchmesser aus als erforderlich ist und versetzt kurze Zeit darauf die Tübbinge. Zwischen dem Tragringsystem aus Tübbingungen und dem ausgebrochenen Untergrund ergibt sich ein

sogenannter Ringraum, der mit Verpressmörtel verfüllt wird. Dieser Verpressmörtel wird in den in Punkt 5 angegebenen Berechnungen nicht berücksichtigt. Für die Berechnung des erforderlichen Ressourcenbedarfs der zweigleisigen Ausführungsvariante wurde der in Abbildung 58 gezeigte Querschnitt angenommen. Zusätzliche Maßnahmen und Annahmen entsprechen denen aus eingleisigem Schildvortrieb.

Die genau ermittelten Ressourcenbedarfe für diese zwei ausgewählten Tunnelbaumethoden werden in Abschnitt 5 gezeigt. Es wird auf die erforderlichen Zement-, Beton- und Stahlmengen sowie die notwendigen Energien für die Herstellung dieser Materialien eingegangen und die ermittelten Werte werden übersichtlich in Diagrammen dargestellt.

In Punkt 7 wurden die ermittelten Material- und Energiebedarfe je Baumethode verglichen und interpretiert. Daraus ergab sich folgende Aussage: Zuzugabe den genauen Berechnungen in Abschnitt 5 ergab sich der Tunnelbau mittels Schildvortrieb in eingleisiger Ausführung als ressourceneffizienter. Bei zweigleisiger Ausführung ergab sich jedoch der gegenteilige Effekt: die Tunnelbaumethode mittels NÖT war in zweigleisiger Ausführung ressourcenschonender als der Schildvortrieb. Die Begründung für diese Ergebnisse ist in Punkt 7.2 zu finden.

In Punkt 8.2 wird auf die Empfehlungen, die sich aus der Berechnung ergaben, eingegangen.

8.2 Empfehlungen

Um eine ressourceneffizientere Ausführungsvariante zu finden, müsste man den Querschnitt so klein wie möglich gestalten und das ausgebrochene Material versuchen wieder in den Tunnelausbau einzuarbeiten. Unser Vorschlag diesbezüglich bezieht sich auf die zweigleisige Ausführungsvariante mittels Schildvortrieb. Es wurde versucht den kleinstmöglichen Tunnelinnendurchmesser zu finden, der hier statt den ursprünglich angenommenen 11,30m nur mehr 8,40m beträgt. Zusätzlich wird das abgebaute Material aus der Ortsbrust, die wieder mit Flüssigkeit (Bentonit) gestützt wird, zuerst in eine Separationsanlage befördert und in Untergrund und Stützflüssigkeit getrennt. Beide Bestandteile werden wiederverwendet, die Stützflüssigkeit für die Ortsbruststützung und der abgebaute Untergrund für das Verfüllen des Hohlraums zwischen Gleisebene und Tragrings, der im Vergleich dazu bei der berechneten Variante mit Beton verfüllt wird. Das Untergrundmaterial wird verdichtet und eine wesentlich kleinere Schicht aus Beton wird als Traguntergrund für die Gleisebene betoniert. Die Tübbingstärke wird ebenfalls mit 40cm Dicke angenommen, da keinerlei Berechnungsunterlagen für die Tragringsdicke zur Verfügung stehen. Alle anderen Annahmen werden aus dem berechneten Querschnitt übernommen.

In Abbildung 75 wird die empfohlene Querschnittsform dargestellt.

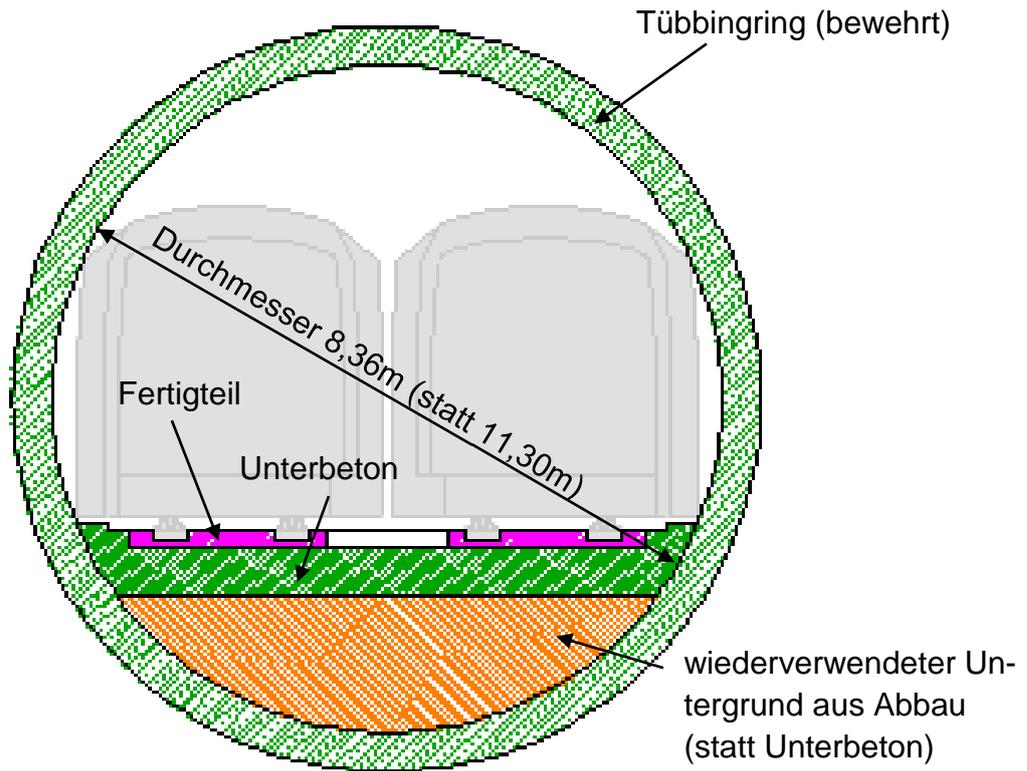


Abbildung 75: Ressourceneffiziente Ausführungsvariante

8.2.1 Systemgrenzen der ressourceneffizienten Ausführungsvariante

Das Ziel in diesem Abschnitt ist es die wichtigsten Prozesse, Stoffflüsse sowie die erforderlichen Inputs und Outputs, die für den Bau eines ein Meter langen Tunnelabschnittes erforderlich sind, hervorzuheben und somit den notwendigen Ressourcenbedarf übersichtlich darzustellen. Dies erfolgt mittels einer Stoffflussanalyse, die in Abbildung 76 gezeigt wird.

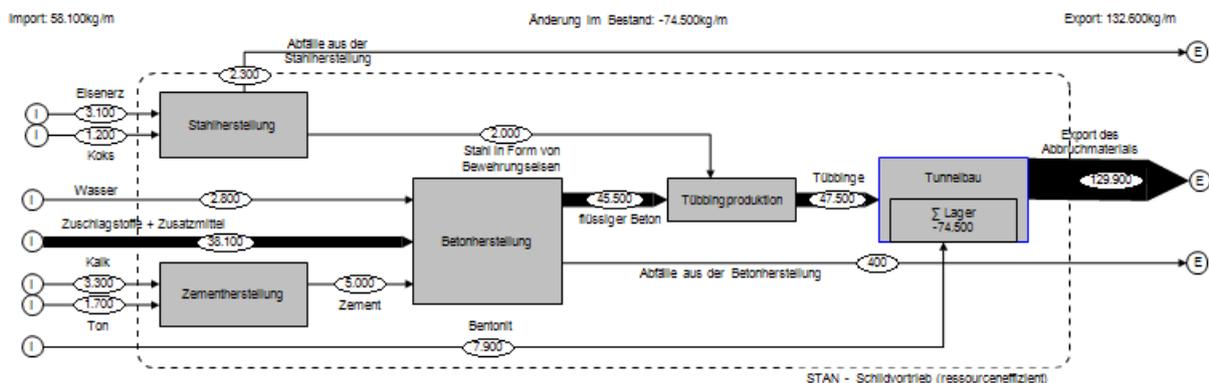


Abbildung 76: STAN – ressourceneffiziente Ausführungsvariante

Der Prozess Tunnelbau besteht aus einem Subsystem, das den Ab- sowie Aufbau von Lagern zeigt und in Abbildung 77 dargestellt ist.

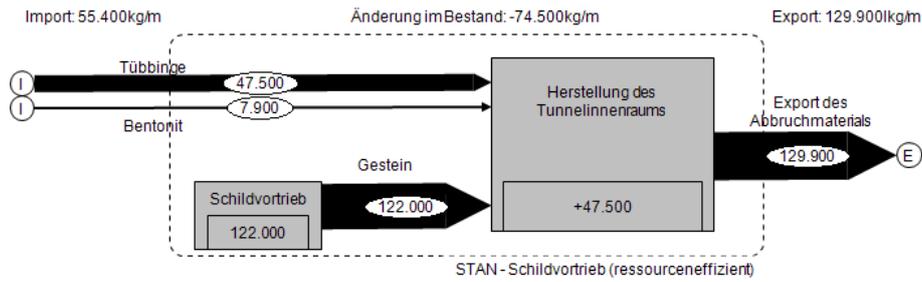


Abbildung 77: STAN - Subsystem für ressourceneffiziente Bauweise

8.2.2 Berechnung des Ressourcenbedarfs der ressourceneffizienten Ausführungsvariante

8.2.2.1 Ermittlung der erforderlichen Betonmengen

Die Ermittlung erfolgt wie jene in Punkt 5.1.4. Die Ergebnisse sind in Tabelle 41 dargestellt.

Tabelle 41: Berechnung der Betonmassen des Tübbingrings für die ressourceneffiziente Ausführungsvariante

Schicht	Fläche [m ²]	Dichte Beton [kg/m ³]	Masse [kg/m]
Tübbingring	14,04	2.400	34.460
Unterbeton	4,60	2.400	11.040

8.2.2.2 Ermittlung der erforderlichen Stoffmengen bei der Betonherstellung

Die Ermittlung der erforderlichen Stoffmengen erfolgt wie in Abschnitt 5.2. Die ermittelten Mengen werden in Tabelle 42 und Tabelle 43 gezeigt.

Tabelle 42: erforderliche Zement-, Wasser-, Fließmittelmengen für die ressourceneffiziente Ausführungsvariante

Betonvolumen [m ³ /m]	Zementmengen [kg/m]	Wassermengen [kg/m]	Fließmittelmengen [kg/m]
18,64	4.940	2.796	1.491

Tabelle 43: erforderliche Zuschlagstoffmengen für die ressourceneffiziente Ausführungsvariante

Betonvolumen [m ³ /m]	Flugaschemengen [kg/m]	Schottermengen [kg/m]
18,64	1.640	35.006

8.2.2.3 Ermittlung der erforderlichen Stoffmengen bei der Zementherstellung

Hier erfolgt die Berechnung nach Abschnitt 5.3. Die berechneten Werte für die erforderlichen Kalk- und Tonmengen sind in Tabelle 44 zu finden.

Tabelle 44: erforderliche Kalk- und Tonmengen für die ressourceneffiziente Ausführungsvariante

Zementmengen [kg/m]	Kalkmengen [kg/m]	Tonmengen [kg/m]
4.940	3.293	1.647

8.2.2.4 Ermittlung der Stahlmengen

Die Berechnung erfolgt wie in Abschnitt 5.4. Die notwendigen Stahlmengen werden in Tabelle 45 gezeigt.

Tabelle 45: Berechnung der Stahlmengen für die ressourceneffiziente Ausführungsvariante

Schicht	Fläche [m ²]	Bewehrungsgrad [kg/m ³]	Stahlmengen [kg/m]
Tübbingring (Dicke 40cm)	14,04	100	1.404
Unterbeton	4,60	120	552

8.2.2.5 Ermittlung der erforderlichen Stoffmengen bei der Stahlherstellung

Die in Tabelle 46 gezeigten Werte entsprechen den erforderlichen Stoffmengen bei der Stahlherstellung und werden nach Abschnitt 5.5 ermittelt.

Tabelle 46: erforderliche Eisenerzmengen für die ressourceneffiziente Ausführungsvariante

Stahlmengen [kg/m]	Eisenerzmengen [kg/m]	Koksmengen [kg/m]
1.956	3.130	1.174

8.2.2.6 Ermittlung des Energiebedarfs

Die Ermittlung des Energiebedarfs für die Zement-, Beton- und Stahlherstellung erfolgt nach Abschnitt 5.6 und wird in Tabelle 47 gezeigt.

Tabelle 47: Energiebedarf für die Herstellung erforderlicher Ressourcen für die ressourceneffiziente Ausführungsvariant

Prozess	Mengen [kg/m]	Energiebedarf [kWh/m]
Zementherstellung	4.940	7.904
Betonherstellung	45.500	24.115
Stahlherstellung	1.956	20.734

8.2.3 Vergleich der ressourceneffizienten mit der berechneten, zweigleisigen Ausführungsvariante

In diesem Kapitel erfolgt der Vergleich und somit auch der Beweis, dass die empfohlene Ausführungsvariante tatsächlich ressourcenschonender ist. Die errechneten Werte für den Ressourcenbedarf werden in Tabelle 48 und gezeigt.

Tabelle 48: Vergleich des Materialbedarfs des Schildvortriebs (zweigleisig) und der ressourceneffizienten Ausführungsvariante

Ressourcen	Schildvortrieb (zweigleisig)	Schildvortrieb (zweigleisig) - ressourceneffiziente Bauweise
Zement	7.900kg/m	5.000kg/m
Beton	71.400kg/m	45.500kg/m
Stahl	2.800kg/m	2.000kg/m

Die berechneten Werte aus der Tabelle 48 werden in Abbildung 78 dargestellt.

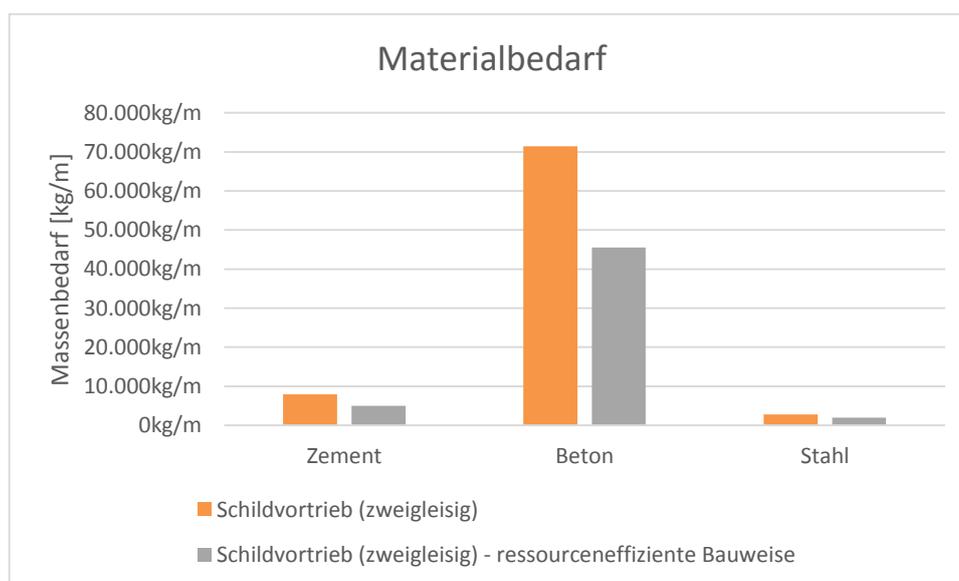


Abbildung 78: Vergleich des Materialbedarfs

In Tabelle 49 wird der Vergleich des zweigleisigen Schildvortriebs mit der ressourceneffizienten Ausführungsvariante bezüglich des erforderlichen Energiebedarfs geführt.

Tabelle 49: Vergleich des Energiebedarfs des Schildvortriebs (zweigleisig) und der ressourceneffizienten Ausführungsvariante

Ressourcen	Schildvortrieb (zweigleisig)	Schildvortrieb (zweigleisig) - ressourceneffiziente Bauweise
Energiebedarf für die Zementherstellung	12.600kWh/m	7.900kWh/m
Energiebedarf für die Betonherstellung	37.800kWh/m	24.100kWh/m
Energiebedarf für die Stahlherstellung	29.300kWh/m	20.700kWh/m

Aufgrund der errechneten Werte für die ressourceneffiziente Ausführungsvariante ergibt sich der in Abbildung 79 gezeigte Energiebedarf. Er wird mit der zweigleisigen Schildvortriebsvariante verglichen.

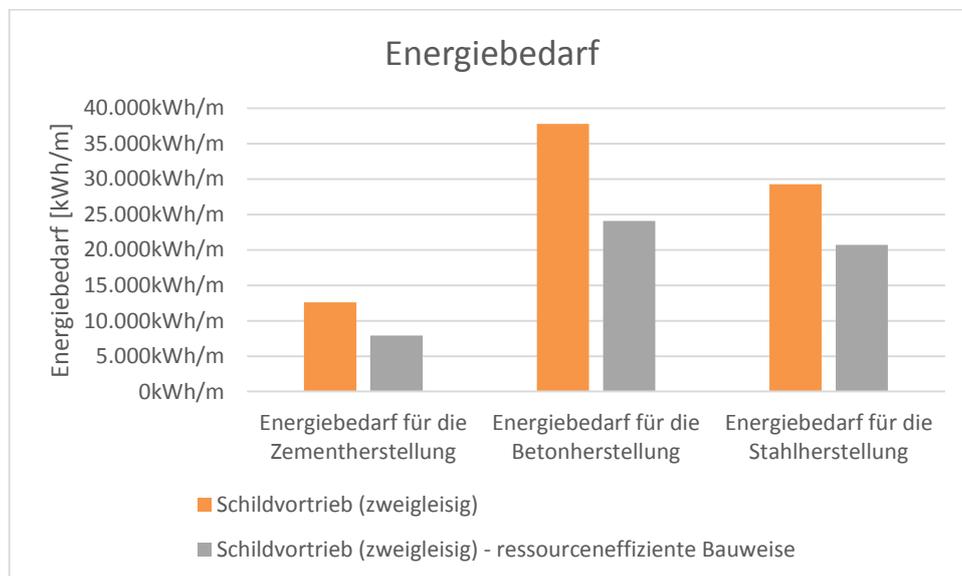


Abbildung 79: Vergleich des Energiebedarfs

9 Literaturverzeichnis

- [1] P. PANOVA, „Ressourcenbedarf der erforderlichen Baugeräte im innerstädtischen U-Bahnbau,“ Wien, 2014.
- [2] B. MAIDL, M. HERRENKNECHT, U. MAIDL und G. WEHRMEYER, Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, 2. Auflage, Berlin: Ernst&Sohn, 2011.
- [3] „nextroom,“ [Online]. Available: <http://www.nextroom.at/event.php?id=13452>. [Zugriff am 25. September 2014].
- [4] „Energie- und Ressourcen-Management GmbH,“ [Online]. Available: http://www.energie-ressourcen.ch/?page_id=79. [Zugriff am 24. September 2014].
- [5] Ö. W.-. u. Abfallwirtschaftsverband, *Wasser Abfall Regelwerk*, Wien: Selbstverlag des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, Wien, 2003.
- [6] BACCINI und BRUNNER, 1991.
- [7] H. RECHBERGER, *Urbaner Stoffhaushalt VU*, 2014.
- [8] H. G. JODL und W. AMON, Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau (Tunneling Construction Methods), 2014.
- [9] G.-M. VAVROVSKY, Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode im Spannungsfeld zwischen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit, Salzburg, 1995.
- [10] F. QUELLMETZ, Die Neue Österreichische Tunnelbauweise.
- [11] G. GIRMSCHEID, Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus, 3.Auflage, Ernst & Sohn GmbH & Co.KG., 2013.
- [12] ÖNORM B2203-1, Ausgabe 01.12.2001.
- [13] JODL, ALTINGER, BICHLER, KRIEBAUM und SCHLOSSER, Betonkalender, 2005.
- [14] GIRMSCHEID, Betonkalender, 2005.
- [15] H. BALTHAUS, H.-W. DORGARTEN und B. BILLIG, Betonbaukalender, 2005.

- [16] [Online]. Available:
<https://www.herrenknecht.com/de/produkte/kernprodukte/tunnelling-pipelines/doppelschild-tbm.html>. [Zugriff am 21 August 2014].
- [17] [Online]. Available:
<https://www.herrenknecht.com/de/produkte/kernprodukte/tunnelling-pipelines/einfachschild-tbm.html>. [Zugriff am 21 August 2014].
- [18] [Online]. Available:
<https://www.herrenknecht.com/de/produkte/kernprodukte/tunnelling-pipelines/teilschnittmaschine.html>. [Zugriff am 21 August 2014].
- [19] Brandl, 2006.
- [20] MAIDL, 1994.
- [21] „Herrenknecht,“ [Online]. Available:
<https://www.herrenknecht.com/de/produkte/kernprodukte/tunnelling-pipelines/mixschild.html>. [Zugriff am 11 September 2014].
- [22] D. ADAM, P. DRUCKER und V. OSTERMANN, *3. Tunnelbau im Festgestein und Lockergestein (2. Auflage)*, 2010.
- [23] [Online]. Available:
<https://www.herrenknecht.com/de/produkte/kernprodukte/tunnelling-pipelines/epb-schild.html>. [Zugriff am 21 August 2014].
- [24] G. W. B. Maild, *Taschenbuch für den Tunnelbau*, 1999.
- [25] Herrenknecht. [Online]. Available:
<https://www.herrenknecht.com/de/produkte/zusatzequipment/vortrieb-logistik/abbauwerkzeuge.html>. [Zugriff am 15. September 2014].
- [26] K. Sybille, Interviewee, *Bewehrungsgrad Tübbing*. [Interview]. 9. September 2014.
- [27] [Online]. Available: <http://www.pmi-plast.de/PDF%20PMI%20Prospekte%20alle/s20.pdf>. [Zugriff am 2 September 2014].
- [28] D. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. ADAM und P. DRUCKER, *Grundbau und Bodenmechanik (Studienunterlagen zur Vorlesung)*; 2. Auflage, 2011.
- [29] Smoltczyk, 2001.

- [30] [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCsenstrahlverfahren>. [Zugriff am 3 September 2014].
- [31] „Zeolith-Bentonit-Versand.de,“ Oktober 2012. [Online]. Available: <http://www.zeolith-bentonit-versand.de/download/Datenblatt%20Bentonit%20UF.pdf>. [Zugriff am 16 Oktober 2014].
- [32] I. Z. GmbH, Interviewee, [Interview].
- [33] T. Hammerer, Interviewee, *Dipl.-Ing.*. [Interview]. 9. September 2014.
- [34] „ÖN B 4710-1“.
- [35] „Kirchdorfer Zementwerk,“ [Online]. Available: <http://www.kirchdorfer-zement.at/zementwerk/zementherstellung/>. [Zugriff am 11. Oktober 2014].
- [36] T. RING. [Online]. Available: http://search.obvsg.at/primo_library/libweb/action/dlDisplay.do?vid=ACC&docId=ACC_aleph009459940&afterPDS=true. [Zugriff am 6. Oktober 2014].
- [37] [Online]. Available: http://www.betonstahl.at/wp-content/uploads/2013/09/Baustahlgitter_A_AQ_100611.pdf. [Zugriff am 25. Oktober 2014].
- [38] [Online]. Available: http://www.joerimann.com/informationen/jm-gittertraeger_1314017303.pdf.pdf. [Zugriff am 25. Oktober 2014].
- [39] S. KUNZELMANN, Interviewee, [Interview]. 30. September 2014.
- [40] [Online]. Available: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:FRc0tB-mQtUJ:www.brg-landeck.tsn.at/~andi/hefttexte/4_klasse_chemie/4kl_hefttext_chemie.doc+&cd=3&hl=de&ct=clnk&gl=at&client=firefox-a. [Zugriff am 11. Oktober 2014].
- [41] „Graz Umwelt,“ [Online]. Available: http://www.umwelt.graz.at/cms/dokumente/10171045_4850814/ed4d5701/Geb%C3%A4udeplanung_Graue%20Energie%20in%20Baustoffen.pdf. [Zugriff am 6. Oktober 2014].
- [42] F. d. B. ÖBGL 2009, Gütersloh: Bauverlag BV GmbH, 2009.
- [43] P. PANOVA, Ressourcenbedarf der erforderlichen Baugeräte im innerstädtischen U-Bahnbau, Wien, 2014.

- [44] A. SCHUBERT, „Fachhochschule Potsdam,“ 2011. [Online]. Available: <http://holzmann.fh-potsdam.de/wp-content/uploads/2012/03/Thixschild.pdf>. [Zugriff am 17 Mai 2014].
- [45] H. LAUFFER, Einführung in die neue Richtlinie Spritzbeton, 1998.
- [46] D. SALAMEH, Interviewee, [Interview]. 16. September 2014.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Systemgrenze in STAN (Stoffflussanalyse) [7].....	5
Abbildung 2: Darstellung des Prozesses in STAN [7].....	5
Abbildung 3: Darstellung des Flusses in STAN [7].....	6
Abbildung 4: Darstellung des Lagers in STAN [7].....	7
Abbildung 5: Vortriebsablauf bei der Nöt [8].....	9
Abbildung 6: Zyklus des Sprengvortriebs [11].....	10
Abbildung 7: Tunnelbagger mit 2x45° um die Längsachse schwenkbarem Arm [11]	11
Abbildung 8: Systemskizze – Teilschnittmaschine [11].....	11
Abbildung 9: Systemskizze: Nassspritzverfahren [8].....	13
Abbildung 10: Systemskizze: Trockenspritzverfahren mit ofentrockenen Zuschlägen (links); Trockenspritzverfahren mit naturfeuchten Zuschlägen (rechts) [8].....	13
Abbildung 11: Systemskizzen: Einzelanker (links), Systemanker (rechts) [8].....	15
Abbildung 12: Getriebedielen auf Lücke [8].....	16
Abbildung 13: Vergleich der einschaligen (rechts) und der zweischaligen (links) Tunnelauskleidung [11].....	17
Abbildung 14: Slurryschild von Greathead, patentiert 1874 [2].....	19
Abbildung 15: Flüssigkeitschild von Haag, patentiert 1896 [2].....	19
Abbildung 16: schematischer Aufbau einer Doppelschildmaschine [16].....	23
Abbildung 17: Einfachschild-TBM [17].....	24
Abbildung 18: schematische Darstellung einer Teilschnittmaschine mit mechanischer Ortsbruststützung [18].....	24
Abbildung 19: Systemskizze – Natürliche Stützung [8], [13].....	25
Abbildung 20: Systemskizze – Mechanische Stützung [8], [13].....	25
Abbildung 21: schematische Darstellung eines Druckluftschildes [19].....	26
Abbildung 22: Systemskizze im Grundriss – Druckluftstützung [8], [13].....	26
Abbildung 23: Systemskizze im Schnitt - Druckluftstützung [20].....	26
Abbildung 24: schematischer Aufbau einer Suspensions-Schildmaschine [21].....	27
Abbildung 25: Systemskizze im Grundriss – Flüssigkeitsstützung [8], [13].....	27
Abbildung 26: Systemskizze im Schnitt - Flüssigkeitsstützung [2].....	28
Abbildung 27: schematischer Aufbau eines EPB-Schildes [23].....	28
Abbildung 28: Systemskizze im Grundriss – Erddruckstützung [8], [13].....	28
Abbildung 29: Systemskizze im Schnitt – Erddruckstützung [23].....	29
Abbildung 30: Varianten der Kunststoffprofilabdichtung.....	30
Abbildung 31: Systemskizze – Stahldrahtbürstendichtung.....	30
Abbildung 32: schmales Schälmesser mit eingelassenem Halter im Schneidrad [2]	31
Abbildung 33: schmale Schälmesser mit unterschiedlichem Freiwinkel und Rückenschutz in aufgesetzten Haltern [2].....	31
Abbildung 34: schmale Schälmesser in aufgesetzten Haltern [2].....	31
Abbildung 35: breites Schälmesser mit HM-Streifen als Rückenstutz in aufgesetztem Halter [2].....	32

Abbildung 36: Vierkantstichel (80x80mm), Mixschild [2].....	32
Abbildung 37: Einsatzschema von Stützplatten mit Schneidkanten (links: Einsatz im rolligen Boden; recht: Einsatz im standfesten Boden) [2]	33
Abbildung 38: Botlektunnel, Innendurchmesser 8,65m, einschalig, Druckwasser haltend [2].....	35
Abbildung 39: Ringbau bei der fünfteiligen Tübbingauskleidung mit unten liegendem Schlussstein [2]	36
Abbildung 40: Schematischer Aufbau einer Röhre mit Hexagonalübblingen [2].....	37
Abbildung 41: PM-S 20 mit 20 mm hohen Noppen – leistungsstark gegen Druck und Wasser [27]	39
Abbildung 42: Wasserverdrängung/ Druckluftvortrieb [13].....	40
Abbildung 43: Prinzip der Wasserabsenkung mit Brunnen [28].....	41
Abbildung 44: Systemskizze einer Vakuumentwässerung [28], [29].....	41
Abbildung 45: Systemskizze einer Elektroosmose [28], [29]	42
Abbildung 46: Prinzip einer Wasserabsperrung.....	42
Abbildung 47: Beispiel einer Bodenvereisung im Tunnelbau [28].....	43
Abbildung 48: Systemskizze des Düsenstrahlverfahrens (allgemein) [30]	43
Abbildung 49: Stoffflussanalyse für Nöt	44
Abbildung 50: Subsystem der STAN für Nöt	45
Abbildung 51: Stoffflussanalyse für eingleisigen Schildvortrieb	45
Abbildung 52: Subsystem der STAN für eingleisigen Schildvortrieb.....	46
Abbildung 53: Stoffflussanalyse für zweigleisigen Schildvortrieb.....	46
Abbildung 54: Subsystem der STAN für zweigleisigen Schildvortrieb	47
Abbildung 55: Querschnitt für eine eingleisige Streckenröhre; Darstellung der tragenden Außenschale [32].....	49
Abbildung 56: Regelplan für Tunnelinnenraum der Wiener U-Bahn [33].....	50
Abbildung 57: Tunnelquerschnitt bei eingleisigem Schildvortrieb	52
Abbildung 58: Querschnittsprofil zweigleisige Streckenröhre mittels Schildvortrieb .	53
Abbildung 59: Vergleich des Materialbedarfs für eingleisige Tunnelausführungen...	67
Abbildung 60: Vergleich des Materialbedarfs für zweigleisige Tunnelausführungen	68
Abbildung 61: Vergleich des Energiebedarfs für eingleisige Tunnelausführungen ...	69
Abbildung 62: Vergleich des Energiebedarfs für zweigleisige Tunnelausführungen.	69
Abbildung 63: Vergleich des Materialbedarfs bei der Zementherstellung für eingleisige Tunnelausführungen.....	70
Abbildung 64: Vergleich des Materialbedarfs bei der Zementherstellung für zweigleisige Tunnelausführungen	71
Abbildung 65: Vergleich des Materialbedarfs bei der Betonherstellung für eingleisige Tunnelausführungen.....	72
Abbildung 66: Vergleich des Materialbedarfs bei der Betonherstellung für zweigleisige Tunnelausführungen	72
Abbildung 67: Vergleich des Materialbedarfs bei der Stahlherstellung für eingleisige Tunnelausführungen.....	73

Abbildung 68: Vergleich des Materialbedarfs bei der Stahlherstellung für zweigleisige Tunnelausführungen.....	73
Abbildung 69: Vergleich des Materialbedarfs für die Herstellung der erforderlichen Baugeräte	74
Abbildung 70: Vergleich des Energiebedarfs - Strom	75
Abbildung 71: Vergleich des Energiebedarfs – Diesel.....	75
Abbildung 72: Vergleich des Materialbedarfs aller Methoden.....	76
Abbildung 73: Vergleich des Energiebedarfs aller Methoden	77
Abbildung 74: Vergleich des Energiebedarfs der erforderlichen Baugeräte	78
Abbildung 75: Ressourceneffiziente Ausführungsvariante	81
Abbildung 76: STAN – ressourceneffiziente Ausführungsvariante	81
Abbildung 77: STAN - Subsystem für ressourceneffiziente Bauweise.....	82
Abbildung 78: Vergleich des Materialbedarfs	84
Abbildung 79: Vergleich des Energiebedarfs.....	85