

Diploma Thesis

Start-up and exit operations of shielded tunnel boring machines

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Anfahrvorgänge und Ausfahrvorgänge von geschildeten Tunnelvortriebsmaschinen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Oliver König, BSc

Matr.Nr.: 01610637

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald Goger**

Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Alexander Bender, BSc**

Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement –
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/234-1, A-1040 Wien

Wien, im August 2022



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Für die ausgezeichnete Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Alexander Bender herzlich. Er fand stets Zeit für mich, pflegte ein kollegiales Verhältnis und gab mir wertvolle Ratschläge zum Verfassen dieser Arbeit. Es war ein Vergnügen mit ihm zusammenzuarbeiten.

Darüber hinaus gilt mein Dank den Herren Dipl.-Ing. Robert Goliasch und Dipl.-Ing. Dr. techn. Kurt Hechenblaickner von der STRABAG AG UB 3I International & Tunneling. Sie stellten mir zahlreiche Unterlagen zur Verfügung, führten mit mir etliche Fachgespräche, in deren Verlauf ich wertvolle Anregungen erhielt.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerald Goger bedanken. Dank seiner begeisterten Vortragsweise und der interaktiven Gestaltung seiner Lehrveranstaltungen, hat er meine Leidenschaft für den Tunnelbau erweckt.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Schlagwörter: maschineller Tunnelbau, Anfahr- und Ausfahrvorgänge, Bauverfahren in und außerhalb des Grundwassers, Verfahrensvergleich, Kalkulation

Die gegenständliche Diplomarbeit befasst sich mit verschiedenen Anfahr- und Ausfahrvorgängen von geschildeten Tunnelvortriebsmaschinen. Dabei wird ein Fokus auf Tunnelvortriebe bei drückendem Grundwasser gelegt. Um diese Thematik bestmöglich aufzuarbeiten, wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, welche durch zahlreiche Fachgespräche Ergänzung erfuhr.

Beginnend mit den Grundlagen des maschinellen Tunnelbaus werden ausgewählte Maschinentypen in ihrem Aufbau, ihrer Wirkungsweise und hinsichtlich ihres Einsatzgebietes miteinander verglichen und voneinander abgegrenzt. Für gebräuchliche Maschinentypen werden die von verschiedenen Institutionen vorgeschlagenen Abkürzungen einander gegenüber gestellt. Den Abschluss dieses Grundlagenkapitels bildet die Betrachtung der Tunnelauskleidung mittels Tübbing. Dabei wird auf Problemstellungen durch vorhandene Wasserdrücke eingegangen und geeignete Abdichtungssysteme für Tübbinge vorgestellt.

Im Anschluss erfolgt eine Vorstellung der gängigsten Anfahr- und Ausfahrverfahren. Dabei wird jeweils auf die erforderlichen Konstruktionen, den Verfahrensablauf und die Einsatzmöglichkeit unterhalb des Grundwasserspiegels eingegangen. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Dichtungssysteme gelegt, welche eine Anfahrt bzw. Ausfahrt bei drückendem Grundwasser ermöglichen.

Die beschriebenen Anfahr- und Ausfahrverfahren werden anhand der Bewertungskriterien Herstellungskosten, Bau- und Montagezeit, Verfahrensrisiko, erforderliche Schachtgröße, beanspruchter Platzbedarf der Konstruktionen und gegebene Toleranzanforderungen beurteilt.

Dies ermöglicht einen Vergleich der Verfahren. Darüber hinaus sind die, für die einzelnen Vorgänge geeigneten, Tunnelvortriebsmaschinen aufgezeigt und deren Einsatzgebiet anhand der anzutreffenden Gesteinsart abgegrenzt. Dabei wird wiederum zwischen den Verfahren unterhalb und oberhalb des Grundwasserspiegels unterschieden. Bei Betrachtung der Bewertung sind die geeignetsten Anfahr- bzw. Ausfahrverfahren in Abhängigkeit des Wasserdrucks ersichtlich.

Abschließend wird eine Kalkulation von vier Anfahrvorgängen anhand eines Beispielprojekts durchgeführt. Dabei erfolgt die Anfahrt aus einem Schacht mit einem vorherrschenden Wasserdruck von 3,5 bar. Es werden Anfahrten aus einem Betontopf, sowie mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille kalkuliert. Letztere wird sowohl ohne vorgelagerten Dichtblock, sowie mit vertikal und horizontal hergestelltem Dichtblock untersucht. Im Zuge der Kalkulation erfolgt lediglich die Erfassung sämtlicher verfahrensspezifischer Aspekte. Für jedes dieser Anfahrverfahren wird der Zeitaufwand, welcher zur Errichtung und zum Abbau der benötigten Konstruktionen erforderlich ist, ermittelt und die verfahrensspezifischen Kosten kalkuliert. Neben den Baukosten und der Bauzeit ist der frühestmögliche Regelvortrieb der Tunnelvortriebsmaschine ein entscheidender Faktor bei der Auswahl des am besten geeigneten Anfahrverfahrens. Zu diesem Zweck sind Bauzeitpläne der einzelnen Verfahren erstellt worden. Anhand derer ist die Dauer von Beginn des Schachtaushubs bis zum Regelvortrieb ermittelbar.

Bei mehreren Anfahr- und Ausfahrvorgängen im Zuge eines Tunnelbauprojekts ist die Wiederverwendbarkeit der Konstruktionen ein enormer Kostenfaktor. Dies und andere Überlegungen finden in einer abschließenden Diskussion der Verfahren Einzug.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Keywords: mechanical tunnelling, start-up and exit operations, construction procedures in and out of groundwater, procedure comparison, calculation

This diploma thesis deals with different start-up and exit operations of shielded tunnel boring machines. The focus is put on tunnelling in pressing groundwater. In order to deal with this topic in the best possible way, an extensive literature research was carried out, which was supplemented by numerous technical discussions with experts.

Starting with the basics of mechanical tunnel construction, selected machine types are compared and differentiated from each other in terms of their construction, their mode of operation and their field of application. For common machine types, the abbreviations proposed by various institutions are compared. The conclusion of this chapter is tunnel lining by means of tubings. Problems caused by existing water pressures are discussed and sealing systems for tubing segments are presented.

The most common start-up and exit procedures are presented. In each case, the necessary constructions, the process sequence and the possibility of usage below the groundwater level are discussed. Particular attention is paid to the sealing systems that enable approach and exit in pressurised groundwater.

The described start-up and exit operations are evaluated on the basis criteria of manufacturing costs, construction and installation time, process risk, required shaft size, space required for the structures and given tolerance requirements.

This allows a comparison of these methods. In addition, the suitable tunnel boring machines for the individual processes are shown and their area of application is delimited on the basis of the type of rock to be encountered. In turn, a distinction is made between methods below and above the groundwater table. When considering the evaluation, the best start-up and exit methods are shown depending on the water pressure.

Finally, a calculation of four start-up processes is carried out on the basis of an example project. The approach is carried out from a shaft at a prevailing water pressure of 3.5 bar. The approach from a concrete pot, as well as with a thrust frame and launch goggles are calculated. The latter is examined without a sealing block, as well as with a vertically and horizontally produced sealing block. In the course of the calculation, only all process-specific aspects are recorded. For each of these start-up methods, the time required to erect and dismantle the necessary structures is determined and the method-specific costs are calculated. Besides the construction costs and the construction time, the earliest possible regular drive of the tunnel boring machine is a decisive factor in the selection of the most suitable start-up method. For this purpose, construction schedules of the individual methods are prepared and the duration from the start of shaft excavation to the start of the regular drive is determined.

In the case of several start-up or exit procedures in the course of a tunnel construction project, the reusability of the constructions is an enormous cost factor. Hence, this and some other considerations are included in a final discussion on the procedures.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Motivation	12
1.2	Forschungsfragen	12
1.3	Forschungsmethodik	13
1.4	Begriffsbestimmungen	13
1.5	Abkürzungsverzeichnis	15
2	Grundlagen des maschinellen Tunnelbaus	17
2.1	Geschichtliche Entwicklung des maschinellen Tunnelvortriebs mittels geschichteten Tunnelvortriebsmaschinen	17
2.2	Typisierung der gängigsten Tunnelvortriebsmaschinen	19
2.2.1	Entwicklung der Typisierung	19
2.2.2	Gripper-Tunnelbohrmaschine	22
2.2.3	Tunnelbohrmaschine mit Schild	23
2.2.4	Doppelschildmaschine	24
2.2.5	Flüssigkeitsschild	25
2.2.6	Erddruckschild	28
2.2.7	Hybridschild	29
2.3	Auswahlkriterien und Einsatzbereiche der vorgestellten Tunnelvortriebsmaschinen	31
2.4	Wesentliche Konstruktionselemente einer TVM	35
2.4.1	Abbauwerkzeuge in Abhängigkeit der Geologie	35
2.4.2	Fördereinrichtungen	37
2.4.3	Schildschwanzdichtung und Ringspaltverfüllung	40
2.4.4	Gebirgsinjektionseinrichtungen	43
2.5	Tübbinge	44
2.5.1	Allgemeines	45
2.5.2	Konstruktionsvarianten	48
2.5.3	Abdichtungssysteme	51
2.5.4	Produktionsprozess	53
3	Anfahr- und Ausfahrvorgänge von Schildmaschinen	59
3.1	Anfahrvorgänge bei nicht drückendem GW	59
3.1.1	Anfahrvorgang mittels verankertem Tübbingring	60
3.1.2	Anfahrvorgang mittels Rücksteifkonstruktion und Blindringen	62
3.2	Anfahrvorgänge bei drückendem GW	65
3.2.1	Brillendichtungssysteme der Startbrille	66
3.2.2	Dichtblock	73
3.2.3	Fliegende Schildanfahrt	75
3.2.4	Anfahrt mit vorgelagertem Betontopf	77
3.2.5	Schild Transfer System	80
3.3	Ausfahrvorgänge bei nicht drückendem GW	84

3.4	Ausfahrvorgänge bei drückendem GW	85
3.4.1	Brillendichtungssysteme der Zielbrille	85
3.4.2	Dichtblock	86
3.4.3	Ausfahrt in einen Dichttopf	87
3.4.4	Ausfahrt in einen nachgelagerten Betontopf	88
3.4.5	Schild Transfer System	90
3.4.6	Wassergefüllter Zielschacht	90
3.5	Zusammenfassung der Anfahr- und Ausfahrvorgänge	93
4	Verfahrensvergleich auf Basis baubetrieblicher Kriterien	97
4.1	Detaillierter Vergleich der verschiedenen Anfahr- und Ausfahrverfahren	97
4.1.1	Verfahrensvergleich außerhalb des GW	98
4.1.2	Verfahrensvergleich innerhalb des GW	99
4.2	Auswahl eines Anfahrvorgangs anhand eines Beispielprojekts	101
4.2.1	Allgemeine Projektrandbedingungen	102
4.2.2	Getroffene Kalkulationsannahmen	103
4.2.3	Kalkulation Anfahrvorgang aus einem Betontopf	107
4.2.4	Kalkulation Anfahrvorgang mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille	110
4.2.5	Kalkulation Anfahrvorgang mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und Dichtblock	113
4.2.6	Gegenüberstellung der Kalkulationsergebnisse	117
4.2.7	Diskussion der Kalkulationsergebnisse	119
5	Zusammenfassung und Ausblick	125
5.1	Beantwortung der Forschungsfragen	128
5.2	Ausblick	132

Kapitel 1

Einleitung

Tunnelbauprojekte stehen stets im Fokus der Öffentlichkeit. Dies beginnt bereits bei ersten Trassenüberlegungen. Die Bauausführung, samt sämtlicher Begleiterscheinungen wie Baustellenlärm, Bauverkehr oder sonstige Auswirkungen, wird meist ebenfalls kritisch begutachtet. Häufig erfolgt eine besonders öffentliche Diskussion der Kostenthematik. Der Fokus der breiten Öffentlichkeit wird oft, selbst nach Fertigstellung und Endabrechnungen, im Zuge von etwaigen Sanierungen erneut auf das Tunnelbauvorhaben gelegt. Der Tunnelbau ist eine der umfangreichsten und herausfordernden Tätigkeitsbereiche eines Bauingenieurs¹. Dies liegt nicht ausschließlich am öffentlichen Fokus. Die technischen Herausforderungen und das interdisziplinäre Zusammenwirken stellen ebenfalls wesentliche Ansprüche dar. Das Vorhandensein von Grundwasser erschwert dieses, ohnehin schon anspruchsvolle, Vorhaben zusätzlich. Aus diesem Grund setzt der Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik des Instituts für interdisziplinäres Bauprozessmanagement der Technischen Universität Wien seit Jahren einen Forschungsschwerpunkt auf den Tunnelbau.

Immer häufiger kommen Tunnelvortriebsmaschinen zum Einsatz. Diese haben sich in einer Vielzahl ausgeführter Projekten bewährt. Tunnelvortriebsmaschinen sind bei vielen Tunnelbauprojekten eine kostengünstigere und leistungsfähigere Alternative zur zyklischen Bauweise. Im Laufe der letzten Jahre hat sich das Einsatzgebiet solcher Maschinen stetig erweitert, was einen weiteren Grund für deren verstärkte Anwendung darstellt. Ein Aspekt, welcher bei der Diskussion über den maschinellen Tunnelbau stets zu kurz kommt, ist jener des Anfahr- und Ausfahrvorganges. Die vorliegende Diplomarbeit soll verschiedene Möglichkeiten eben dieser aufzeigen und deren Vorteile, Nachteile sowie Einsatzspektren verdeutlichen. Diese Sequenzen sind von wesentlicher Bedeutung für den Erfolg eines Tunnelprojekts. Etwaige Fehler im Zuge der in dieser Diplomarbeit behandelten Prozesse können zu immensum finanziellen Schaden führen. Stillstände des Baufortschrittes sind eine weitere mögliche Folge des Versagens bei einem Anfahr- oder Ausfahrvorgang.

Von wesentlicher Bedeutung für den Erfolg dieser Vorgänge bei drückendem Grundwasser ist das eingesetzte Dichtungssystem. Dieses soll in gegenständlicher Arbeit ebenfalls näher betrachtet werden. Dabei sind mehrere Faktoren von Bedeutung, beispielsweise deren Wirkungsweise, die einzuhaltenden Toleranzen und die Dimensionierung in Hinblick auf den Wasserdruck.

Zum besseren Verständnis der Anfahr- und Ausfahrvorgänge sind die Grundlagen des maschinellen Tunnelbaus dargelegt. Dabei ist die Nomenklatur der verschiedenen Tunnelvortriebsmaschinen von wesentlicher Bedeutung. Die Kenntnis des Aufbaus und der Funktionsweise der einzelnen Maschinenvarianten dient dem besseren Verständnis der technischen Herausforderungen, die im Zuge eines Anfahr- und Ausfahrvorganges berücksichtigt werden müssen.

¹Der Autor legt großen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wurde jedoch oftmals entweder die maskuline oder feminine Form gewählt. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des jeweils anderen Geschlechts.

1.1 Motivation

Die überwiegende Mehrheit der heutigen Tunnelbauprojekte wird im urbanen Raum errichtet. Diese Projekte zeichnen sich durch die enge Baustellenlogistik, oberflächliche Bebauung und das häufige Vorhandensein von drückendem Grundwasser aus, da die großen Metropolen dieses Planeten überwiegend an wasserreichen Flussläufen situiert sind. Der maschinelle Tunnelbau wird immer häufiger eingesetzt. Laut Experten kommen bei etwa 80% der Tunnelbauprojekte Erddruckschilde zum Einsatz. Tunnelvortriebsmaschinen ermöglichen die Herstellung fortlaufend längerer Tunnel. Potentiellen Störfaktoren dieser Vortriebsart wird fortan mehr Bedeutung zugeschrieben. Folglich gibt es das Bestreben, diese möglichen Defekte in ihren Ursachen aufzuarbeiten und Vorkehrungen zu treffen, um diese tunlichst auszuschließen. Prominente Beispiele für solche fehleranfälligen Prozesse sind die Anfahr- und Ausfahrvorgänge. Diese kommen in der wissenschaftlichen Betrachtung über den maschinellen Tunnelbau jedoch meist zu kurz. Die wesentliche Problematik dieser Vorgänge liegt in den hohen technischen Anforderungen, die an sie gestellt werden. Geringe Toleranzen stellen eine wesentliche weitere Herausforderung dar. Etwaige vorhandene Wasserdrücke erschweren die Einhaltung dieser Spielräume zusätzlich. Darüber hinaus limitieren sie die Anzahl an einsetzbaren Methoden.

Anfahr- und Ausfahrvorgänge stellen die Weichen für einen erfolgreichen Projektverlauf. Daher ist nicht nur die Kenntnis verschiedener Möglichkeiten dieser Vorgänge von Interesse, sondern auch deren Vor- und Nachteile. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit ist eine Gegenüberstellung dieses bewertenden Vergleichs sinnvoll. Häufig sind im Zuge eines Tunnelbauprojekts mehrere Anfahr- und Ausfahrvorgänge zu bewältigen. Dies ist beispielsweise auch beim Bau der Wiener U-Bahn der Fall. Ein solcher Umstand ist bei der Wahl von Anfahr- und Ausfahrvorgängen jedenfalls zu berücksichtigen, da dies positive oder negative Auswirkungen auf die Verfahren hat.

Mittels dieser Diplomarbeit soll eine Grundlage zur Auswahl des best geeigneten Anfahr- und Ausfahrvorganges gelegt werden. Dabei finden alle entscheidenden Überlegungen bei der Auswahl des best geeigneten Verfahrens Eingang. Dies soll dem besseren Verständnis dienen und dabei helfen, dass Störfälle im Zuge dieser Sequenzen möglichst vermieden werden können.

1.2 Forschungsfragen

Im Zuge der Bearbeitung dieser Diplomarbeit gilt es die folgenden Forschungsfragen zu beantworten. Diese geben die Rahmenbedingungen für die zum Einsatz kommende Forschungsmethodik vor:

1. Welche Möglichkeiten zur Charakterisierung von Tunnelvortriebsmaschinen gibt es? Worin unterscheiden sich diese voneinander?
2. Welche Verfahren stehen als Anfahr- und Ausfahrvorgang im Zuge des Tunnelvortriebs mittels Tunnelvortriebsmaschinen zur Verfügung? Unter welchen Rahmenbedingungen können die einzelnen Verfahren jeweils zur Anwendung kommen?
3. Welche Dichtungssysteme gibt es, um Anfahr- und Ausfahrvorgänge vor drückendem Grundwasser zu schützen? Welche Unterschiede in ihrer Wirkungsweise und ihrem Einsatzgebiet weisen diese auf?
4. Kann ein bewertender Vergleich der gefundenen Verfahren nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen? Wie gestalten sich die Kosten der Verfahren in Relation zur Bauzeit?

1.3 Forschungsmethodik

Zur Beantwortung der definierten Forschungsfragen kommen zwei verschiedene Methoden zum Einsatz. Die Grundlagen des maschinellen Tunnelbaus sollen die Basis für die Verständnis, der im weiteren Verlauf behandelten Anfahr- und Ausfahrvorgänge, bilden. Dafür wird eine Literaturrecherche durchgeführt. Diese bildet auch das Fundament für den Vergleich der Entwicklung unterschiedlicher Typisierungen verschiedener Tunnelvortriebsmaschinen. Außerdem ermöglicht diese Recherche eine detaillierte Gliederung der Vortriebsmaschinen. Anhand der Einteilung kann der Unterschied der einzelnen Tunnelvortriebsmaschinen zueinander verdeutlicht werden.

Um ein besseres Verständnis über die gängigen Anfahr- und Ausfahrvorgänge zu erhalten, wird bei der Zusammenstellung dieser nicht nur rein auf eine Literaturrecherche zurückgegriffen. Persönliche Gespräche mit Experten aus der Baupraxis ermöglichen eine Bewertung der gefundenen Methoden und eine Betrachtung der Thematik aus anderen Blickwinkeln.

Bei der Untersuchung verschiedener Dichtungssysteme bildet die Literaturrecherche ebenfalls die Basis. Für ein besseres Verständnis der möglichen Einsatzbereiche wird an verschiedene Firmen herangetreten, welche diese Abdichtungssysteme herstellen und vertreiben. Dadurch soll der interne Firmenwissensstand abgefragt werden, was direkte Rückschlüsse auf den Stand der Technik zulässt.

Die Grundlage des bewertenden Vergleichs der einzelnen Anfahr- und Ausfahrvorgängen bildet wiederum Gespräche mit Experten aus der Praxis. Dabei fließen Erkenntnisse des zuvor Behandelten mit ein. Es gilt sinnvolle Bewertungsgrundlagen zu ermitteln und die verschiedenen Vorgänge anhand dieser miteinander zu vergleichen. Außerdem werden die Kosten von vier ausgewählten Anfahrvorgängen in Relation zur Bauzeit betrachtet. Die Ergebnisse werden in einer Diskussion behandelt.

1.4 Begriffsbestimmungen

Im Folgenden werden einige wesentliche Begriffe erläutert, welche im direkten Zusammenhang mit dem Tunnelbau stehen. Dies soll den einheitlichen Wortgebrauch im Weiteren sicherstellen.

A-Bock Als A-Bock wird eine stählerne Rücksteifkonstruktion bezeichnet, welche bei Anfahr- und Ausfahrverfahren zum Einsatz kommen kann. Eine solche Konstruktion leitet die Vorschubkräfte der Tunnelvortriebsmaschine in den Untergrund ab. Im Englischen ist die Bezeichnung „thrust frame“ gebräuchlich.

Bentonit Als Bentonit wird eine Mischung aus verschiedenen Tonmineralien bezeichnet. Den Hauptbestandteil bildet Montmorillonit, welcher einen Anteil von bis zu 80% ausmachen kann. Dieses Mineral sorgt für die Wasseraufnahme- und Quellfähigkeit des Bentonits.²

Bohrkopf Als Bohrkopf wird die rotierende Vorrichtung zum vollflächigen Abbau des Tunnelquerschnitts einer Tunnelvortriebsmaschine im Festgestein bezeichnet. Die Bestückung mit dem Abbauwerkzeug erfolgt in Abhängigkeit des Gebirges.³

Dichttopf Ein Dichttopf ist eine, meist stählerne Konstruktion, welche bei Ausfahrverfahren einer Tunnelvortriebsmaschine unterhalb des Grundwasserspiegels zur Anwendung kommen kann. Dieser verschließt die Zielbrille frontal und bietet eine zusätzliche Sicherheit vor Wassereintrüben in den Zielschacht.

²Vgl. [68] Silvestre, S. 9 f.

³Vgl. [51] ÖBV, S. 4 ff.

Drucktopf Ein Drucktopf ist ein stählerner Kessel, welcher elementarer Bestandteil des Schild Transfer Systems ist. Er dient als Dichtelement, in den die Tunnelvortriebsmaschine eingeschoben wird.

Düsenstrahlverfahren (DSV) Beim Düsenstrahlverfahren wird eine Lanze in den Boden abgeteuf und das anstehende Erdreich mittels eines Flüssigkeitsstrahls aufgeschnitten. Der gelöste Boden wird mit einer Suspension gemischt, wodurch ein Verfestigungskörper entsteht. Dieser Körper weist eine höhere Festigkeit und eine geringere Wasserdurchlässigkeit auf als der unbehandelte Untergrund.⁴

Festgestein Festgestein ist eine natürliche Ansammlung von Mineralen, welche eine physikalische und chemische Bindung aufweisen. Diese Untergruppe der Gesteine ist der Felsmechanik zugeordnet.⁵

Gebirge Als Gebirge werden große Gesteins- und Felsformationen bezeichnet, welche etwaige Trennflächen und Hohlräume inkludieren. Gebirge ist Teil der Erdkruste.⁶

Gestein Als Gestein wird eine Mineralgesellschaft bezeichnet, welche über eine größere Erstreckung ein gleichartiges Gepräge aufweist. Es erfolgt grundsätzlich eine Unterscheidung zwischen Lockergestein und Festgestein.⁶

Kohäsion Die Kohäsion ist ein entscheidender Scherfestigkeitsparameter von bindigen Böden. Sie ist jener Anteil der Scherfestigkeit, welcher trotz fehlender Normalspannungen vorhanden ist.⁷

Lockergestein Als Lockergestein wird ein Bestand von anorganischen und mineralischen Elementen verstanden, welcher auch organische Komponenten aufweisen kann. Dieses Gestein weist keine nennenswerte chemisch-mineralische Bindung auf. Diese Untergruppe der Gesteine ist der Bodenmechanik zugeordnet.⁵

Nachläufereinrichtung Die Nachläufereinrichtung, auch Nachläufer genannt, ist ein System von Elementen, welches der Ver- und Entsorgung der Tunnelvortriebsmaschine dient. Darüber hinaus ermöglicht sie den Sicherungseinbau. Die Nachläufereinrichtung befindet sich im direkten Anschluss an die Vortriebsmaschine.³

Penetration Als Penetration wird die Eindringung des Abbauwerkzeugs einer Tunnelvortriebsmaschine in die Ortsbrust bezeichnet. Die Maßeinheit ist die Eindringtiefe je Umdrehung des Bohrkopfes [mm/U]. Die Penetration ist von mehreren Maschinen- und Gebirgsparametern abhängig.⁸

Redundanz Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Redundanz als Forderung verstanden. Diese ist gewährleistet, wenn es mindestens zwei unabhängige und jeweils für sich alleinstehend wirksame Dichtungssysteme gibt. Ein Versagen des einen Systems beeinflusst das andere nicht.⁹

Ringspalt Als Ringspalt wird jener Raum bezeichnet, welcher sich zwischen dem Gebirge und der Tübbingaußenschale befindet.¹⁰

⁴Vgl. [4] BAUER Maschinen GmbH

⁵Vgl. [53] ÖGG, S. 5

⁶Vgl. [1] Adam, S. 3 Kapitel 1

⁷Vgl. [2] Adam, S. 11 Kapitel 2

⁸Vgl. [29] Girmscheid, S. 458

⁹Vgl. [67] Schwarz et al.

¹⁰Vgl. [54] ÖNORM B 2203-2: 2022-01-15, S. 7 f.

Rock Quality Designation (RQD) Der RQD-Index gibt Auskunft über den Durchtrennungsgrad des Gebirges. Der RQD-Wert errechnet sich als Quotienten aus der Länge der Einzelprobenkörper, welche mindestens 10 cm aufweisen und der gesamten Probenlänge.¹¹

Schneidrad Als Schneidrad wird die rotierende Vorrichtung zum vollflächigen Abbau des Tunnelquerschnitts einer Tunnelvortriebsmaschine im Lockergestein bezeichnet. Die Bestückung mit dem Abbauwerkzeug erfolgt in Abhängigkeit des Gebirges.³

Start- bzw. Zielbrille Die Start- und Zielbrille sind ringförmige stählerne Konstruktionen, welche die Anfahrt bzw. Ausfahrt einer Tunnelvortriebsmaschine unterhalb des Grundwasserspiegels ermöglichen. An ihnen ist das Dichtungssystem installiert, welches den Schild der Vortriebsmaschine abdichtet und einen Wassereintrich in die Anfahrt- bzw. Ausfahrtsituation verhindert.

Tübbing Tübbinge sind flächige Fertigteilelemente, welche im Inneren des Tunnels zu einem tragfähigen Tübbingring zusammengefügt werden und der Auskleidung dienen.¹⁰ Diese sind meist aus Stahlbeton hergestellt.³

Tunnelvortriebsmaschine (TVM) Eine Tunnelvortriebsmaschine ermöglicht den mechanischen Abbau von Locker- und Festgestein.³ Diese vereinen die Tätigkeiten des Lösens, Ladens und Sicherns. Tunnelvortriebsmaschinen werden in Tunnelbohrmaschinen und Schildmaschinen unterteilt.¹⁰

Verpressanker Als Verpressanker wird ein Element bezeichnet, welches eine eingeleitete Zugkraft in eine tragfähige Schicht des Untergrundes ableitet. Ein solcher Anker besteht aus einem Ankerkopf, einer freien Ankerlänge und einer Krafteinleitungslänge.¹²

1.5 Abkürzungsverzeichnis

DAUB Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V

TBM-DS Doppelschildmaschine

DSV Düsenstrahlverfahren

EPB Erddruckschild

EPDM Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk

TBM-A Erweiterungstunnelbohrmaschine

GOK Geländeoberkante

GW Grundwasser

HYS Hybridschild

KSM Kombinationsschildmaschine

RMR-System Rock Mass Rating System

SLS Flüssigkeitsschild

¹¹Vgl. [29] Girmscheid, S. 426

¹²Vgl. [56] ÖNORM EN 1537: 2015-10-15, S. 14

SM Schildmaschine

SM-T Schildmaschine mit Teilschnittabbau

SM-V Schildmaschine mit Vollschnittabbau

STS Schild Transfer System

TBM Tunnelbohrmaschine

TBM-O offene Tunnelbohrmaschine

TBM-S Tunnelbohrmaschine mit Schild

TVM Tunnelvortriebsmaschine

Kapitel 2

Grundlagen des maschinellen Tunnelbaus

In diesem Kapitel soll zunächst die Entstehung des maschinellen Tunnelbaus beschrieben werden. Dabei wird der Fokus auf die Herausforderungen gelegt, welche mit der Errichtung eines Tunnels unterhalb des Grundwasserspiegels einhergehen und die Vorläufer heute gängiger Verfahren zur Wasserhaltung systematisch dargestellt. Anschließend wird die Entwicklung der Typisierung von Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) betrachtet, wobei – darauf aufbauend – die geläufigsten Maschinenvarianten im Vollschnittverfahren hinsichtlich ihrer Funktionsweise und ihres Aufbaus erläutert werden. Im nächsten Schritt sind die Auswahlkriterien für die Wahl einer TVM angeführt und die Einsatzbereiche der zuvor vorgestellten Maschinenvarianten in Abhängigkeit der anzutreffenden Gesteinsart und der Größe ausgewählter Bodenkennwerte abgegrenzt. In Ergänzung zur Beschreibung der TVM werden wesentliche Konstruktionselemente näher im Detail beschrieben. Den Abschluss bildet ein Unterkapitel über die Tunnelauskleidung mittels Tübbing und den wesentlich zu beachtenden Anforderungen.

2.1 Geschichtliche Entwicklung des maschinellen Tunnelvortriebs mittels geschichteten Tunnelvortriebsmaschinen

Die ersten Tunnelbauten wurden vor etwa 5000 Jahren errichtet. Der Nutzen variierte vom Ziel des Schutzes von Menschen oder Gütern zu verborgenen Zugängen, dem Abbau von Ressourcen bis hin zur Reduktion von Transportzeiten. Solche Tunnel sind nicht nur in Festgesteinen, sondern auch in Lockergesteinen oder in nachbrüchigem Gebirge errichtet worden. Dabei fungierte meist ein Holzverbau zur primären Abstützung des Gesteins, welches anschließend mittels Mauerwerk ausgekleidet wurde. Diese Bauweise ermöglichte auch eine Errichtung bei leichtem Kluft- oder Sickerwasser bis ins 19. Jahrhundert. Die Herstellung eines Tunnels unterhalb des Grundwasserspiegels in Lockergestein oder unterhalb von Gewässern war jedoch zu dieser Zeit nicht möglich.¹³

Heute werden für solche Anforderungen hauptsächlich Schildmaschinen verwendet. Als wichtigste Person in der Entwicklung des Schildvortriebs ist der französisch-britische Ingenieur Sir Marc Isambard Brunel zu nennen. Marc Brunel wurde im Jahre 1769 in der französischen Normandie geboren und verstarb 1849 im Alter von 80 Jahren in London, wo sich auch sein Grabmal befindet.¹⁴ Als Ausgangspunkt seiner Entwicklung diente der Ausbau einer Brücke über die Newa im russischen St. Petersburg, welche im Zuge der jährlichen Schneeschmelze von Treibeis an den Brückenpfeilern beschädigt wurde. Brunel plante einen Tunnel unter der Newa, um die jährliche Beschädigung zu vermeiden. Er entschied sich allerdings dagegen und schlug eine Hängebrücke als Lösung vor. Zur Ausführung kam keiner seiner Vorschläge, jedoch war seine Idee eines Tunnelschildes geboren.¹⁵

¹³Vgl. [49] Maidl et al., S. 17 f.

¹⁴Vgl. [48] Maidl, S. 181 ff.

¹⁵Vgl. [48] Maidl, S. 21 ff.

Aus dieser anfänglichen Idee Brunels folgte im Jahr 1818 ein Patent einer Schildkonstruktion. Dabei handelte es sich um ein rechteckiges Schild, welches in drei übereinanderliegende Reihen aus je zwölf einzelnen Kammern unterteilt war. Diese Zellen ermöglichten es 36 Bauarbeitern simultan, geschützt und ungestört am Tunnelvortrieb zu arbeiten. Brunel entwarf zwei verschiedene Systeme dieses Schildes. Bei der ersten Variante konnte man die Schildkonstruktion lediglich im Ganzen mittels Hydraulikpressen nach vorne verschieben. Die zweite Modifikation ermöglichte ein separates Voranpressen der einzelnen Zellen.¹⁵

Moderne Vollschilde beruhen auf dem ersten der beiden Systeme. Das letztgenannte System kam nie zur vollständigen Entwicklung, jedoch kann man das Messerschild als eine Entwicklung auf dessen Grundlage betrachten. Der Vortriebsprozess startete, indem Firstpfähle mittels Spindeln in die Ortsbrust gepresst werden, dies dient dem Schutz vor hereinbrechenden Gesteinsbrocken. Im Anschluss wurden die Firstbretter der Ortsbrust, von oben startend, entfernt und die Ortsbrust auf eine Tiefe von etwa 15 Zentimetern (6 Zoll) abgegraben. Im Anschluss erfolgte der Verbau der Ortsbrust erneut mit den Brettern, welche von Spindeln gestützt wurden. Den Hydraulikpressen, welche das gesamte Schild nach vorne pressten, fungierte die hinter dem Schild befindliche Tunnelauskleidung als Widerlager. Diese wurde im Zuge des Baufortschrittes stetig mitgemauert. Zum Einsatz kam die von Brunel entwickelte Schildkonstruktion das erste Mal im Jahr 1825 beim Bau des Themsetunnels. Die Arbeiten gestalteten sich als äußerst anspruchsvoll, da es der erste Tunnel war, der einen Fluss unterquerte. Im Laufe der bis 1843 dauernden Bauphase kam es zu zahlreichen Wassereintrüben, aus welchen eine derartig lange Bauzeit resultierte. Der erste Wassereintrub ereignete sich knapp zwei Jahre nach Baubeginn und führte zu einem Stillstand der Bauarbeiten. Als mögliche Lösung schlug Jean-Daniel Colladon per Brief an Marc Brunel den Einsatz von Druckluft vor. Dieser entschied sich jedoch dagegen.¹⁵

Die Wasserhaltung bei Tunnel im Lockergestein unterhalb des Grundwasserspiegels blieb bis ins Jahr 1830 ungelöst. Dies änderte sich, als Admiral Sir Thomas Cochrane eine Druckluftschleuse entwickelte. Dadurch war es den Mineuren möglich, in eine unter höherem Druck stehende Abbaukammer an der Ortsbrust zu gelangen. Das erste Mal in der Praxis eingesetzt wurde der Vortrieb mit Druckluft nahezu zeitgleich im belgischen Antwerpen 1879 und im Jahr 1880 im amerikanischen New York. Die Tunnelvortriebe erfolgten jedoch ohne Schildkonstruktion. Zur Kombination der Druckluftbauweise mit einem Tunnelschild kam es im Jahr 1886, als James Henry Greathead diese Systeme beim U-Bahnbau in London miteinander verband. Dies war der Start von Druckluftschilden, welche eine wesentliche Verbesserung beim Bau von Tunnel in wasserführenden Bodenschichten darstellten.¹⁶

Als nächste Weiterentwicklung des Tunnelvortriebs wurde eine Maschine entwickelt, bei welcher der händische Abbau des Gesteins durch einen maschinellen Vorgang ersetzt worden war. Eine solche TVM patentierten im Jahr 1876 die beiden englischen Brüder John Dickinson Brunton und George Brunton. Die Maschine war mit einem halbkugelförmigen Schneidkopf ausgestattet, welcher aus mehreren Platten zusammengesetzt war. Das geförderte Gesteinsmaterial fiel in Förderkübel, welche in der Tunnelachse angeordnet waren. Von dort wurde das gelöste Material auf ein Förderband verfrachtet und anschließend aus dem Tunnel gefördert.¹⁶

Die oben beschriebenen Druckluftschilde gerieten bei Böden mit höherer Durchlässigkeit an ihre Grenzen. Aus diesem Grund entwickelte abermals James Greathead im Jahr 1874 ein neues System. Bei dieser Methode wurde die Ortsbrust mittels einer Flüssigkeit vor dem Einbrechen gestützt. Das anstehende Erdreich sollte durch Zirkulation der Flüssigkeit gelöst und gefördert werden. Es dauerte jedoch bis zum Jahre 1959 bis Elmer C. Gardner als erster einen Tunnel mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust errichtete. Im darauffolgenden Jahr wurde erstmals der Begriff der aktiven Ortsbruststützung mittels Bentonitsuspension von Alfred Schneiderei eingeführt.

¹⁶Vgl. [49] Maidl et al., S. 19 ff.

Das Patent für die stabilisierende Wirkung von sich unter Druck befindlichem Bentonit sicherte sich Johannes (Hans) Lorenz.¹⁶

Die ersten Konzepte von Erddruckschilden wurden erst im Jahr 1963 von der japanischen Firma Sato Kogyo Company Ltd., auf Grundlage eines Schraubenschildes von Marc Brunel, erstellt. Diese Schilde sollten das Auffahren von Tunneln in weichen Böden unterhalb des Grundwasserspiegels ermöglichen. Die Notwendigkeit der Entwicklung solcher Erddruckschilde ergab sich aus den strengen geltenden Umweltschutzregelungen und Gesetzen, die schon zur damaligen Zeit in vielen großen Städten Japans galten. Diese regelten die Verschmutzung des Grundwassers oder der Luft, sowie die Deponierung des gelösten Erdreichs und stellten spezielle Arbeitnehmerschutzanforderungen bei Arbeiten unter Druckluft. Obwohl Schilde mit druckluft- oder flüssigkeitsgestützter Ortsbrust in der Praxis erprobt waren, konnten sie diese Bestimmungen nicht erfüllen.¹⁶

2.2 Typisierung der gängigsten Tunnelvortriebsmaschinen

Im Folgenden wird zunächst die Adaptierung der Bezeichnungen verschiedener TVM und dahinterstehender Grundgedanken beschrieben. Anschließend werden die bedeutendsten Vollschnittmaschinentypen hinsichtlich ihres Aufbaus, ihrer Funktionsweise und des Anwendungsspektrums näher beschrieben. Dabei kann bei jenen Maschinentypen mit aktiver Stützung der Ortsbrust die Weiterentwicklung des Grundgedankens der historischen Maschinen, welcher bereits in *Kapitel 2.1 – Geschichtliche Entwicklung des maschinellen Tunnelvortriebs mittels geschichteten Tunnelvortriebsmaschinen* erläutert wurde, beobachtet werden.

2.2.1 Entwicklung der Typisierung

Am 15.01.2022 ist eine neue Version der ÖNORM B 2203-2: 2022-01-15 [54] vom Austrian Standards Institute ausgegeben worden. Diese ersetzt die bis dahin gültige Fassung aus dem Jahre 2005. In den Begriffsbestimmungen werden TVM nach wie vor in Tunnelbohrmaschinen (TBM) und Schildmaschinen (SM) untergliedert. Die Untergliederung der TBM in die offene Tunnelbohrmaschine (TBM-O), Tunnelbohrmaschine mit Schild (TBM-S), Doppelschildmaschine (TBM-DS) und Erweiterungstunnelbohrmaschine (TBM-A) unterscheidet sich ebenfalls nicht von der ursprünglichen Version. Die Unterteilung der SM erfolgt anhand der Art der Ortsbruststützung. Dabei finden die mechanische Ortsbruststützung, die Druckluftstützung, die Flüssigkeitsstützung (SLS) und die Erddruckstützung (EPB) Erwähnung. Die bedeutendsten Varianten der Ortsbruststützung sind die Flüssigkeitsstützung und die Erddruckstützung.^{17, 18}

Oft erfolgt die Einteilung der verschiedenen TVM auf Grundlage der *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen* [15] aus dem Jahr 2010 des Deutschen Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V (DAUB). Gemäß dieser Empfehlung werden TVM in TBM, TBM-DS, SM und Kombinationsschildmaschinen (KSM) unterteilt. Die Gruppe der TBM setzen sich aus TBM-O, TBM-A und TBM-S zusammen und findet zumeist im Festgestein Anwendung. SM werden nach der Art ihres Ortsbrustabbaus in Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (SM-V) und Schildmaschinen mit Teilschnittabbau (SM-T) untergliedert. Sie finden ihre Anwendung vor allem im Lockergestein und eignen sich für den Einsatz im Grundwasser (GW). SM-V und SM-T sind nach Art ihrer Ortsbruststützung eingeteilt. Die Ortsbrust einer SM-V kann als Ortsbrust ohne Stützung (SM-V1), Ortsbrust mit mechanischer Stützung (SM-V2), Ortsbrust mit Druckluftstützung (SM-V3), Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-V4) oder Ortsbrust

¹⁷Vgl. ÖNORM B 2203-2: 2022-01-15 [54]

¹⁸Diese Handhabung der ÖNORM ist in gegenständlicher Diplomarbeit angewandt.

mit Erddruckstützung (SM-V5) gesichert werden. Eine SM-T kann mit Ortsbrust ohne Stützung (SM-T1), Ortsbrust mit Teilstützung (SM-T2), Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung (SM-T3) oder als Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-T4) realisiert werden.¹⁹ Eine Übersicht dieser Einteilung ist in Abb. 2.1 ersichtlich.

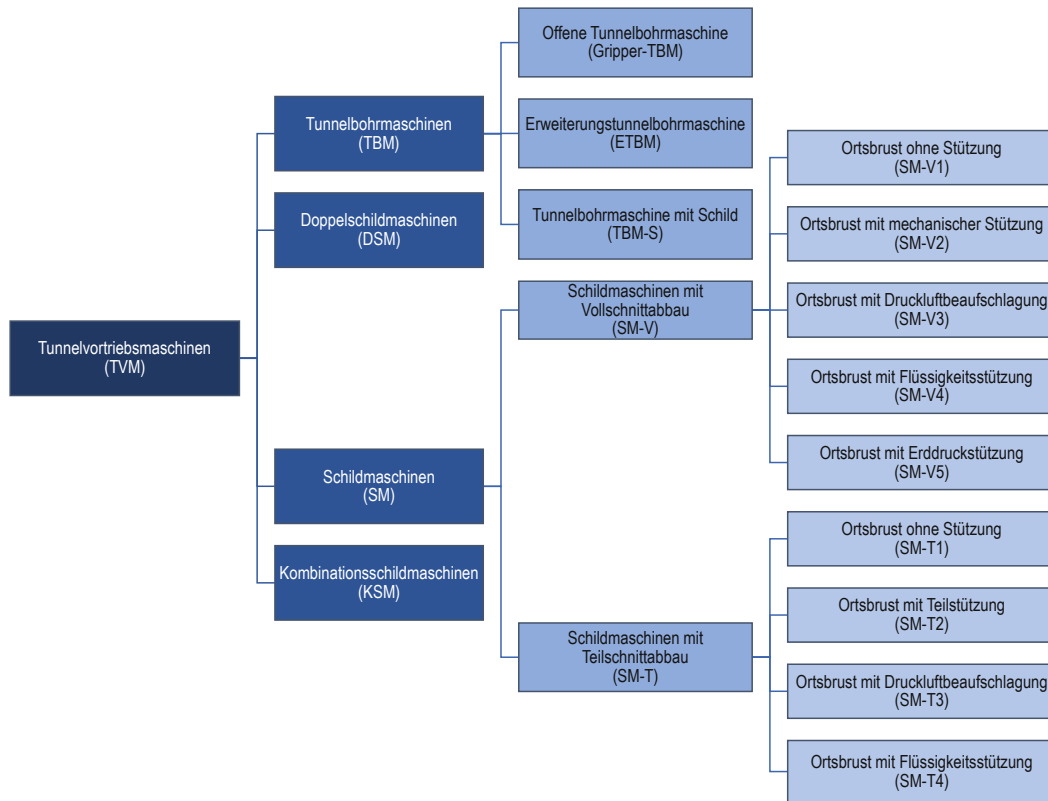


Abb. 2.1: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen (Quelle: modifiziert nach [15] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)

Diese Empfehlung wurde jedoch im Mai 2020 zurückgezogen und von der aktuell gültigen *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen* [14] mit dem Stand März 2021 ersetzt. Eine der wesentlichsten Änderungen ist die Adaptierung des Begriffes der Tunnelbohrmaschine dahingehend, dass sie der international üblichen Bezeichnung entspricht. Aus diesem Grund wurde auf den Begriff der Tunnelvortriebsmaschine verzichtet. Daher findet sich in dieser Empfehlung eine überarbeitete Einteilung der TBM. Diese werden nun lediglich in Vollschnittmaschinentypen und Teilschnittmaschinentypen unterteilt. Außerdem finden sich darin ausschließlich die gängigsten Maschinentypen wieder. Zu jeder TBM wird die englische Bezeichnung samt Abkürzung und die möglichen Betriebsmodi angegeben. Dies ist in Tab. 2.1 abgebildet.

In Tab. 2.2 sind die Abkürzungen für die relevantesten TVM aus der ÖNORM B 2203-2: 2022-01-15 [54], der „Empfehlung zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen“ [14] und der „Empfehlung zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen“ [15] gegenübergestellt. Im Zuge vorliegender Diplomarbeit werden die Abkürzungen der ÖNORM-B-2203-2:2022 verwendet, wobei Maschinentypen ohne entsprechende Abkürzung der Norm mit den Abkürzungen der aktuell gültigen Empfehlung des DAUB bezeichnet werden. Nachfolgend wird auf ausgewählte Maschinentypen detailliert eingegangen.

¹⁹Vgl. [15] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

Bezeichnung			Betriebsmodi		
deutsch	englisch	kurz	Open (OM)	Closed (CM)	Transition (TM) Teilfüllung
Vollschnittmaschinentypen					
Gripper-TBM	Gripper TBM	GRT	X	-	-
Einfachschild	Single Shield	OPS	X	-	-
Doppelschild	Double Shield	DOS	X	-	-
Flüssigkeitsschild	Slurry Shield	SLS	X	X	X
Erddruckschild	Earth Pressure Balance Shield	EPB	X	X	X
Variable-Density-Schild	VD Shield	VDS	X	X	X
Hybrid-/Multimodeschilde	Hybrid Shield	HYS	X	X	X
Erweiterungs-TBM	Extension TBM	XTS	X	-	-
Teilschnittmaschinentypen					
TS-Schilde mit Bagger	Excavator Shield	EXS	X	(X)	
TS-Schilde mit Schräme	Roadheader Shield	RHS	X	(X)	

Tab. 2.1: Einordnung von Tunnelvortriebsmaschinen (Quelle: modifiziert nach [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)

TVM Maschinentypen	Abkürzung		
	gemäß ÖNORM B-2203-2:2022	gemäß DAUB Empfehlung 2021	gemäß DAUB Empfehlung 2010
Vollschnittmaschinentypen			
Offene TBM	TBM-O	GRT	Gripper-TBM
Einfachschild	TBM-S	OPS	TBM-S
Doppelschild	TBM-DS	DOS	DSM
Flüssigkeitsschild	-	SLS	SM-V4
Erddruckschild	EPB	EPB	SM-V5
Variable-Density-Schild	-	VDS	
Hybrid-/Multimodeschilde	-	HYS	KSM
Erweiterungs-TBM	TBM-A	XTS	ETBM
Teilschnittmaschinentypen			
TS-Schild mit Bagger	-	EXS	-
TS-Schilde mit Schräme	-	RHS	-

Tab. 2.2: Vergleich gängiger Abkürzungen von Tunnelvortriebsmaschinen

2.2.2 Gripper-Tunnelbohrmaschine

Eine Gripper-Tunnelbohrmaschine, bzw. offene Tunnelbohrmaschine genannt, findet im Festgestein bei mittleren bis hohen Standzeiten ihren Einsatz. Aus diesem Grund findet keine aktive Stützung der Ausbruchslaibung und der Ortsbrust statt, weshalb dieser Maschinentyp keinen Schildmantel aufweist. Jedoch befindet sich direkt hinter dem Bohrkopf ein kurzes Kopfschild. Um den nötigen Anpressdruck, mit dem der Bohrkopf gegen die Ortsbrust gedrückt wird, ins umgebende Gebirge ableiten zu können, werden die Gripperplatten mittels Hydraulikzylindern radial gegen die anstehende Tunnellaibung gepresst.²⁰ Die Steuerung der TBM-O erfolgt ebenfalls mittels den Zylindern der Gripper. Als Drehpunkt dient dabei ein Gleitschuh, welcher am untersten Punkt des Bohrkopfes montiert ist.²¹ Nach Beendigung eines Hubes wird die Maschine auf Abstützbeinen gelagert und die Gripper werden eingefahren. Anschließend wird die Maschine nach vorne versetzt. Der Aufbau einer solchen TBM-O ist anhand einer Maschine der Firma Herrenknecht AG in Abb. 2.2 ersichtlich.²⁰

Das Gebirge wird profilgenau und gebirgsschonend mittels Rollmeißeln bzw. Disken abgebaut. Die Disken sind auf dem meist abgeflacht-konischen Bohrkopf angeordnet. Mittels Rotation des Bohrkopfes wird durch die Kerbwirkung der Rollmeißel das Gebirge als kleinstückiges Material, auch als Chips oder Bohrklein bezeichnet, abgebaut. Diese Chips werden über den Muckring auf ein Förderband verfrachtet und anschließend aus dem Tunnel befördert. Der Abbauprozess findet unter starker Staubeentwicklung statt. Dieser ist durch geeignete Entstaubungsmaßnahmen entgegenzuwirken. Dafür steht beispielsweise die Besprühung des Bohrkopfes mit Wasser, die Anordnung einer Staubwand hinter dem Bohrkopf oder eine Staubabsaugung der Abbaukammer in Kombination mit anschließender Entstaubungsanlage zur Verfügung.²⁰

Beim Durchörteren von weniger standfesten Störzonen können Ausbaubögen, Spieße, Anker oder Spritzbeton in geringem Abstand zum Bohrkopf vorgesehen werden. In solchen Fällen ist es ratsam, die TBM mit Ausstattungen zur Gebirgsvorauserkundung und Gebirgsverfestigung zu versehen. Bei negativen Abweichungen vom erwarteten Gebirge können nötige Sicherungsmittel zu erheblichen Mehrkosten führen. Wird der Tunnel mit einer Spritzbetonauskleidung ausgeführt, so ist diese erst im Nachläuferbereich der TBM-O aufzubringen, um eine Verschmutzung der wichtigen Maschinenkomponenten zu vermeiden.²⁰

Der Einsatzbereich in Gebirge mit mittleren bis hohen Standzeiten kann durch eine einaxiale Druckfestigkeit von 25 bis 250 MN/m² quantifiziert werden. Bei größeren Festigkeiten und einem hohen Anteil an verschleißfesten Materialien ist ein wirtschaftlicher Einsatz aufgrund des erhöhten Verschleißes und der damit einhergehenden Kosten nicht möglich. Eine eventuell nicht mögliche Verspannung der Gripper stellt eine weitere Eingrenzung des Anwendungsgebiets dar. Im Allgemeinen gibt außerdem die Spaltzugfestigkeit und die Gebirgsklassifizierung Auskunft über das mögliche Einsatzgebiet. Ein Einsatz gilt bei einem Rock Quality Designation Index (RQD-Wert) zwischen 50 und 100% und einem Kluftabstand von mehr als 0,6 m als garantiert. Liegt eine stärkere Zerklüftung vor, so ist die Standfestigkeit gesondert zu prüfen.²²

Neben dem lediglich in Festgesteinen wie Granit, Gneis oder Basalten eingeschränkten Anwendungsgebiet, sind TBM-O nach Herstellerangaben auf Durchmesser von 2 – 12,5 m²¹ oder 3 – 15 m²³ beschränkt, wobei sich diese Grenzen im Laufe der Jahre stetig verkleinern beziehungsweise vergrößern. Bei Durchmessern kleiner etwa 3,80 m sind Sonderlösungen erforderlich, um trotz der beengten Platzverhältnisse genügend Arbeitsplatz zu bieten. Je Maschinenvariante werden die Disken des Bohrkopfes mit einer Kraft von bis zu 32 Tonnen pro Stück gegen die

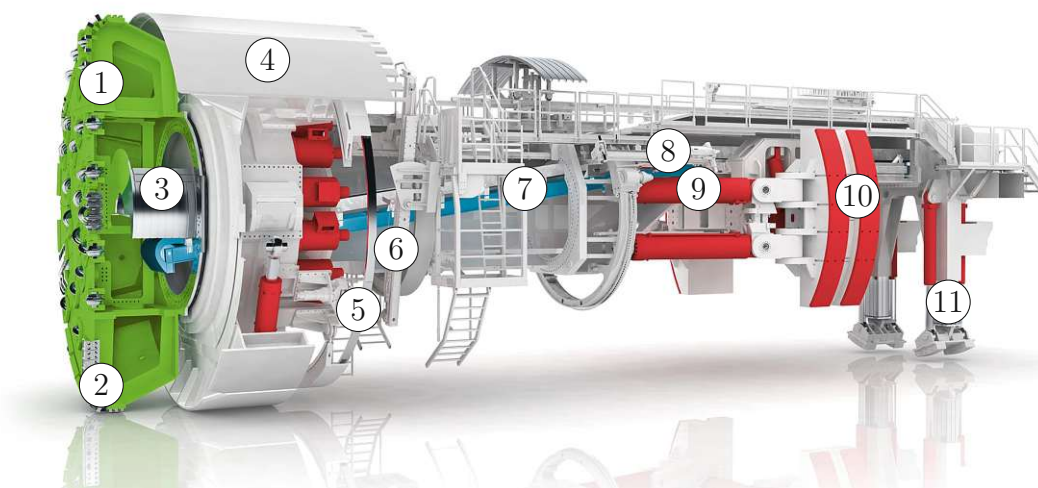
²⁰Vgl. [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

²¹Vgl. [38] Herrenknecht AG

²²Vgl. [49] Maidl et al., S. 13

²³Vgl. [61] Robbins-Headquarters

Ortsbrust gepresst. Eine weitere Besonderheit stellt die Reduktion der Teilschilde dar. Dies bietet bei quellendem oder drückendem Gebirge die Möglichkeit, den Schilddurchmesser um bis zu 15 cm zu reduzieren.²¹



- | | | |
|----------------|------------------------------|-------------------------|
| 1. Bohrkopf | 5. Ringerektor | 9. Vortriebszylinder |
| 2. Räumer | 6. Ankerbohrgerät | 10. Gripperschuhe |
| 3. Muckring | 7. Maschinenband | |
| 4. Firstschild | 8. Vorauserkundungsbohrgerät | 11. Maschinenabstützung |

Abb. 2.2: offene Tunnelbohrmaschine (Quelle: [39] Herrenknecht AG)

2.2.3 Tunnelbohrmaschine mit Schild

Einfachschilde, bzw. Tunnelbohrmaschinen mit Schild, finden Anwendung in Festgestein oder standhaften Böden, wie etwa in Tonen mit hinreichender Kohäsion und fester Konsistenz.²⁴ Die auffahrbare einaxiale Druckfestigkeit liegt im Bereich jener einer TBM-O. Einen wesentlichen Unterschied der Einsatzgebiete stellt jedoch die wesentlich reduzierte Verbandsfestigkeit dar. Untermalt wird dies darüberhinaus durch einen auffahrbaren Kluftabstand von 55 bis 65 cm und einem RQD-Index von etwa $50 \pm 10\%$.²⁵

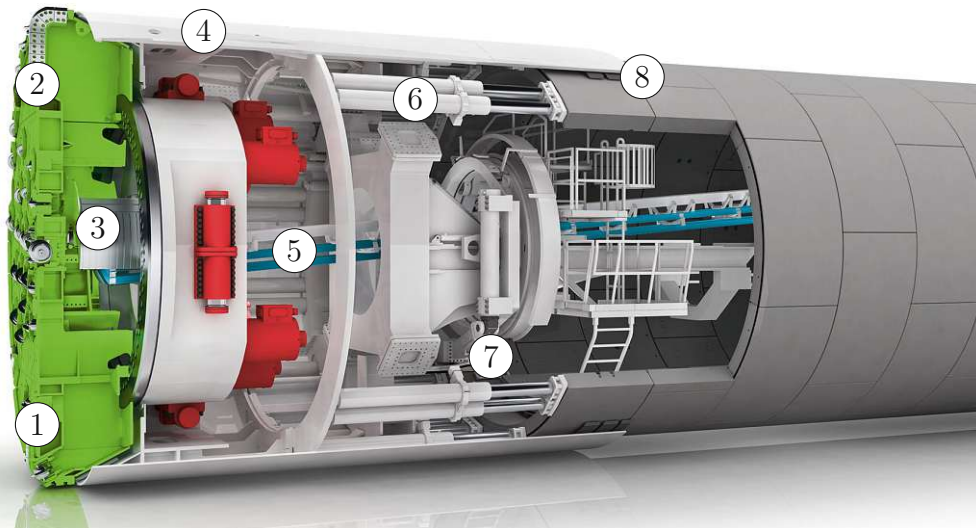
Diese TBM sind von einem Schildmantel umgeben. Das Schild übernimmt die Aufgabe der Sicherung der Tunnellaibung im unmittelbaren Bereich hinter dem Bohrkopf. Im Schutz des Schildmantels erfolgt der Tunnelausbau mittels Tübbing, welche den aufgefahrenen Tunnel vor einbrechendem Gebirge schützen. Dieser Aufbau ist in Abb. 2.3 ersichtlich. Der Bohrkopf ist in der Regel mit Rollmeißeln bestückt und weist in nachbrüchigem Gebirge meist eine weitgehend geschlossene Form auf, was in Kombination mit dem Schildmantel ebenfalls vor Einbrüchen schützt. Das ausgelöste Material gelangt bei diesem Maschinentyp über Räumer zum Muckring, von wo aus es auf ein Förderband gelangt. Im Gegensatz zur TBM-O werden

²⁴Vgl. [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

²⁵Vgl. [29] Girmscheid, S. 427

bei einer TBM-S die Vortriebskräfte nicht über Gripper in das umgebende Gebirge geleitet, sondern wie bei geschildeten TVM üblich über Vortriebszylinder in den letzten Tübbingring geleitet. Im Falle des Durchörterns von weniger standfesten Abschnitten wird wie bei TBM-O der Einsatz von vorauseilenden Erkundungsmethoden und eventuellen Gebirgsverfestigungen empfohlen. Zur Reduktion der Staubausbreitung stehen ebenso die selben Möglichkeiten wie beim zuvor genannten Maschinentyp zur Verfügung.²⁴

Damit ein Vortrieb in festem Gestein, wie etwa Basalt, möglich ist, werden die Disken des Bohrkopfes, analog der TBM-O, mit einem Druck von bis zu 32 Tonnen je Diskenmeißel an die Ortsbrust gepresst.²⁶ Die möglichen Durchmesser dieser Maschinen variieren je nach Hersteller zwischen 1,5 – 14 m²⁶, 1,6 – 15 m²⁷ und 3 – 15 m²⁸. Um die TBM-S im Zuge des Vortriebes zu steuern, erzeugt der Bohrkopf ein Überprofil zum Schildmantel, wodurch die Bewegungsfreiheit der Maschine möglich ist. Des Weiteren ist die Bohrachse zur Maschinenachse in die Höhe versetzt, was zusätzlich ein Verklemmen der Maschine in der Tunnelröhre verhindert. Der tatsächliche Steuervorgang erfolgt mittels Steuerzylindern.²⁶ Als Richtwert für die erwartbare Lebensdauer einer solchen Maschine können etwa 10.000 Einsatzstunden herangezogen werden.²⁷



- | | | |
|-------------|----------------------|------------------------|
| 1. Bohrkopf | 4. Schildmantel | 7. Tübbingerektor |
| 2. Räumer | 5. Maschinenband | |
| 3. Muckring | 6. Vortriebszylinder | 8. Ringspaltverfüllung |

Abb. 2.3: Tunnelbohrmaschine mit Schild (Quelle: [35] Herrenknecht AG)

2.2.4 Doppelschildmaschine

Eine Doppelschildmaschine kann als Kombination von TBM-O und TBM-S verstanden werden.²⁹ Ihr Einsatzgebiet findet sie meist bei Tunnelbauprojekten in großteils standfestem Gebirge, welches

²⁶Vgl. [34] Herrenknecht AG

²⁷Vgl. [62] Robbins-Headquarters

²⁸Vgl. [9] China Railway Construction Heavy Industry Corporation Limited – CRCHI

²⁹Vgl. [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

von kürzeren Abschnitten mit nachbrüchigem Boden durchtrennt ist.³⁰ Optisch kann die Maschine in zwei Hauptbestandteile unterteilt werden. Der vordere Teil setzt sich aus dem Bohrkopf mit Rollmeißeln, dem Antriebsgestänge, dem Frontschild und den Hauptvortriebszylindern zusammen. Der zweite Maschinenteil wird als Gripperschild bezeichnet und besteht aus den Grippern und den Hilfsvortriebszylindern. Im Anschluss daran befindet sich der Schildschwanz und der Tübbingerektor. Die Hauptvortriebszylinder können den vorderen Maschinenteil um eine komplette Tübbingringlänge nach vorne pressen, wobei der entstehende Versatz als Teleskopfuge bezeichnet wird. Um in dieser Situation das Einbrechen des anstehenden Gebirges in den Freiraum zu verhindern, wird dieser von dem Teleskopschild verschlossen.²⁹

Die TBM-DS bieten eine Möglichkeit, Vorschubkräfte, sowie das Vortriebsmoment, mittels Gripper im standfesten Gebirge abzuleiten. Bei Verspannung des Gripperschildes mittels Gripper ist es möglich, Tübbinge zu setzen während ein Bohrhub stattfindet. Dieser Betriebsmodus wird als Double-Shield-Mode bezeichnet und kann bei ausreichend standfestem Gebirge eingesetzt werden. Dabei ist ein Verzicht der Tübbingauskleidung möglich. Ist eine Verspannung mittels Gripper aufgrund einer unzureichenden Standzeit nicht möglich, so kann die TBM-DS durch Hilfsvortriebszylinder an dem zuletzt errichteten Tübbingring abgestützt werden. Dieser Betriebsmodus wird als Single-Shield-Mode bezeichnet, wobei die Hauptvortriebszylinder eingefahren werden. Bei TBM-DS wird bei variierenden Gebirgsverhältnissen die Anordnung von Gebirgsvorauserkundungsgeräten oder Einrichtungen zur Gebirgsverfestigung empfohlen. Die beim Abbau entstehende Staubentwicklung kann wiederum mittels Besprühung des Bohrkopfes mit Wasser, der Anordnung einer Staubwand hinter dem Bohrkopf oder der Ausführung einer Absaugungsanlage mit anschließender Abluftfilterung begrenzt werden. Der obig beschriebene Aufbau einer TBM-DS ist in Abb. 2.4 abgebildet.²⁹

Der Gesteinsabbau erfolgt mittels Rollenmeißel, welche ebenfalls mit einem Druck von 32 Tonnen pro Meißel gegen die Ortsbrust gedrückt werden. Der auffahrbare Ortsbrustdurchmesser liegt je nach Hersteller im Bereich von 2,8 – 12,5 m³¹ oder 1,6 – 15 m.³² Der Maschinenantrieb richtet sich nach dem Durchmesser der Maschine. So wird bei Durchmessern zwischen 2,8 und 6 m ein fest eingebauter Antrieb mit geraden Vortriebszylindern verwendet. Diese übernehmen gleichzeitig die Steuerung der TBM-DS. Bei größeren Durchmessern kommen verschiebbare Antriebe mit weiteren Längsverschiebungszylindern zur Anwendung. Die Steuerung wird durch ein Gelenklager unterstützt. Dies erfolgt durch eine horizontale und vertikale Verschiebung des Antriebes. Durch den langen Schildmantel kann es zum Einklemmen der TBM-DS kommen. Um einem Blockieren schon bei der Konstruktion solcher Maschinen entgegen zu wirken, wird der Schildmantel mit abgestuftem Schilddurchmesser ausgeführt. Außerdem werden die Längsachsen des Bohrkopfes, des Frontschildes und des Gripperschildes vertikal versetzt. Ein weiteres Problem kann durch das Verkeilen von Einbrüchen der Tunnellaibung entstehen, da diese den Teleskop- und Ringspalt blockieren und ein Nachschieben des Gripperschildes beeinflussen. Als konstruktive Lösung für diese Problemstellung werden die Teleskopschilde verfahrbar ausgeführt. Dadurch ist ein Zugang zur Tunnelwand für Reinigungs- oder Sicherungsmaßnahmen möglich.³¹

2.2.5 Flüssigkeitsschild

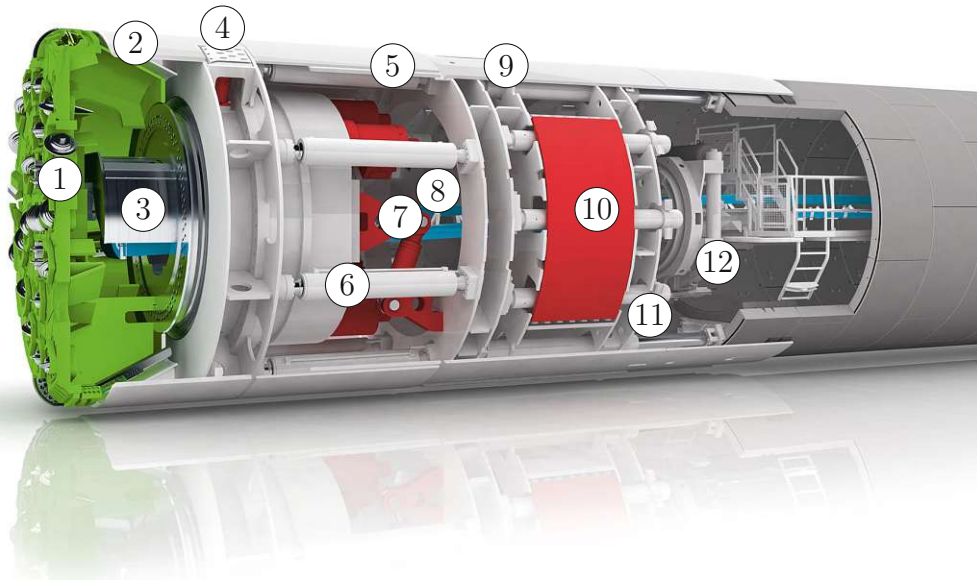
Flüssigkeitgestützte TVM werden eingesetzt, wenn die Gefahr des Eindringens von großen Mengen an Wasser ins Innere eines Tunnels besteht.³³ Ein klassisches Anwendungsgebiet stellen

³⁰Vgl. [49] Maidl et al., S. 13

³¹Vgl. [32] Herrenknecht AG

³²Vgl. [58] Robbins-Headquarters

³³Vgl. [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.



- | | | |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1. Bohrkopf | 5. Teleskopschild | 9. Gripperschild |
| 2. Frontschild | 6. Hauptvortriebszylinder | 10. Gripperschuhe |
| 3. Muckring | 7. Drehmoment-Stützzylinder | 11. Hilfsvortriebszylinder |
| 4. Stabilisatoren | 8. Maschinenband | 12. Tübbingerektor |

Abb. 2.4: Doppelschildmaschine (Quelle: [33] Herrenknecht AG)

geringbindige bis nichtbindige Böden, wie beispielsweise Kiese und Sande, dar.³⁴ Bei Erdrich mit einer Durchlässigkeit von mehr als $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ ist ein Einsatz aufgrund des unkontrollierten Abströmens der Stützflüssigkeit unter Umständen nicht möglich.³⁵ Die aktive Stützung der Ortsbrust erfolgt mittels einer unter Druck befindlichen Flüssigkeit. Um die Stützflüssigkeit im Bereich der Ortsbrust zu halten, ist hinter der Abbaukammer eine Druckwand angeschlossen. Dadurch wird auch eine Ausbreitung des beim Abbaus entstehenden Staubes verhindert und etwaige zusätzliche Maßnahmen dahingehend, wie sie bei den bisher beschriebenen Maschinentypen erforderlich sind, können unberücksichtigt bleiben. Der Vortrieb erfolgt durch das Anpressen der Vortriebszylinder an die, im Zuge des Vortriebs errichteten, Tübbingringe. Dies erfolgt, geschützt von Gesteinseinbrüchen, unterhalb des Schildmantels.³³

Um eine optimale Funktionalität der Stützflüssigkeit zu gewährleisten, muss diese hinsichtlich ihrer Dichte und Viskosität, in Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit des Erdrichs, stetig angepasst werden können.³³ Wasser eignet sich lediglich bei undurchlässigen feinkörnigen Böden als Stützmedium, da es ansonsten ohne eine Stützwirkung zu erzeugen, abfließt. Bei Lockergestein mit größerer Durchlässigkeit ist eine andere Stützflüssigkeit zu wählen.³⁶ Meist wird dabei

³⁴Vgl. [29] Girmscheid, S. 430

³⁵Vgl. [49] Maidl et al., S. 14 f.

³⁶Vgl. [49] Maidl et al., S. 28 ff.

eine Bentonitsuspension eingesetzt. Bentonit ist eine Zusammensetzung von verschiedenen Tonmineralien und zeichnet sich durch seine Wasseraufnahmefähigkeit und Quelleigenschaften aus. Um die Wechselwirkung des Stützmediums mit dem anstehenden Gebirge zu quantifizieren dient ein Druckgradient. Dieser gibt den Druckverlust der Stützflüssigkeit im Zuge der Durchdringung von 1 m Untergrund an.³⁷ Damit der Druck der Flüssigkeit variiert werden kann, sind Luftpolster hinter einer Tauchwand in der Abbaukammer angeordnet. Außerdem kann die Pumpe, welche das Stützmedium zirkulieren lässt, zur Druckvariation gesteuert werden.³³ Um zusätzlichen Verschleiß und negative Auswirkungen auf die Vortriebsgeschwindigkeit zu reduzieren sind Verklebungen in der Ortsbrust zu vermeiden. Dazu ist eine Optimierung des Materialflusses anzustreben. Dies kann durch ein offenes Zentrum des Schneidrades, eine höhere Strömungsgeschwindigkeit oder ein separates Spülsystem mit verstellbaren Düsen erfolgen.³⁸ Bevor mit dem Tunnelvortrieb begonnen wird, ist der maximale Stützdruck zu berechnen, welcher im Zuge des Vortriebs benötigt wird. Ein gewisser Mindestbetriebsdruck ist einzuhalten, um Druckschwankungen, eine Verstopfung der Absaugschläuche und Kavitation am Schneidrad zu vermeiden. Der Abbau des Bodens erfolgt vollflächig mittels Schneidrad. Das gelöste Erdreich wird hydraulisch gefördert und anschließend einer Separationsanlage zugeführt.³³

Um den Austausch der Abbauwerkzeuge zu ermöglichen oder etwaige Reparaturarbeiten vorzunehmen, ist ein Zugang zur unter Druck stehenden Abbaukammer vorzusehen. In solchen Fällen ist das Stützmedium von der flüssigen Bentonitsuspension zu einer Druckluftstützung zu wechseln.³³ Durch den Druck, mit dem die Stützflüssigkeit in das anstehende Gebirge gedrückt wird, entsteht bei gering durchlässigen Böden an der Ortsbrust ein Filterkuchen, welcher lediglich eine sehr geringe Durchlässigkeit aufweist. Bei stärker durchlässigen Böden ist die Bildung eines solchen Filterkuchens nicht möglich. In diesen Fällen dringt die Stützflüssigkeit in das Erdreich ein und überträgt Schubkräfte auf das Korngerüst, wodurch der Strömungsgeschwindigkeit des anströmenden Grundwassers entgegengewirkt wird. Dieses Modell wird Penetrationsmodell genannt.³⁶ Durch beide Modelle ist ein kurzfristiger Wechsel hin zu einer Druckluftstützung möglich. Dies ist jedoch, aufgrund der Gefahr der Austrocknung, zeitlich begrenzt. Die in der Druckkammer befindliche Stützflüssigkeit kann vollständig oder nur teilweise abgesenkt werden. Letztgenannte Methode kann aufgrund des erforderlichen Platzbedarfs oder der minimal möglichen Absenkhöhe erforderlich sein. Bei Teilabsenkung der Stützflüssigkeit bis zur Hälfte des Schneidrades ist die Wartung aller Werkzeuge möglich, da der Bohrkopf im Stand rotiert werden kann. Ist das Schneidrad offen ausgeführt, so können zur Sicherheit der Arbeiter in der Abbaukammer mechanisch verschließbare Segmente angeordnet werden. Dies darf jedoch lediglich des zusätzlichen Schutzes dienen und nicht bei der Rechnung der Stützwirkung berücksichtigt werden.³³

Werden im Zuge des Vortriebs größere Felsbrocken angetroffen, so können diese mittels Rollenmeißeln am Bohrkopf oder durch einen Gesteinbrecher so weit zerkleinert werden, bis sie mithilfe der hydraulischen Pumpen der Flüssigkeitsstützung förderbar sind. Um ein Verklemmen solcher größeren Gesteine im Förderkreislauf zu verhindern, ist im Bereich der Gesteinsbrecher ein Rechen angeordnet. In standfestem Gebirge ist ein Vortrieb ohne Druckbeaufschlagung möglich. Dabei kann die Abbaukammer nur teilweise gefüllt sein und als Fördermedium Wasser verwendet werden.³³ In Abb. 2.5 ist ein Mixschild der Firma Herrenknecht AG abgebildet. Dabei handelt es sich laut Firmenangaben um eine Weiterentwicklung klassischer Flüssigkeitsschilde.³⁸

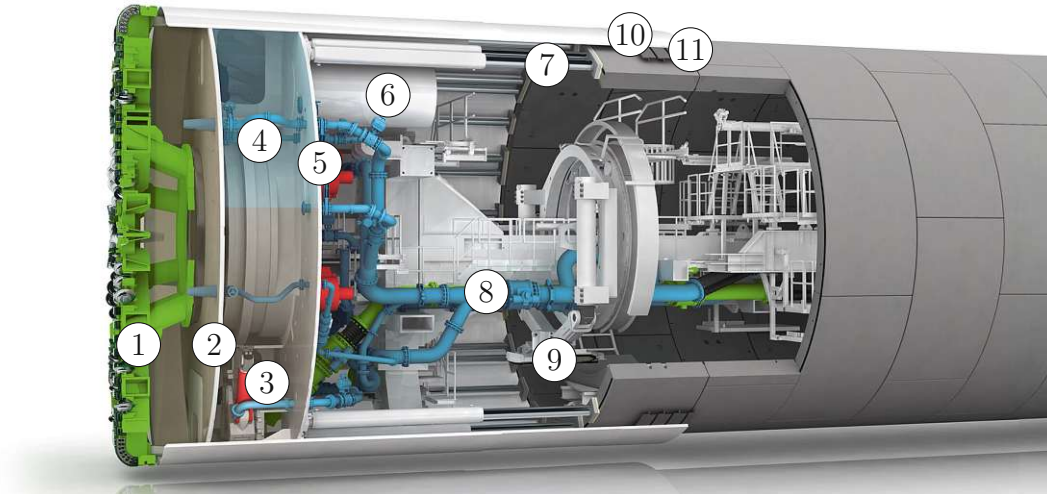
Die herstellbaren Durchmesser eines SLS unterscheiden sich je Hersteller und liegen zwischen 3,7 – 19 m³⁸ und etwa 3,5 – 16 m³⁹. Diese Maschinen sind für Drücke von etwa 15 bar ausgelegt.³⁸ Um einen optimalen Vortrieb zu gewährleisten ist der Druck in der Abbaukammer möglichst

³⁷Vgl. [16] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

³⁸Vgl. [40] Herrenknecht AG

³⁹Vgl. [10] China Railway Construction Heavy Industry Corporation Limited – CRCHI

genau an die örtlichen Gegebenheiten anzupassen. Dafür kann der Druck mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ bar gesteuert werden.⁴⁰ Bei Drücken von mehr als 3,6 bar sind für Wartungsarbeiten in der Abbaukammer professionelle Taucher einzusetzen.³⁸



- | | | |
|------------------|----------------------|-------------------------|
| 1. Schneidrad | 5. Druckwand | 9. Tübbingerektor |
| 2. Tauchwand | 6. Personenschleuse | 10. Schildschwanz |
| 3. Zangenbrecher | 7. Vortriebszylinder | 11. Ringspaltverfüllung |
| 4. Luftpolster | 8. Förderkreislauf | |

Abb. 2.5: Mixschild (Quelle: [41] Herrenknecht AG)

2.2.6 Erddruckschild

Erddruckgestützte Tunnelbohrmaschinen stützen die Ortsbrust aktiv mittels Erdbrei, der aus dem abgebauten Erdreich besteht. Dieser Brei befindet sich in der Abbaukammer, welche mittels Druckwand vom Rest der Maschine getrennt ist. Die Abbaukammer kann dabei lediglich teilweise oder komplett gefüllt sein und sollte so konstruiert sein, dass eine kontinuierliche Zirkulation des abgebauten Materials möglich ist, ohne die Bildung von Materialnestern zu ermöglichen. Der vollständig gefüllte Betriebsmodus wird als *Closed Mode* bezeichnet. In standfestem Gebirge kann auf die aktive Ortsbruststützung mittels Druckluft verzichtet werden und die Abbaukammer nur teilgefüllt sein. Diese Verfahrensweise wird als *Open Mode* bezeichnet. Einen dritten Betriebsmodus stellt der *Transition Mode* dar. Dabei wird der Tunnel in standfestem Gebirge unter Wasserzufluss bei druckluftbeaufschlagter, teilgefüllter Abbaukammer aufgefahren.⁴¹

Das Schneidrad eines EPB baut den anstehenden Boden möglichst schonend ab und verarbeitet das gelöste Material mittels Mischflügel, welche sich auf der Rückseite des Schneidrades und an der Druckwand befinden, zu einem einheitlichen Brei. Um diesen Vorgang zu optimieren, sind Injektionsöffnungen an der Vorderseite des Schneidrades angebracht, durch welche Konditionierungsstoffe eingebracht werden können. Das Schneidrad kann hinsichtlich der Anzahl und Größe

⁴⁰Vgl. [11] CREG TBM Germany GmbH

⁴¹Vgl. [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

an Öffnungen variieren. Bei einem offen gehaltenen Schneidrad ist die Gefahr der Verklebung des abgebauten Materials deutlich geringer und es kann ein einheitlicher Stützdruck erzeugt werden. Des Weiteren wird ein vorteilhaftes Strömungsbild zum Schneckenförderer erreicht. Nachteilig wirkt sich das erhöhte Risiko bei Arbeiten in der Abbaukammer aus, da die Ortsbrust kaum mechanisch gestützt wird, sowie ein erhöhtes Setzungsrisiko bei geringen Überdeckungen. Ein weiteres Problem stellen größere Steine dar, welche sich in der Abbaukammer verkeilen. Aus diesem Grund finden vorzugsweise geschlossene Schneidräder Anwendung. Diese haben den Nachteil der unregelmäßigen Verteilung des Stützdruckes. Ein solches Schneidrad kann mit Meißeln, Schälmessern oder Sticheln ausgebildet werden.⁴²

Anhand von Druckmessdosen, welche sich auf der Druckwand befinden, kann der Druck der Erdmasse stetig kontrolliert werden. Das abgebaute Material wird mittels einer druckhaltenden Förderschnecke aus dem Arbeitsraum transportiert. Durch Variation der Schneckendrehzahl, der Vortriebgeschwindigkeit und mittels druck-volumengesteuerten Injektionen kann der Stützdruck angepasst werden. Durch die Reibung der Förderschnecke stellt sich ein Druckausgleich zwischen der unter Druck stehenden Abbaukammer und dem bereits aufgefahrenen Tunnel ein.⁴¹

Die aktive Ortsbruststützung wird maßgeblich von den Eigenschaften des Erdbreis bestimmt. Der abgebaute Boden sollte eine gute plastische Verformbarkeit, eine breiige bis weiche Konsistenz, einen geringen Winkel der inneren Reibung und eine geringe Wasserdurchlässigkeit bieten, um eine optimale Stützwirkung ausüben zu können. Besonders wesentlich ist der Feinkornanteil mit einem Durchmesser von weniger als 0,06 mm, welcher idealerweise mehr als 30% des Erdreichs ausmacht. Bei Anwendungen in grob- oder gemischtkörnigen Böden, sowie Fels, nimmt der Anpressdruck des Schneidrads und das Schneidraddrehmoment mit größer werdendem Stützdruck zu. Das ideale Einsatzgebiet stellen tonig-schluffige und schluffig-sandige Böden mit breiiger bis weicher Konsistenz dar.⁴² Der Anwendungsbereich eines EPB kann durch beispielsweise Bentonit, Schaum oder Polymere erweitert werden und sich maßgeblich mit jenem eines SLS überschneiden. In einem solchen Anwendungsfall ist eine umweltverträgliche Entsorgung nötig.⁴¹ Der Maschinenaufbau eines EPB ist in Abb. 2.6 dargestellt.

Ein solches EPB kann mit herstellerabhängigen Durchmessern von 1,7 – 16 m⁴³ oder 3 – 15 m⁴⁴ hergestellt werden. Bei Durchmessern von mehr als 10 m, in besonders reibungsintensiven Böden, kann zur besseren Auffahrbarkeit das Schneidrad zweigeteilt ausgeführt werden. Dabei besteht der Bohrkopf aus zwei Schneidrädern unterschiedlicher Form und Größe. Das kleinere scheibenförmige Schneidrad befindet sich inmitten der größeren ringförmigen Schneidradkomponente. Diese Komponenten können unabhängig voneinander rotiert.⁴³ Erddruckschilde werden bei Drücken bis zu 10 bar eingesetzt.⁴⁴ Laut Herstellerangaben sind sie für eine Lebensdauer von 10.000 Einsatzstunden konstruiert.⁴⁵

2.2.7 Hybridschild

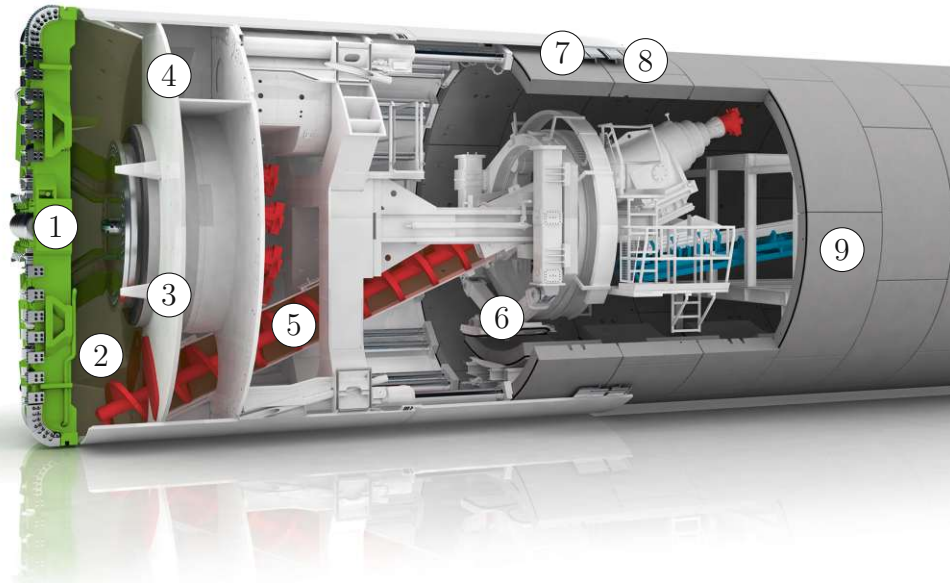
Hybridschilde (HYS) werden unter anderem bzw. gemeinhin als Multimodeschilde bezeichnet, da sie einen Tunnel in verschiedenen Betriebsmodi auffahren können. Aus diesem Grund finden sie ihren Einsatz in stark wechselnden geologischen Gegebenheiten, welche von standhaftem Fels bis zu nachbrüchigen Böden variieren können. Dabei kann die Verfahrenstechnik durch Änderung des Fördersystems getauscht werden. Diese Förderung ist ein zweigeteiltes System. Die Primärförderung befindet sich innerhalb der TVM und die Sekundärförderung führt das gelöste Material durch den Tunnel ins Freie. Eine Abänderung der Verfahrenstechnik erfolgt

⁴²Vgl. [49] Maidl et al., S. 277 ff.

⁴³Vgl. [36] Herrenknecht AG

⁴⁴Vgl. [59] Robbins-Headquarters

⁴⁵Vgl. [60] Robbins-Headquarters



- | | | |
|----------------|-------------------|------------------------|
| 1. Schneidrad | 4. Druckwand | 7. Schildschwanz |
| 2. Abbaukammer | 5. Förderschnecke | 8. Ringspaltverfüllung |
| 3. Mischflügel | 6. Tübbingektor | 9. Tunnelauskleidung |

Abb. 2.6: Erddruckschild (Quelle: [37] Herrenknecht AG)

durch eine Änderung der Primärförderung oder der Sekundärförderung. Das Primärsystem kann von einer Schneckenförderung auf eine Bandförderung oder von einer hydraulischen Förderung zu einem Abtransport mittels Förderband geändert werden. Nach diesem Wechsel erfolgt keine aktive Stützung der Ortsbrust. Das Prinzip dieses Vortriebs entspricht jenem einer TBM-S. Das Sekundärfördersystem kann von einer Förderbandförderung auf eine hydraulische Förderung umgebaut werden. Eine Veränderung der Sekundärförderung hat keinerlei Auswirkungen auf das Primärfördersystem und die Art der Ortsbruststützung. Lediglich die Materialkonsistenz des abgebauten Materials ist dafür entscheidend.⁴⁶

Durch diese Umbaumaßnahmen ergeben sich Möglichkeiten einer Kombination zwischen offenem Schild mit entweder einem SLS oder einem EPB. Darüberhinaus können die beiden letztgenannten Maschinen auch miteinander kombiniert werden. Die möglichen Durchmesser liegen bei 2,4 – 19 m.⁴⁷ Die Erfordernisse an etwaigen zusätzlichen Einrichtungen, wie beispielsweise einer Separationsanlage, bleiben unverändert bestehen. Aus baubetrieblicher Sicht ist die Zeitdauer einer solchen Umbaumaßnahme zu beachten, welche mit etwa der Dauer einer Schicht ins Gewicht schlägt.⁴⁶

⁴⁶Vgl. [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

⁴⁷Vgl. [42] Herrenknecht AG

2.3 Auswahlkriterien und Einsatzbereiche der vorgestellten Tunnelvortriebsmaschinen

Um die passende TVM für ein Tunnelbauprojekt auszuwählen, ist eine genaue Kenntnis des Gebirgsverhaltens und der GW-Verhältnisse erforderlich. Diese lassen sich mit verschiedenen Kenngrößen beschreiben. Die relevanten Parameter eines maschinellen Vortriebs unterscheiden sich maßgeblich von jenen eines konventionellen Vortriebs. Diese Parameter werden in Österreich gemäß ÖNORM EN 1997-2 bzw. in Deutschland nach DIN 4020 im Zuge der geotechnischen Untersuchung ermittelt. Bei der Auswahl und Interpretation von Ergebnissen solcher Untersuchungen sollte das spätere Vortriebsverfahren bereits berücksichtigt werden. Je detailreicher die geotechnischen Untersuchungen sind, umso besser kann die Wahl der einzusetzenden Verfahrenstechnik und der TVM getroffen werden. Die geotechnischen Kennwerte sind projektspezifisch für jeden Baugrund gesondert zu ermitteln. Es gilt zu beachten, dass jegliche Abweichungen vom geplanten Zustand im Laufe der Bauausführung zu erheblichen und komplexen Konsequenzen führen können. Mögliche Konfliktpunkte sollten daher im Vorhinein vertraglich festgelegt werden.⁴⁸ Die geotechnischen Untersuchungsergebnisse sind gemäß *Richtlinie für die Geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb* [52] im geotechnischen Bericht zusammenzustellen. In diesem sollte sich ebenfalls ein geologischer Längsschnitt der Tunneltrasse befinden, welcher in verschiedene Vortriebsabschnitte getrennt ist.⁴⁹

Die wesentlichsten Aspekte für die Auswahl einer TVM sind Baugrundverhalten und eventuell notwendige Stützung der Ortsbrust. Als Basis dafür dienen lokale und globale Stabilitätsnachweise der Ortsbrust. Hierfür ist zunächst zu klären, ob es sich um einen standfesten Baugrund handelt, oder ob die Ortsbrust aktiv gestützt werden muss. Als Grundlage für eine überschlägige Beurteilung dient das Rock Mass Rating System (RMR-System).⁴⁸ Das RMR-System basiert auf über 350 Praxisbeispielen von Tunnelbauprojekten, welche stetig in das System implementiert wurden, um die Genauigkeit der Klassifikation zu erhöhen.⁵⁰ Bei dieser Variante der Gebirgsklassifizierung wird das Gebirge hinsichtlich folgender sechs Parameter beschrieben:⁵¹

- einaxiale Druckfestigkeit des Felsmaterials
- Bestimmung der Gebirgsqualität (RQD)
- Kluftabstand
- Zustand der Klüfte
- Wasserandrang
- Kluftorientierung

Im Festgestein kann mittels Tab. 2.3 eine Beziehung zwischen dem RMR-Wert und der Standfestigkeit des Gebirges hergestellt werden. Bei größeren Tunnelquerschnitten sind jedoch fundiertere Untersuchungen nötig. Im Lockergestein wird mittels analytischer und numerischer Verfahren die Notwendigkeit etwaiger Ortsbruststützungsmaßnahmen abgeschätzt.⁴⁸

Mittels der im Zuge der geotechnischen Untersuchung ermittelten Bodenkenngrößen kann die Eignung der verschiedenen TVM beurteilt werden. Diese Beurteilung erfolgt zunächst rein

⁴⁸Vgl. [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

⁴⁹Vgl. [52] ÖGG, S. 26 f.

⁵⁰Vgl. [30] Goger, S. 18

⁵¹Aus [30] Goger, S. 18

Standfestigkeit	RMR-Wert
standfest	RMR 81-100
nachbrüchig	RMR 61-80
gebrüchig	RMR 51-60
stark gebrüchig	RMR 41-50
rollig	RMR 21-40
druckhaftes Gebirge	RMR < 20

Tab. 2.3: RMR-Klassifizierung in Abhängigkeit der Standfestigkeit (Quelle: modifiziert nach [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)

aufgrund geotechnischer Überlegungen. Eine wirtschaftliche Analyse wird dabei nicht berücksichtigt und ist projektabhängig gesondert anzuschließen. In Tab. 2.4 und Tab. 2.5 sind die relevantesten Bodenkenngrößen für Lockergestein und Festgestein zusammengestellt. Darüber hinaus werden in Abhängigkeit dieser Kenngrößen TVM-Typen genannt, welche sich für den Einsatz in diesen Bedingungen eignen. Diese Tabellen sollen jedoch nur als Vorauswahl nach dem Ausschlussprinzip dienen. Bei dem häufigen Fall, dass sich mehrere Maschinenvarianten eignen, ist eine projektabhängige Gesamtbewertung durchzuführen. Darüberhinaus sind wirtschaftliche und umwelttechnische Aspekte mit einzubeziehen.⁴⁸

Die Eignung der TVM wird in den Haupteinsatzbereich, den erweiterten Einsatzbereich und den eingeschränkten Einsatzbereich untergliedert. Bei Anwendung im Haupteinsatzbereich ist die Maschinenvariante bereits erfolgreich in vergleichbaren geologischen Bedingungen eingesetzt worden. Dabei ist weitgehend auf Zusatzmaßnahmen verzichtet worden, wobei die Leistungsfähigkeit teils beachtlich variieren kann. Ein Einsatz im erweiterten Einsatzbereich ist jedenfalls möglich, bedarf allerdings unter Umständen zusätzlicher technischer Maßnahmen. Im Vergleich zum Haupteinsatzbereich kann die Vortriebsleistung und die Ökonomie reduziert sein. Der Vortrieb einer TVM im eingeschränkten Einsatzbereich ist vermutlich nur mit zusätzlichen Maßnahmen und Gebirgsmodifizierung möglich. Die Wirtschaftlichkeit und die Vortriebsleistung sind im Vergleich zum Haupteinsatzbereich deutlich reduziert. Um etwaigen Herausforderungen vorzubeugen, sollte eine technische, wirtschaftliche und vertragliche Risikoanalyse mit Variantenvergleich durchgeführt werden.⁴⁸

Tab. 2.4 zeigt die möglichen Einsatzbereiche der TVM im Lockergestein. Der bedeutendste Parameter zur Beschreibung der Standfestigkeit und Durchlässigkeit des Bodens ist die Korngrößenverteilung. Die technischen Anforderungen steigen mit höherem Erddruck und Wasserdruck. In Tab. 2.4 finden exemplarisch sieben verschiedene geotechnische Parameter Erwähnung. Diese ermöglichen eine allgemeine Eingrenzung der anwendbaren TVM bei einem Tunnelbauprojekt. Tab. 2.5 gibt die Einsatzbereiche einer TVM im Festgestein an. Dies erfolgt ebenfalls anhand von sieben exemplarisch gewählten Parametern. Es gilt zu beachten, dass es sich bei dem Stützdruck nicht unmittelbar um den möglichen Wasserdruck handelt. Um diesen exakt feststellen zu können, ist eine separate Berechnung nach den gültigen Normen erforderlich. Weiters sind etwaige zusätzliche Bestimmungen in Betracht zu ziehen, welche die Anwendung eines Maschinentyps ausschließen können. Exemplarisch könnte dies bei arbeitssicherheitsbedingten Vorgaben oder bei dem Verbot einer Grundwasserentnahme der Fall sein. Mittels der Tabellen 2.4 und 2.5 ist ersichtlich, dass für jede Bodenbedingung eine passende TVM gefunden werden kann, was jedoch unter Umständen mit etwaigen zusätzlichen technischen Maßnahmen einhergeht.⁴⁸ Die dabei verwendeten Abkürzungen der Maschinentypen sind in Tab. 2.2 auf Seite 21 definiert.

Lockergestein						
Feinkornanteil	< 0,06 mm	< 5 %	5 - 15 %	15 - 40 %	> 40 %	
Haupteinsatzbereich	SLS	SLS	SLS	SLS EPB HYS	EPB HYS	
erweiterter Einsatzbereich			EPB HYS	EPB HYS	TBM-S SLS	
eingeschränkter Einsatzbereich	TBM-S EPB HYS	TBM-S	TBM-S	TBM-S		
Durchlässigkeit	[m/s]	> 10 ⁻²	10 ⁻² - 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	< 10 ⁻⁶	
Haupteinsatzbereich				SLS	EPB HYS	
erweiterter Einsatzbereich			SLS	EPB HYS	TBM-S SLS	
eingeschränkter Einsatzbereich	TBM-S SLS EPB HYS	TBM-S EPB HYS	TBM-S	TBM-S		
Konsistenz	lc	breiig	weich	steif	halbfest	fest
Haupteinsatzbereich			EPB HYS	EPB HYS		
erweiterter Einsatzbereich	SLS EPB HYS	SLS	SLS	SLS	SLS EPB HYS	TBM-S SLS EPB HYS
eingeschränkter Einsatzbereich	TBM-S SLS	TBM-S	TBM-S	TBM-S	TBM-S	
Lagerungsdichte		dicht	mitteldicht	locker		
Haupteinsatzbereich	TBM-S SLS EPB HYS	SLS EPB HYS	EPB HYS			
erweiterter Einsatzbereich				SLS		
eingeschränkter Einsatzbereich		TBM-S	TBM-S			
Stützdruck	[Bar]	0	1 - 4	4 - 7	7 - 15	
Haupteinsatzbereich	EPB HYS	SLS EPB HYS	SLS	SLS		
erweiterter Einsatzbereich	TBM-S SLS		EPB HYS			
eingeschränkter Einsatzbereich		TBM-S	TBM-S	TBM-S EPB HYS		
Quellpotential		kein	gering	mittel	hoch	
Haupteinsatzbereich	TBM-S SLS EPB HYS	TBM-S SLS EPB HYS				
erweiterter Einsatzbereich			TBM-S SLS EPB HYS			
eingeschränkter Einsatzbereich				TBM-S SLS EPB HYS		
Abrasivität	äQu [%]	0 - 5	5 - 15	15 - 35	35 - 75	75 - 100
Haupteinsatzbereich	TBM-S SLS EPB HYS	TBM-S SLS EPB HYS	TBM-S SLS			
erweiterter Einsatzbereich			EPB HYS	TBM-S SLS EPB HYS	TBM-S SLS	
eingeschränkter Einsatzbereich					EPB HYS	

Tab. 2.4: Einsatzbereiche der TVM im Lockergestein (Quelle: modifiziert nach [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)

Festgestein						
Gesteinsfestigkeit	[MPa]	0 - 25	25 - 50	50 - 100	100 - 250	> 250
Haupteinsatzbereich			TBM-O TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS
erweiterter Einsatzbereich	TBM-S TBM-DS SLS EPB HYS		SLS EPB HYS	SLS	SLS	SLS
eingeschränkter Einsatzbereich	TBM-O*			EPB HYS	EPB HYS	EPB HYS
Gebirgsqualität	[RQD]	0 - 25	25 - 50	50 - 75	75 - 90	90 - 100
Haupteinsatzbereich		EPB HYS	TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS
erweiterter Einsatzbereich	TBM-S TBM-DS SLS		TBM-O SLS EPB HYS	SLS EPB HYS	SLS	SLS
eingeschränkter Einsatzbereich	TBM-O				EPB HYS	EPB HYS
Rock Mass Ratio	[RMR]	< 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Haupteinsatzbereich		EPB HYS	TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS
erweiterter Einsatzbereich	TBM-S TBM-DS SLS		TBM-O SLS EPB HYS	SLS EPB HYS	SLS	SLS
eingeschränkter Einsatzbereich	TBM-O				EPB HYS	EPB HYS
Wasserzufluss	[l/(min*10m)]	0	0 - 10	10 - 25	25 - 125	> 125
Haupteinsatzbereich		TBM-O TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS		
erweiterter Einsatzbereich		SLS EPB HYS	SLS EPB HYS	SLS EPB HYS	TBM-O TBM-S TBM-DS SLS EPB HYS	SLS EPB HYS
eingeschränkter Einsatzbereich						TBM-O TBM-S TBM-DS
Abrasivität	[CAI]	0,1 - 0,5	0,5 - 1	1 - 2	2 - 4	4 - 6
Haupteinsatzbereich		TBM-O TBM-S TBM-DS SLS EPB HYS	TBM-O TBM-S TBM-DS SLS EPB HYS	TBM-O TBM-S TBM-DS		
erweiterter Einsatzbereich				SLS EPB HYS	TBM-O TBM-S TBM-DS SLS EPB HYS	TBM-O TBM-S TBM-DS SLS HYS
eingeschränkter Einsatzbereich						EPB HYS
Quellpotential		kein	gering	mittel	hoch	
Haupteinsatzbereich		TBM-O TBM-S TBM-DS SLS EPB HYS	TBM-O TBM-S TBM-DS SLS EPB HYS			
erweiterter Einsatzbereich				TBM-O TBM-S TBM-DS SLS EPB HYS	TBM-O TBM-S TBM-DS	
eingeschränkter Einsatzbereich					SLS EPB HYS	
Stützdruck	[Bar]	0	1 - 4	4 - 7	7 - 15	
Haupteinsatzbereich		TBM-O TBM-S TBM-DS	SLS EPB HYS	SLS	SLS	
erweiterter Einsatzbereich		SLS EPB HYS		EPB		
eingeschränkter Einsatzbereich			TBM-O TBM-S TBM-DS	TBM-O TBM-S TBM-DS HYS	TBM-O TBM-S TBM-DS EPB HYS	

* ab 5 MPa im erweiterten Einsatzbereich

Tab. 2.5: Einsatzbereiche der TVM im Festgestein (Quelle: modifiziert nach [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)

2.4 Wesentliche Konstruktionselemente einer TVM

In diesem Unterkapitel sollen einige wesentliche Konstruktionselemente der bereits in *Kapitel 2.2 – Typisierung der gängigsten Tunnelvortriebsmaschinen* vorgestellten TVM näher erläutert werden. Dabei wird zunächst dem Weg des Materials gefolgt, welches anfänglich mittels der am Bohrkopf oder am Schneidrad befindlichen Abbauwerkzeuge gelöst wird. Anschließend erfolgt der Abtransport des Bohrkleins durch geeignete Fördereinrichtungen aus dem Maschinenbereich. Im Anschluss an die Beschreibung der Abbauwerkzeuge und der Fördereinrichtungen wird sich dem Ringspalt, zwischen der ausgebrochenen Tunnellaibung und der Außenseite der Tübbingauskleidung, gewidmet. Von wesentlicher Bedeutung beim Tunnelvortrieb in drückendem GW ist dabei die Schildschwanzdichtung, diese dichtet den beschriebenen Spalt ab. Den Abschluss bilden Einrichtungen zur Gebirgsinjektion, welche bei Störzonen im Verlauf des Vortriebes zur Anwendung kommen.

2.4.1 Abbauwerkzeuge in Abhängigkeit der Geologie

Der Vortrieb eines Tunnels sollte unter größtmöglicher Schonung des Gebirges stattfinden, um Gefügestörungen und Setzungen möglichst klein zu halten. Eine Variante des Gebirgsabbaus im Lockergestein stellen Schälmesser dar. Diese sind eine Weiterführung der historisch eingesetzten Schneidkanten. Schneidkanten sind vorstehende, geschärfte und durchgehende Plattenränder zum Abbau von homogenen Böden mit plastischen Eigenschaften. Sie sind ebenfalls zum Einsatz in locker gelagerten rolligen Böden, wie Sanden oder Kiesen, geeignet. Schälmesser unterscheiden sich von Schneidkanten durch eine Aufteilung der durchgehenden Schneidkante. Diese einzelnen Schälmesser wirken im Kollektiv und bestreichen die gesamte Ortsbrust. Im Optimalfall wird der Boden schneidend gelöst und gleitet an der Messervorderseite ab. Es existieren zahlreiche verschiedene Bauformen von Schälmessern, wodurch ein breites Einsatzspektrum abgedeckt werden kann. Meist kommt Hartmetall zum Einsatz, welches einen zusätzlichen Verschleißschutz aufweist. In Abhängigkeit des zu lösenden Erdreichs können Schälmesser alleine oder zurückversetzt, in Kombination mit Disken bzw. Schlitzmeißel, eingesetzt werden. Ihren Einsatz finden sie vor allem im Lockergestein und können dort mit großer Bandbreite verwendet werden.⁵²

Eine andere Möglichkeit zum Materialabbau in Lockergesteinen stellen Stichel, Schlitz- und Rundschaftmeißel dar. Stichel können rund oder vierkantig ausgeführt werden. Sie sind stumpfe Werkzeuge, welche orthogonal zur Ortsbrust orientiert sind und drehrichtungsunabhängig funktionieren. Diese lösen das Erdreich, indem sie es aufreißen und das Gefüge zerstören. Als Einsatzgebiet kommen dabei Schluffe, Sande oder Kiese in Frage. Meißel sind schmale Werkzeuge, welche mit einer austauschbaren Spitze ausgeführt werden. Deren Einsatzgebiet liegt im Abbau von harten Böden. Angebracht sind sie bei offenen Schilden meist schräg am Schneidrad.⁵² Bei Sedimentböden oder heterogenen Lockergesteinen werden verschiedene Abbauwerkzeugtypen verwendet, um eine optimale Wirksamkeit für die Bodenvariation zu erreichen.⁵³

Die Abbauwerkzeuge sind am mehr oder weniger geschlossenen Schneidrad angebracht, welches meist als Speicherschneidrad ausgeführt ist. Das Öffnungsverhältnis ist mittlerweile nicht mehr abhängig von dem gewählten Stützprinzip und liegt in der Regel bei 25 bis 35%. Dies ermöglicht den Einsatz eines geschlossenen Schneidrades sowohl bei flüssigkeitsgestützter, als auch bei einer erddruckgestützten Ortsbrust. Schneidräder werden im Allgemeinen anhand von Öffnungsverhältnis, Materialfluss, Umgang mit Findlingen und Wechsel des Abbauwerkzeugs bewertet. Das Öffnungsverhältnis muss so gewählt werden, dass das abgebaute Material ohne Druckverluste in die Abbaukammer gelangen kann. Dies ist besonders bei Erddruckschilden von

⁵²Vgl. [49] Maidl et al., S. 66 ff.

⁵³Vgl. [29] Girmscheid, S. 503

großer Bedeutung, da der nötige Stützdruck nicht optimal an das anstehende Gebirge angepasst werden kann. Die Öffnungen sollten jedoch nicht zu groß sein, da sonst Findlinge jeglicher Größe in die Abbaukammer gelangen können und diese womöglich nicht vom Gesteinsbrecher oder der Fördereinrichtung weiterverarbeitet werden können. Bedeutender als die Öffnungsfläche ist der Verlauf der Öffnung entlang des Schneidradradius. Eine Öffnung im Schneidradzentrum besitzt eine höhere Wertigkeit als jene am Rande des Schneidrades, da es insbesondere bei EPB zu Verklebungen im Bereich des Schneidradmittelpunkts kommen kann.⁵²

Für den Abbau von Hartgestein kommen großteils Disken, welche auch Rollenmeißel oder Schneidrollen genannt werden, zum Einsatz.⁵² Die möglichen Diskendurchmesser unterscheiden sich je nach Hersteller geringfügig und liegen im Bereich zwischen 165 – 508 mm⁵⁴ (6,5 – 20 Zoll) oder 205 – 508 mm⁵⁵ (8 – 20 Zoll). Die aufnehmbare Nennlast der Disken wird mit zunehmendem Durchmesser größer und variiert ebenfalls in Abhängigkeit des Diskenherstellers. Die kleinsten Rollmeißel mit einem Durchmesser von 165 mm besitzen eine Nennlast von 53 kN⁵⁴, wobei Disken mit dem maximalen Durchmesser von 508 mm eine Nennlast von 370 kN⁵⁵ aufweisen. Die am Bohrkopf montierten Disken werden mit hohem Druck gegen die Ortsbrust gedrückt und rotieren im Zuge des Vortriebs. Deren Anbringung erfolgt in konzentrischen Kreisen mit meist gleichmäßigem Abstand am Bohrkopf. Der Spurabstand beträgt in der Regel zwischen 70 und 100 mm. Das Gestein wird aufgrund des hohen Anpressdrucks zermahlen. Zwischen den Spurrillen der Disken tritt Spaltzugversagen auf. Dies erzeugt Risse im Gestein, wodurch die Gesteinchips aus dem Verbund der Ortsbrust fallen. Einen Nachteil im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Abbauwerkzeugen stellt bei Disken die schlechtere Eignung bei wechselnden Gebirgseigenschaften dar. Zu einem verstärkten Verschleiß kann es aufgrund eines Blockierens der Rollen kommen.⁵² Dies kann in bindigen Böden bei Verklebung der Disken eintreten. Die realisierbare Hublänge richtet sich nach der Gesteinhärte, dem Durchtrennungsgrad des Gebirges, dem Anpressdruck der Disken, dem Spurabstand und dem Keilwinkel des Diskenkranzes. Zur Reduktion des Materialverschleißes und Erhöhung der Vortriebsleistung sind der Anpressdruck, in Abhängigkeit der Diskendurchmesser, und die Abrollgeschwindigkeit zu optimieren. Weicht die Penetrationstiefe von dem maximal möglichen ab, so ist eine größere Anzahl an Umdrehungen nötig, was in längeren Diskenwegen resultiert. Die Überlegung, den Verschleiß durch geringere Anpressdrücke zu reduzieren, ist demnach nicht zielführend. Die anzustrebende Abrollgeschwindigkeit der Disken ist unabhängig von deren Durchmesser und beträgt etwa 110 m/min.⁵⁶ Um einen wirtschaftlichen Vortrieb zu ermöglichen muss ein kritischer Anpressdruck überwunden werden. Unterhalb dieses Bereichs fungieren die Disken lediglich als Gesteinsmühlen. Im Lockergestein sind die Rollmeißel ein geeignetes Mittel, um einzelne Gesteinsblöcke abzubauen und können daher in Kombination mit anderen Abbauwerkzeugen am Schneidrad angebracht sein. Um das abgebaute Material abtransportieren zu können sind Räumern am Bohrkopf anzuordnen, wodurch das gelöste Gebirge hinter den Bohrkopf verfrachtet wird. Diese finden bei jeder TBM im Vollschnitt Einsatz. Im standfesten Gebirgen sollte den Räumern keinerlei Lösefunktion zugeordnet werden. Bei Bohrköpfen mit Disken und Schälmessern können Räumern einen Beitrag zur Löseleistung beisteuern.⁵² In Abb. 2.7 ist ein Ausschnitt eines Bohrkopfes zu sehen, welcher mit Diskenmeißeln und Schälmessern zweierlei Zahnformen bestückt ist.

Die Befestigung von Rollmeißeln erfolgt in Schneidrollenhaltern, welche von der Rückseite am Bohrkopf montiert sind. Sie sollten so konstruiert sein, dass ein Werkzeugwechsel sowohl vor, als auch hinter dem Bohrkopf möglich ist.⁵⁷ Im Falle des Verschleißes der Abbauwerkzeuge sind diese jedenfalls auszutauschen, was meist von der Hinterseite des Schneidrades erfolgt. Die

⁵⁴Vgl. [57] Robbins-Headquarters

⁵⁵Vgl. [12] CREG TBM Germany GmbH

⁵⁶Vgl. [29] Girmscheid, S. 453 ff.

⁵⁷Vgl. [29] Girmscheid, S. 439



Abb. 2.7: Bohrkopf mit verschiedenen Abbauwerkzeugen (Quelle: [31] Herrenknecht AG)

äußeren Disken werden beim Vortrieb stärker beansprucht, da sie bei einer Bohrkopfumdrehung eine größere Strecke zurücklegen, als jene im Zentrum des Bohrkopfes. Demnach müssen diese öfter gewechselt werden. Bei geschlossenen Schneidrädern ist ein Werkzeugwechsel für alle Bereiche des Schneirades möglich.⁵² Meist kommen dabei hydraulische Werkzeuge zum Einsatz, welche diesen Wechselprozess vereinfachen und beschleunigen.⁵⁷ Wird ein Werkzeugwechsel einer TVM mit aktiver Stützung der Ortsbrust im geschlossenen Betriebsmodus angestrebt, so ist Vortriebspersonal mittels der Druckschleuse in die Abbaukammer des EPB oder des SLS einzuschleusen. Bei Wasserdrücken von mehr als 4 bar stellt sich ein Wechsel der Abbauwerkzeuge als besonders schwierig dar, da die Zuverlässigkeit der Ortsbruststützung erschwert und der Werkzeugverschleiß erhöht wird. Die mögliche Arbeitsdauer im inneren der Abbaukammer nimmt mit Zunahme des Stützdruckes signifikant ab. Dem kann durch den Einsatz von Mischgasen, wie beispielsweise Heliox, einer Mischung aus Helium und Sauerstoff, oder Trimix, was eine Mischung aus Helium, Stickstoff und Sauerstoff ist, entgegengewirkt werden. Die Dekompressionszeit wird in der Regel auf zwei Stunden begrenzt, um Unannehmlichkeiten wie das Tragen der Sauerstoffmaske oder den Aufenthalt in einer kleinen Personenschleuse für die Arbeiter zu minimieren.⁵²

2.4.2 Fördereinrichtungen

Das mittels des Schneirades abgebaute Material wird je nach Stützung der Ortsbrust entweder durch eine Flüssigförderung oder eine Dickstoffförderung aus der Abbaukammer gefördert. Findet keine aktive Stützung der Ortsbrust statt, kommt eine Trockenförderung zum Einsatz. Eine Flüssigförderung findet in der Regel bei einem Vortrieb mittels SLS ihren Einsatz, wobei das abgebaute Lockergestein und die Stützflüssigkeit als Suspension gefördert werden. Erfolgt der Tunnelvortrieb mittels EPB, kommt meist eine Dickstoffförderung zur Anwendung, wobei das abgebaute Material unter optionaler Zugabe von Wasser oder Fließmittel als plastisch verformbares Medium gefördert wird. Ein direkter Zusammenhang des Schildtyps mit der Art der Förderung besteht jedoch nicht, da die Fließgrenze eines plastisch verformbaren Bodens durch Zugabe von

Wasser oder Fließmittel herabgesetzt werden kann. Die Fördereinrichtungen einer TVM erfordern eine gleichmäßige Konsistenz des abgebauten Erdreichs, sowie eine maximale Korngröße.⁵⁸

Sind diese Anforderungen nicht alleine durch die Abbauwerkzeuge herstellbar, so sind zusätzliche Geräte vorzusehen. Dies können beispielsweise Abbauhämmer sein, welche das abgebaute Material weiter zerkleinern, Injektionsauslässe, welche die Zugabe von Flüssigkeiten zur Verbesserung der Fließfähigkeit ermöglichen, Knetarme, welche den Boden homogenisieren und durchmengen oder weitere Gesteinsbrecher unmittelbar vor der Förderschnecke. Zusätzliche Geräte sind auf die speziellen Anforderungen eines Projektes auszulegen und dürfen den kontinuierlichen Förderstrom unter keinen Umständen stören. Eine häufige Störungsquelle sind wechselhafte Bodeneigenschaften, welche besonders bei der Einleitung in ein kontinuierliches Fördersystem Komplikationen hervorrufen können.⁵⁸ Die Wahl zwischen einer kontinuierlichen Förderung mittels Förderbändern oder einer diskontinuierlichen schienen- oder radgebundenen Förderung ist nicht an die Art des Vortriebs gebunden, vielmehr spielen baubetriebliche Überlegungen eine verstärkte Rolle, aufgrund des Platzbedarfs innerhalb des Tunnels und an der Oberfläche. In Abhängigkeit der TVM fällt das abgebaute Material in unterschiedlicher Form an und bedarf gegebenenfalls einer Separierung oder einer Bodenaufbereitung, um es einer Deponie zuführen zu können.⁵⁹

Bei flüssigkeitsgestützter Ortsbrust kommt meist eine Flüssigförderung zum Einsatz, welche in Abb. 2.5 betrachtet werden kann. Das gelöste Material wird in einer Suspension mittels Kreiselpumpen gefördert. Dieses Verfahren ist platzsparend, jedoch mit den größten Förderungskosten verbunden. Bei diesem System wird die Stützflüssigkeit auch als Fördermedium herangezogen und in einer angeschlossenen Separationsanlage, vor dem erneuten Einsatz als Stützflüssigkeit in der Abbaukammer, von dem abgebauten Material getrennt. Bei besonders langen oder sehr tief liegenden Tunneln kann eine zusätzlich angeschlossene Druckerhöhungspumpe erforderlich sein. Der Absaugung aus der Abbaukammer ist ein Rechen mit davor wirkendem Gesteinsbrecher vorgeschaltet. Dieser ermöglicht, je nach Ausführung, die Zerkleinerung von Steinen zwischen 400 mm und 1.200 mm. Dabei ist darauf zu achten, dass die verbleibende Öffnung der Absaugung nicht zu sehr eingeschränkt wird, wodurch es zu Druckschwankungen kommen könnte. Ein besonderes Augenmerk ist bei der Gestaltung der Abbaukammer darauf zu legen, dass es aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit zu keinen Anhäufungen von gelöstem Erdreich kommt. Falls dies trotzdem eintreten sollte, kann die Stützflüssigkeit über verstellbare Düsen, beim Wiedereinführen in die Abbaukammer nach der Separationsanlage, als lösender Strahl verwendet werden. Eine Separationsanlage ist bei jeder hydraulischen Förderung anzuordnen und trennt beim Schildvortrieb meist den abgebauten Boden vom Stützmedium. Dazu wird meist eine Bentonitsuspension eingesetzt. Je nach Größe der SM fallen zwischen 50 m³/Std. bis hin zu 2.800 m³/Std. an. Diese Anlagen sind jedoch für größere Frachten ausgelegt sein, um einen ausreichenden Puffer zu bieten. Im Zuge des Vortriebs kann es zu Schwankungen der Förderleistung kommen, was es bei der Planung zu berücksichtigen gilt. Als Richtwert der zu erwartenden Dichte kann ein Wert von 1,3 t/m³ herangezogen werden, wobei dieser einer Bandbreite unterliegt. Eine vollständige Trennung der Suspension ist meist aus Kosten- und Aufwandsgründen nicht möglich, weshalb im Vorhinein festgelegt werden muss, bis zu welchem Grad eine Trennung des abgebauten Materials von der Stützflüssigkeit erfolgen soll. Als Trennverfahren kommen dabei Sedimentation und Filtration zur Anwendung. Andere Trennverfahren wie Verdampfung eignen sich aus kostentechnischen Gründen nicht. Nach Durchlaufen der Separationsanlage wird die Stützflüssigkeit erneut in die Abbaukammer der TVM geleitet und das abgeschiedene Aushubmaterial der Deponierung zugeführt.⁵⁸ Die Zuleitung zur Abbaukammer

⁵⁸Vgl. [49] Maidl et al., S. 99 ff.

⁵⁹Vgl. [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

ist mit geringerem Durchmesser ausgeführt als die Ableitung, da in dieser auch größere Feststoffe mitgeführt werden können. Die Bentonitflüssigkeit wird in einer eigenen Bentonitmischanlage hergestellt, wobei Wasser mit Trockenbentonit vermischt wird. Das Mischverhältnis kann an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden, wobei standardmäßig eine Rezeptur von etwa 35 kg Bentonit je m^3 Wasser zur Anwendung kommt. Eine Bentonitmischanlage wird von Bentonitsilos mit einem Lagervermögen von 50 bis 100 t, einer Mischanlage mit einer Leistung von 20 bis 50 $\text{m}^3/\text{Std.}$ und einem Frischbentonitbecken, in dem die anfängliche Quellung stattfindet, mit einer Größe von 100 bis 400 m^3 gebildet.⁶⁰

Bei Vortrieb mit erddruckgestützter Ortsbrust erfolgt meist eine Dickstoffförderung, wie in Abb. 2.6 betrachtet werden kann. Das abgebaute Erdreich wird mittels Förderschnecke durch die Druckwand befördert, wobei der in der Abbaukammer herrschende Druck abgebaut wird. Die Förderung erfolgt direkt mittels der Förderschnecken, da diese in der Regel drehzahlregulierbar ausgeführt werden. Ist ein besonders hoher Stützdruck für den Vortrieb erforderlich, können zwei Schneckenförderer mit verschiedener Drehzahl aneinander angeschlossen werden, um im Zwischenbereich der beiden Förderungssysteme eine sichere Abdichtwirkung zu erzielen. Als zusätzliche Ausstattung der Schneckenförderer sind Injektionsstutzen angebracht, welche die Zugabe von Schmiermittel ermöglichen, sowie ein Verschlusschieber. Darüber hinaus weisen sie zahlreiche Wartungsöffnungen auf, um die gesamte Schneckenwendel im unausgebauten Zustand einer Untersuchung unterziehen zu können. Das Fördersystem wird mit Hartmetall ausgekleidet, um besonders guten Schutz vor Verschleiß zu bieten. Bei geringen Stützdrücken sollte das Einlassende der Förderschnecke mindestens zwei bis drei Rotationshöhen in das abgebaute Medium hereinragen. Für den Falle einer notwendigen Schneckenwartung kann diese aus dem Hüllrohr entfernt werden, wobei die Einlauföffnung verschlossen wird, was die Aufrechterhaltung des Stützdrucks ermöglicht. Das größtmöglich förderbare Gesteinskorn liegt bei etwa 40% des Schneckeninnendurchmessers. Diese Förderschnecke kann mit oder ohne Seele ausgeführt werden, wobei großteils Schneckenwendel mit Seelee eingesetzt werden.⁵⁸ Im Anschluss an die Schneckenförderung wird das abgebaute Erdreich meist mittels eines Förderbandes bis zur Übergabevorrichtung des Nachläufers verfrachtet und dort dem anschließenden Fördersystem übergeben. Dabei stehen radgebundene und gleisgebundene Schutterwägen oder weitere Förderbänder zur Verfügung. Die Dickstoffförderung ist im Vergleich zur Flüssigförderung billiger, da das gelöste Material meist direkt ohne Nachbehandlung gelagert werden kann und keiner Nachbehandlung unterzogen werden muss.⁶⁰

Beim Vortrieb im Festgestein wird das mittels der Rollmeißel gelöste Material von den Räumern hinter den Bohrkopf verfrachtet und anschließend mittels Trockenförderung aus dem Tunnel gefördert. Die im Folgenden beschriebene Trockenförderung kann in Abb. 2.2, Abb. 2.3 und Abb. 2.4 betrachtet werden. Durch die Drehbewegung des Bohrkopfes gelangen die Chips zum Muckring, von wo sie auf dem Maschinenband verteilt, zum hinteren Ende der TBM gebracht und dort dem Fördersystem übergeben werden. Kommt es zu einem Wassereintritt, kann dies in Kombination mit dem gelösten Boden zu einer Verstopfung der Fördereinrichtungen der Maschine und somit zu einer Störung führen. Die Gestaltung der Förderkanäle ist in Abhängigkeit des anzutreffenden Gebirges zu wählen. Als Vorteilhaft gilt es jedoch, die Anzahl zu reduzieren und im Gegenzug die Größe zu erhöhen, um damit die Zugänglichkeit zu gewährleisten. Alternativ dazu kann der Bohrkopf auch mit vielen Förderkanälen bestückt werden, was einen besonders gleichmäßigen Materialstrom ermöglicht und die Leistung an jene des eventuell nachgeschalteten Förderbandes annähert.⁵⁸ Die Trockenförderung kann kontinuierlich oder diskontinuierlich ab dem Ende des Maschinenbandes erfolgen. Bei der diskontinuierlichen Förderung findet der Materialtransport vom hinteren Ende der TBM bis außerhalb des Tunnels entweder mit radgebundenen oder schie-

⁶⁰Vgl. [29] Girmscheid, S. 523 ff.

nengebundenen Maschinen statt. Die kontinuierliche Förderung erfolgt mittels Förderbändern, wobei ein Bandspeicher anzuordnen ist, um stetig auf die längere Förderstrecke aufgrund des Tunnelvortriebs reagieren zu können. Im Falle eines völlig ausgezogenen Bandspeichers kann das Förderband verlängert werden, dies erfolgt meist in etwa 500 m Schritten. Förderbandanlagen gelten im allgemeinen als teure Fördereinrichtung und werden meist nur bei längeren Vortriebsstrecken eingesetzt oder wenn die Bandanlage wiederholt verwendet werden kann. Als Vorteile gelten die kontinuierlich hohe Leistung, die Möglichkeit zur Kürzung des Nachläufers um den Verladebereich, der Wegfall des maschinellen Transports des Aushubmaterials durch die Tunnelröhre, die geringe Staubentwicklung im Vergleich zur diskontinuierlichen Förderung, der Wegfall der Behinderung der nachlaufenden Gewerke und der geringere Wartungsaufwand am Fördersystem.⁶⁰

2.4.3 Schildschwanzdichtung und Ringspaltverfüllung

Im Zuge des Tunnelvortriebs entsteht fortlaufend ein Spalt zwischen der Außenseite der Tübbinge und der Tunnellaibung, welcher kontinuierlich verfüllt werden muss. Diese Füllung dient primär dem Zweck, einen Kraftschluss zwischen dem Gebirge und der Tunnelauskleidung herzustellen. Diese Ringspaltverfüllung beugt außerdem dem Nachbrechen des Gebirges vor, reduziert Setzungen und verhilft der Tunnelröhre zur Lagestabilität. Das Füllmaterial unterscheidet sich bei Vortrieben im Festgestein von jenen im Lockergestein mit aktiver Ortsbruststützung. Beim Festgesteinvortrieb kann der entstehende Spalt mit einem Feststoff verfüllt werden, was hinter dem Schild durch Öffnungen in den Tübbingen, meist mittels Perlkies, erfolgt. Wird der Vortrieb mit aktiver Stützung der Ortsbrust abgewickelt, soll die Ringspaltverfüllung neben der Herstellung des Kraftschlusses auch das Abrinnen des Stützmediums verhindern. Aus diesem Grund sollte die Ringspaltfüllung selbst dicht sein, wofür großteils ein speziell entwickelter Mörtel zur Anwendung kommt. Dieser wird über mehrere Injektionsauslässe rund um den Schildschwanz eingepresst. Das Injektionsmaterial muss eine ausreichende Pumpfähigkeit aufweisen, ohne zum Abfließen zu neigen.⁶¹ Tab. 2.6 zeigt drei gängige Rezepturvarianten des Verpressmörtels. Der Ringspaltmörtel wird meist mit einem Größtkorn von 8 mm hergestellt, wobei die Kornfraktion zwischen 4 bis 8 mm einen Anteil von etwa 50% ausmacht. Der Erhärtungsprozess startet in der Regel erst nach 5 bis 7 Stunden nach der Herstellung und erreicht eine Endfestigkeit von 3 bis 7 N/mm².⁶² Einen wichtigen Aspekt stellt die frühzeitige Erhärtung dar, um ein Aufschwimmen der Tübbingröhre zu verhindern und die Gewichtskräfte des Nachläufers ableiten zu können. Das zeitgerechte Erhärten und die Vollständigkeit der Ringspaltverfüllung sollte mittels Kontrollen bestätigt werden. Dies kann mit Kontrollöffnungen in den Tübbingen erfolgen. Für den Transport und die Injektion des Verfüllmaterials stehen drei Optionen zur Auswahl:⁶¹

- Einzelkomponentenlagerung auf der TVM und Mischung bei Bedarf
- Einsatzbereites Verfüllmaterial auf TVM gelagert und bei Bedarf Zugabe von Beschleunigern
- Zwei-Komponentensystem separat auf TVM gepumpt und beim Verpressen miteinander vermischt

Jene Methode des zwei Komponentensystems hat sich in den vergangenen Jahren am Markt durchgesetzt. Bilden lediglich die Tübbingringe die Tunnelschale, so dient neben der Tübbingdichtung auch die Ringspaltfüllung der Dichtigkeit, um eine völlige Abdichtung des Tunnels zu gewährleisten. Dafür kann im Hartgesteinvortrieb der Perlkies zusätzlich verpresst und der

⁶¹Vgl. [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

⁶²Vgl. [49] Maidl et al., S. 169 ff.

Ringspaltmörtel, bei Vortrieben mit aktiver Ortsbruststützung, nachverpresst werden.⁶¹ Wird der Ringspaltmörtel nachverpresst, so dient die Primärverpressung der unmittelbaren Herstellung einer Bettung der Tübbingringe, um Setzungen zu begrenzen. Die Sekundärverpressung dazu, die restlichen Hohlräume zu verfüllen. Die Injektionsauslässe rund um den Schildschwanz weisen eine ovale oder runde Querschnittsform auf und besitzen einen Nenndurchmesser zwischen 50 und 65 mm. Um eine Verstopfung der Injektionsleitungen zu verhindern, darf der Durchmesser des Größtkorns maximal ein Drittel der Auslassgröße betragen. Je nach Größe der TVM unterscheidet sich die Anzahl an Auslässen, als Richtwert kann ein Abstand von 4 bis 5 m zwischen den benachbarten Leitungen herangezogen werden. Oftmals sind vertraglich Reserveleitungen gefordert, welche jedoch zu einer Schwächung der Statik des Schildschwanzes führen.⁶²

Komponenten	Gewichtsprozent
Mischungsvariante 1	
Zement	14
Steinmehl	17
Feinsand	59
Wasser	10
Mischungsvariante 2	
Zement	24
Steinmehl	47
Silokalk	12
Wasser	17
Mischungsvariante 3	
Zement	4
Sand	58
Füller	25
Bentonit	1
Wasser	12

Tab. 2.6: Verpressmörtelrezepturen (Quelle: modifiziert nach [49] Maidl et al., S. 181 f.)

Um das Eindringen von Wasser oder Boden ins Maschineninnere zu verhindern, ist eine Schildschwanzdichtung am Schildmantel angebracht, welche den Spalt zur Tübbingaußenkante abdichtet. Dies ist insbesondere bei TVM mit aktiver Stützung der Ortsbrust von großer Bedeutung, um vor einem Eintritt des Stützmediums zu schützen. Darüber hinaus verhindert sie einen Eintritt der Ringspaltverfüllung. Die Schildschwanzdichtung in Kombination mit der Ringspaltfüllung ist ein wesentliches Element, um herausfordernde Vortriebsabschnitte erfolgreich zu durchörteren. Die Konstruktionshöhe der Schildschwanzdichtung und die Konizität der TVM legen die Größe des Ringspaltes fest, welcher meist zwischen 115 und 140 mm beträgt. Als absolute Grenzwerte ist das Minimum mit 85 mm und das Maximum mit 185 mm festgelegt. Die Dichtung weist einen Arbeitsbereich zwischen 30 und 50 mm, bei einer Bauhöhe von 60 bis 95 mm auf und muss den im Zuge des Vortriebs auftretenden Drücken standhalten. Historisch wurden zunächst verschiedene Stoffe, wie beispielsweise Putzklappen, Holzwolle oder der gleichen, händisch in den Ringspalt gestopft, bevor diese durch die heute üblichen Kunststoff- oder Stahlbürstendichtungen ersetzt wurden. Beim Vortrieb der TVM kann es durch das neu entstehende Volumen im Ringspalt zu einem Druckabfall der Ringspaltverfüllung kommen, wodurch Wasser oder Boden in den

Ringspalt eintreten kann. Durch einen solchen Eintritt wird zwar der Druckabfall ausgeglichen, jedoch kann es zu einem verschlechterten Lagerungszustand des Bodens kommen.⁶²

Kunststoffabdichtungen werden auch als Gummidichtung oder Lynaceldichtung bezeichnet und finden oftmals bei Vortrieb mit TBM-S Verwendung, wenn die Tunnelsohle mit Mörtel und der First mit Perlkies verpresst wird. Sie bestehen aus dünnen Blechstreifen, welche als Federelement dienen und über die komplette Außenlaibung der Tübbinge gleiten, sowie einem Schaumstoffanteil. Im Bedarfsfall ist es möglich, jedes Federblech einzeln zu tauschen. Diese Dichtungsart eignet sich jedoch nicht für den Einsatz in drückendem GW, wohingegen der günstige Anschaffungspreis und die schnelle Austauschbarkeit einen wesentlichen Vorteil darstellen. Um diese Dichtungsart bei drückendem GW einsetzen zu können, wurde die sogenannte S1-Dichtung entwickelt, welche aus geschlossenen Neoprenprofilen besteht. Die Dichtungslippen gleiten über die Tübbingaußenschale und sorgen so für eine Abdichtung bei den vorherrschenden Drücken. Um das Schutzniveau zusätzlich zu erhöhen, ist eine aufblasbare Notdichtung angebracht. Dieses Dichtungssystem bildet mit der Schildfahrt, dem Tübbingsystem und der Ringspaltverpressung ein herausforderndes Gesamtsystem. Aufgrund eines Versatzes der Tübbinge oder eines verschmutzten Schildschwanzes kann es zu einem Wassereintritt kommen – was es zu verhindern gilt.⁶² Als Vorteile dieses Dichtungssystems ist die Umweltverträglichkeit und die Robustheit zu nennen, wohingegen die verhältnismäßig steife Ausführung zu einem Problem der Dichtheit bei Versätzen einzelner Tübbingelemente führen kann.⁶³

Aufgrund der zahlreichen Einschränkungen, die mit der Verwendung von Kunststoffabdichtungen einhergehen, wurde die Stahlbürstendichtung in Japan entwickelt. Diese ist ebenfalls fest am Schildschwanz angebracht und eignet sich für die Verwendung bei langen Vortriebslängen und herrschenden Wasserdrücken, weshalb sie häufig bei Vortrieben mit aktiver Ortsbruststützung eingesetzt wird. Sie besteht aus bis zu vier hintereinander in Serie wirkenden Bürstenreihen, welche von Federblechen abgedeckt sind und mit dem äußeren Schildschwanzblech und der Tübbingschale eine Dichtkammer bilden. In den Zwischenräumen der Bürstenreihen befindet sich eine unter Druck stehende Dichtmasse, welche auch als Schmiermittel fungiert und einen etwa um zwei bar höheren Druck aufweist, als der Verpressmörtel im Ringspalt. Durch diesen Überdruck wird das Eindringen von Wasser, Bodenpartikel oder Verpressmörtel in den Dichtungsbereich verhindert. Im Vergleich zu anderen Dichtungssystemen wird bei der Stahlbürstendichtung, im Falle eines Druckabfalls des Verpressmörtels, ein Eindringen von Wasser oder Boden in den Ringspalt verhindert, da in diesen Fällen die im Überdruck befindliche Dichtmasse aus den Bürstenzwischenräumen in den Ringspalt gedrückt wird. Aus diesem Grund ist die Umweltverträglichkeit des verwendeten Mediums nachzuweisen. Treten in den Längsfugen der Tübbinge Absätze auf, so können diese mittels der Dichtmasse geschlossen werden. Stahlbürstendichtungen sind im Vergleich zu Kunststoffdichtungen wesentlich robuster. Der mit der Vortriebslänge zunehmende Verschleiß kann durch eine Erhöhung der Dichtmasse ausgeglichen werden. Sind Wartungsarbeiten an der Stahlbürstendichtung erforderlich, so können die Bürsten problemlos getauscht werden. Für abrupte Störfälle kann die Dichtung mittels spezieller wasserreaktiver Dichtmassen als Sofortmaßnahme verpresst werden.⁶² Die permanent erforderliche Abgabe von Dichtmasse in die Bürstenzwischenräume führt bei einer notwendigen Umweltverträglichkeit des eingesetzten Mediums zu einem erheblichen Kostenfaktor. Vorteilhaft wirkt sich aus, dass Höhenversätze von Tübbingen problemlos ausgeglichen werden können, ohne einen Verlust der Dichtheit.⁶³

Bei einem Vortrieb mittels TBM-S erfolgt keine aktive Stützung der Ortsbrust, was zu Folge hat, dass die Ringspaltfüllung nicht gezielt an ihrem vorgesehenem Ort bleibt. Um einen Vortrieb unter solchen Bedingungen jedoch trotzdem zu ermöglichen wurde die äußere Schildschwanz-

⁶³Vgl. [29] Girmscheid, S. 506

dichtung entwickelt, welche ein unkontrolliertes Ausbreiten des Verpressmörtels verhindert. Sie ist als geschichtetes Federblechpaket aufgebaut, wobei die Abdichtung durch ein vollumfänglich dichtes Anliegen gegen die Tunnellaubung erreicht wird. Die Dichtwirkung wird maßgeblich von der Qualität der Tunnellaubung und den Gebirgseigenschaften beeinflusst. Wird eine weitere Bürstenreihe vorgeschaltet, so kann die entstehende Dichtkammer mit Dichtmasse gefüllt werden, was eine Redundanz des Dichtsystems zur Folge hat. Nachteilig wirkt sich jedoch der entstehende Überdruck der Dichtkammer aus, welcher den Startvorgang beim Überfahren der Anfahrtdichtung erschwert.⁶²

2.4.4 Gebirgsinjektionseinrichtungen

Ein wesentlicher Faktor, welcher den Erfolg eines Tunnelbauprojekts bestimmt, ist der geologische Zustand des zu durchörternden Gebirges. Durch eine detaillierte Gebirgsuntersuchung kann die TVM an die vorherrschende Geologie angepasst werden. Um einen Vortrieb durch unerwartete Störzonen zu ermöglichen oder durch Bereiche, an welche die Vortriebsmaschine bewusst nicht angepasst wurde, kann die TVM mit Injektionseinrichtungen ausgestattet werden. Bei einer Gebirgsinjektion wird ein fließfähiger Stoff in das Gebirge eingeleitet, um dieses zu verfestigen oder abzudichten. Das Injektionsmaterial strömt dabei im Festgestein in Risse oder Klüfte und im Lockergestein in Poren und vergrößert das Einsatzspektrum einer TBM. Durch diesen Vorgang wird nicht nur das Durchörteren von Störzonen ermöglicht, sondern auch die Begehung der Abbaukammer unter besonders ungünstigen Bedingungen und die Reduktion des Wasserzuflusses. Darüber hinaus finden Injektionen beim Freifahren der Schildschwanzdichtung im Schadensfall Anwendung. Injektionen unterliegen baubetrieblichen Überlegungen, da diese mit Behinderungen des Vortriebes einher gehen und demnach nur gezielt angewandt werden sollten.⁶⁴

Die Injektionseinrichtungen sollten fest an der TVM installiert sein, wodurch Zeitverluste durch eine Montage vermieden werden. Im Schildmantel und der Druckwand sind verschließbare Öffnungen vorzusehen, um Bohrungen in das Gebirge vortreiben zu können. Sämtliche zur Herstellung von Injektionsmitteln benötigte Anlagen sind idealerweise am Nachläufer der TVM anzubringen. Oftmals wird eine Mehrphaseninjektion durchgeführt, wobei ein kostengünstigeres Injektionsmittel im Zuge der ersten Verpressung injiziert wird, um größere Hohlräume auszufüllen. Im Zuge einer zweiten Injektion wird eine hochwertigere Injektionsmasse eingebracht, um kleinere Klüfte zu verschließen.⁶⁴ Im Allgemeinen werden folgende Anforderungen an das Injektionsmittel gestellt:⁶⁵

- Stabilität gegen Sedimentation bei Verwendung von Suspensionen
- Stabilität gegen Entmischung durch hydrostatischen Druck bei Verwendung von Suspensionen
- gute Fließeigenschaften, die an die Gebirgsverhältnisse angepasst werden können
- ausreichende Festigkeit/Resistenz gegen eventuell vorhandenes aggressives Wasser
- keine unangenehme Geruchsentwicklung im Tunnel
- geringer Herstellungsaufwand
- Umweltverträglichkeit (Grundwasser)

⁶⁴Vgl. [49] Maidl et al., S. 182 ff.

⁶⁵Aus [49] Maidl et al., S. 185

Am Häufigsten finden Zementsuspensionen oder Bentonitzementsuspensionen ihren Einsatz, wobei sich letztere für die Injektion von großen Hohlräumen eignen und das Bentonit die Sedimentationsprozesse des Injektionsmittels reduziert. In Tab. 2.7 sind die gängigsten Injektionsmittel auf Zementbasis und auf chemischer Basis mit der jeweiligen Eignung des Injektionsgutes angegeben. Dabei wird zwischen vorseilenden Injektionen und Injektionen in den Ringspalt unterschieden. Vorseilende Injektionen werden nach ihrem Zweck zur Abschirmung von Wasser, zur Verfestigung von Boden oder zur Verfüllung von Klüften untergliedert. Oftmals werden Fließmittel hinzugegeben, um die Fließeigenschaften der Suspension zu verbessern, was jedoch zu einer Verschlechterung anderer relevanter Eigenschaften, wie beispielsweise der Filterstabilität oder der Festigkeit führt. Die durchschnittliche Erhärtungszeit beträgt etwa 4 bis 5 Stunden, wobei nach sieben Tagen eine Druckfestigkeit von etwa 1,5 N/mm² und nach 28 Tagen eine Endfestigkeit von ungefähr 3 bis 4 N/mm² erreicht wird. Einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Injektionsmittels hat der W/Z-Wert, welcher die Viskosität beschreibt. Bei einem zu hohen Wert neigt die Suspension zum Abscheiden von Wasser, was als Ausbluten bezeichnet wird. Feine Hohlräume bergen die Gefahr des Verstopfens durch ein Eindicken der Injektionsmittel, was zu einem Anstieg des Injektionsdrucks führt und in Gebirgssprengungen enden kann. Zur Injektion solcher feiner Hohlräume wurden spezielle Injektionsmittel entwickelt, welche eine besonders gute Verarbeitbarkeit aufweisen, preislich jedoch deutlich teurer sind. Bei diesen Produkten ist die Umweltverträglichkeit ebenfalls vor Verwendung nachzuweisen.⁶⁴

Injektionsmittel	vorseilende Injektion			Ringspalt-injektion
	Wasser	Boden	Klüfte	
Injektionen auf Zementbasis				
Portlandzement - CEM I	●	●	●	●
Portlandzement - CEM III	●	●	●	
Zement mit hoher Frühfestigkeit	●	●		●
Mikrofeinzement	●	●	●	
Flugasche		●		●
Injektionen auf chemischer Basis				
PU-Injektion	●	●		□
Wasserglas (Natriumsilikat)	■			■
Silikat-Gel	●			□
Minova Celbex 802				■

- primär verwendetes Injektionsgut
- sekundär verwendetes Injektionsgut
- Versuch und Testmaterial

Tab. 2.7: Einsatzbereich verschiedener Injektionsmittel (Quelle: modifiziert nach [49] Maidl et al., S. 186 f.)

2.5 Tübbinge

Dieses Unterkapitel widmet sich Tunnelauskleidungen mit Tübbingen, wobei zunächst allgemeine Anforderungen und Grundsätze beschrieben werden. Im Anschluss sind die verschiedenen Ausführungsformen und deren Wirkungsweise aufgezeigt. Darauf aufbauend wird die Funktionsweise und Ausbildung der Tübbingabdichtung dargelegt. Den Abschluss bildet die Betrachtung des Produktionsprozesses und damit verbundenen einzuhaltende Herstellungstoleranzen.

2.5.1 Allgemeines

Tübbinge sind Betonsegmente, welche segmentweise zusammengesetzt werden und einen Ring bilden, welcher als Tunnelauskleidung fungiert. Durch die Zusammensetzung der einzelnen Tübbingsegmente entstehen zahlreiche Fugen, dabei wird zwischen Ringfugen und Längsfugen unterschieden. Ringfugen teilen einzelne Tübbingringe voneinander und Längsfugen trennen Tübbingelemente eines Ringes.⁶⁶ Im Zuge des Vortriebs dienen Tübbinge der Abstützung der geschildeten TVM und der Ableitung der Vorschubkräfte. Darüber hinaus können sie die Tunnelauskleidung bilden. Sie sichern die Standsicherheit des Gebirges und übernehmen die Aufgabe der Gebrauchstauglichkeit über die Nutzungsjahre. Liegt der errichtete Tunnel unterhalb des Grundwasserspiegels, können Tübbinge auch zur Abdichtung des GW dienen. Tübbinge sind, wie die meisten TVM, auf kreisrunde Querschnitte begrenzt. Ihre Dimensionierung wird im Zuge der statischen Berechnung festgelegt und ist hauptsächlich von Gebirgs- und Wasserdruck abhängig, sowie von den Vorschubpressen der TVM.⁶⁷

Aufgrund der sich bereits früh einstellenden Steifigkeit des Tübbingausbaus treten initiale Gebirgsverformungen meist lediglich im Bereich der Ortsbrust auf, weshalb es bloß zu geringen Lastumlagerungen kommt. Die Baugrunderkundung hat bei Tunnelvortrieben mit einschaligem Tübbingausbau einen besonders hohen Stellenwert, da die Tübbingdicke, welche im Zuge der Planung bestimmt wird, nicht an eine veränderte Einwirkung adaptiert werden kann. Alle wesentlichen geotechnischen Kenngrößen sind für sämtliche aufzufahrende Bodenarten im Vorhinein zu bestimmen. Die sich daraus ergebenden geologischen Verhältnisse sind Gebirgsverhaltenstypen zuzuordnen und im Zuge der Vortriebsklassenbestimmung zu berücksichtigen. Erfolgt die Verpressung des Ringspalttes mittels Verpressmörtel, werden die Tübbinge gegen das Gebirge vorgespannt. Dies kann im Zuge der statischen Berechnungen in einer verbesserten Ringbettung berücksichtigt werden. Wird eine kompressible Ringspaltverfüllung verwendet, kann die Verformbarkeit der Tübbingringe und des Verfüllmaterials berücksichtigt werden und die Gebirgsauflasten abgemindert werden. Kommt beispielsweise Perlkies zum Einsatz, so ist im Bereich des Firstes eine verschlechterte Bettung der Tübbinge, aufgrund des Nachsackens des Verfüllmaterials, zu berücksichtigen. Wird ein Verpressmörtel eingesetzt, so sollte dieser eine lediglich geringfügig höhere Festigkeit aufweisen als das umgebende Gebirge. Ansonsten werden wesentliche Anteile der herrschenden Normalkräfte von dem Ringspaltmörtel abgetragen und die in der Berechnung angesetzten Normalkräfte in den Tübbingungen werden unter Umständen nicht erreicht. Im Zuge der statischen Nachweise sind sämtliche ständigen, veränderlichen, seltenen und außergewöhnlichen Einwirkungen zu ermitteln und in die Berechnung einfließen zu lassen. Die Ermittlung der wirkenden Schnittgrößen kann mittels Stabwerkmodell oder Kontinuummodell erfolgen. Das Stabwerkmodell legt die Tunnelauskleidung als gebetteten Stabzug zugrunde, wobei die angesetzten Federkennlinien durch ein Rechenmodell berechnet werden. Es wurde ursprünglich für den Brückenbau entwickelt, hat sich jedoch ebenfalls für Tübbinge bewährt. Kontinuumsberechnungen können besonders realitätsnahe Ergebnisse liefern, sollten jedoch stets mit einer analytischen Berechnung verifiziert werden. Sie eignen sich jedoch kaum für die Tübbingbemessung. Die stützende Wirkung des umhüllenden Baugrundes kann mittels normal auf die Tübbingschale wirkenden Bettungsfedern berücksichtigt werden. Etwaige geometrische Vorverformungen, etwa aufgrund von Einbautoleranzen, sollten im Zuge der statischen Berechnung auf der ungünstigen Seite liegend berücksichtigt werden.⁶⁸

Da die meisten Tunnelbauprojekte auf eine Nutzungsdauer von 100 Jahren ausgelegt sind, muss die Dauerhaftigkeit, also insbesondere die plangemäße Tragfähigkeit und die Gebrauch-

⁶⁶Vgl. [49] Maidl et al., S. 129 ff.

⁶⁷Vgl. [49] Maidl et al., S. 125

⁶⁸Vgl. [13] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

stauglichkeit, mit angemessenem Aufwand an Instandsetzungsarbeiten sichergestellt werden können. Diese Sanierungsarbeiten, sowie jegliche Inspektionsarbeiten, sind jedoch nur in geringem Ausmaß möglich, da bei erdberührten Bauteilflächen und sonstigen verdeckten Elementen die Zugänglichkeit im eingebauten Zustand nicht gegeben ist. Die Anforderungen, die im Zuge der Dauerhaftigkeit über die Nutzungsdauer gestellt werden, sind:⁶⁸

- Tragfähigkeit der Tübbingringe
- Dichtigkeit gegen drückendes GW
- Vermeidung von Abplatzungen
- Beschränkung der Schäden durch Korrosion

Um die Funktionalität des Tunnels über die Nutzungsdauer sicherzustellen sind Alterungsprozesse, welche die Stahlbewehrung schädigen, zu verhindern. Diese Prozesse können sowohl einzeln, als auch in Kombination miteinander auftreten und sich gegenseitig verstärken, dazu zählen insbesondere:⁶⁸

- Karbonatisierung der Oberfläche
- Sulfatangriff durch sulfathaltiges Wasser
- Chlorangriff von Tausalzen oder salzhaltigem Wasser
- Thermische Wechselbeanspruchung
- Mechanische Verschleißbeanspruchung, etwa durch Reinigungsarbeiten

Um die Dauerhaftigkeit positiv zu beeinflussen, können folgende Punkte beachtet werden:⁶⁸

- Hohe Betonfestigkeitsklasse, meist C40/50
- Geringe Porosität der Betonoberfläche durch:
 - Geringen W/Z-Wert
 - Abgestufte Sieblinie
 - Einhaltung der Ausschulfristen
 - Schadenfreie Produktion, Lagerung und Einbau
- Einhaltung der geforderten Betonüberdeckung:
 - Mindestüberdeckung von 40 mm
 - Bei starkem Sulfat- oder Chlorangriff auch größer 40 mm
- Lagesicherheit des Bewehrungskorbes durch lokales Punktschweißen
- Rissbreitenbegrenzung auf:
 - Breite von 0,2 mm
 - Breite von 0,15 mm bei drückendem GW

Kommen Stahlfasern als Bewehrung der Tübbinge zum Einsatz, kann es zur Korrosion der oberflächennahen Fasern kommen, wobei dies aufgrund des geringen Durchmessers nicht zur Abplatzung des Betons führen würde. Eine solche Korrosion der Stahlfasern stellt also lediglich ein ästhetisches Problem dar, ist jedoch aus bautechnischer Sicht nahezu unbedeutend. Bei Straßentunnel ergibt sich aufgrund der großen Eindringtiefen der Chloride ein wesentliches Dauerhaftigkeitsproblem.⁶⁸

Der Brandschutz spielt auch im Tunnelbau eine wesentliche Rolle und verfolgt das Schutzziel, die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Tunnels im Brandfall zu gewährleisten. Im Gegensatz zum Brandschutz eines Hochbauprojekts zeichnet sich dieser im Tunnelbau durch höhere erreichte Temperaturen und einen schnelleren Temperaturanstieg aus, wobei die thermischen Einwirkungen in einem Temperatur-Zeit-Diagramm dargestellt werden. Um die Tübbinge vor einem Brand zu schützen, kann die Tunnelinnenschale mit einem speziellen Brandschutzputz beschichtet werden. Dieser Brandschutzputz weist eine weiche und elastische Struktur auf und wirkt in geringem Ausmaß rissüberbrückend, was Bauwerksinspektionen hinsichtlich etwaiger Risse der Tübbinge obsolet macht. Um die Funktionalität gewährleisten zu können, ist ein ausreichender Haftgrund sicherzustellen, wobei der Lebenszyklus der eingesetzten Materialien zu beachten ist. So werden Tübbinge meist auf eine Lebensdauer von 100 Jahren ausgelegt, wobei die der Brandschutzputze bei etwa 25 bis 35 Jahren liegt. Aus diesem Grund müssen diese in der Nutzungsdauer des Tunnels mehrmals getauscht werden. Eine Alternative zu Brandschutzputzen stellen Brandschutzplatten dar, wobei an die Befestigung dieser Platten ein besonderer Anspruch hinsichtlich ihrer Korrosionsbeständigkeit gestellt wird. Solche Platten verhindern, wie Brandschutzputze auch, die Bauwerksprüfung der Tübbinge. Sie weisen ebenfalls eine Nutzungsdauer von 25 bis 35 Jahren auf. Alternativ zu diesen beiden Systemen kann ein ausreichender Brandschutz durch die Beimischung von Polypropylenfasern zum Beton der Tübbinge erreicht werden. Diese Kunststofffasern schmelzen bei Temperaturen von etwa 160° C und erzeugen dadurch Hohlräume in den Tübbingungen, was eingeschlossene Luft entweichen lässt und dadurch die Tübbinge vor Abplatzungen schützt. Die eingesetzten Fasern sollen einen runden Querschnitt mit einer glatten Oberfläche aufweisen. Sie besitzen meist eine Länge zwischen 2 bis 12 mm und einen Durchmesser von etwa 12 bis 35 µm. Als Mischungsverhältnis kann ein Wert von etwa 2 kg Polypropylenfasern je m³ Beton herangezogen werden. Die Prüfung dieses Systems sollte an einem Tübbing erfolgen, welcher die selben Abmessungen und die selbe Betonzusammensetzung wie die tatsächlich geplanten aufweist. In der Brandkammer kann der im Einbau erwartete Spannungszustand mittels hydraulischer Pressen aufgebracht werden. Der Brandversuch gilt als erfolgreich, wenn die eingetretenen Abplatzungen in einem geringen Umfang bleiben und sich die Bewehrung nicht übermäßig erhitzt. Durch dieses Brandschutzsystem ist eine Bauwerksinspektion jederzeit und ohne jeglichen zusätzlichen Aufwand möglich. Bei Tunnel unterhalb des Grundwasserspiegels ist oftmals neben dem Brandverhalten auch die Dichtigkeit der Tunnelchale nach einem Brandereignis von erheblicher Bedeutung. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn eine anschließende Sanierung mit einem erheblichen Kosten- und Zeitaufwand verbunden ist und ein Wassereintritt gravierende Schäden mit sich bringt. Die Dichtigkeit der Tübbinge im Brandfall kann ebenfalls im Zuge eines Brandversuches nachgewiesen werden.⁶⁸

Die Tunnelauskleidung kann in einschaliger oder zweischaliger Weise erfolgen, wobei in Österreich der zweischalige Ausbau häufig bei Tunnel mit großen Durchmessern im Hartgestein zur Anwendung kommt. Bei einem einschaligen Aufbau werden sämtliche inneren und äußeren Einwirkungen von den Tübbingungen abgetragen. Bei zweischaliger Auskleidung hingegen leiten die außenliegenden Tübbingungen meist die äußeren Kräfte ohne den Grundwasserdruck ab und die Innenschale die inneren Kräfte, samt des Grundwasserdrucks. Die Vorteile des zweischaligen Ausbaus liegen darin, dass durch die Verwendung einer Folienabdichtung ein vollständig wasserdichter Tunnel hergestellt werden kann. Die Befestigung etwaiger Einbauten kann kostengünstig und

ohne großen Planungsaufwand ausgeführt werden. Der Brandschutz wird durch die Innenschale gewährleistet, welche nach einem Brand problemlos erneuerbar ist. Querschläge können einfach hergestellt werden. Dem gegenüber stehen beispielsweise die Nachteile, dass die Innenschale meist erst nach dem Ende des Vortriebsprozesses errichtet werden kann, was zu einer Verlängerung der Bauzeit und Baukosten führt. Etwaige Undichtigkeiten sind nur schwer zu lokalisieren und die Innenschale wird meist lediglich durch geringe Normalkräfte beansprucht, was zu großen Schwindrissen führen kann. Sobald der Tübbingring den Schildschwanz im Zuge des Vortriebs verlässt, übernimmt dieser bereits Lasten, wobei die endgültige Tragfähigkeit nach dem Verpressen des Ringspalt erreicht wird. Die Ringspaltverpressung, welche meist regelmäßig im Zuge des Vortriebs durch Auslässe am Schildschwanz erfolgt, ermöglicht eine gleichmäßige Belastung der Tübbingung und gewährleistet eine sofortige Bettung. Durch die Produktion im Fertigteilewerk mit kontinuierlicher Qualitätsüberwachung kann eine gleichmäßig hohe Qualität erreicht werden. Ist mit anstehendem GW zu rechnen, so kann der Tunnel mittels Kompressionsdichtungsrahmen der Tübbingung sofort dagegen abgedichtet werden.⁶⁸

2.5.2 Konstruktionsvarianten

Betontübbingung können grundsätzlich nach der Fugengestaltung in Tübbingung mit ebenen Ringstirnflächen und jene mit versetzten Ringfugen unterteilt werden. Bei der Errichtung der Tübbingung sollte darauf geachtet werden, Kreuzfugen möglichst zu vermeiden. Dazu versetzt man die einzelnen Tübbingringe in der Regel um die Hälfte oder ein Drittel der Tübbingabwicklungslänge gegeneinander. Dadurch werden die nachteiligen Auswirkungen der Kreuzfugen auf Tragfähigkeit und Dichtheit umgangen.⁶⁹ Mit größeren Tübbingabmessungen wird die Vortriebszeit verringert und die Anzahl und Länge der Fugen reduziert. Dabei wirken sich Einbauungenauigkeiten im Falle größerer Tübbingung stärker aus und können zu Spannungskonzentrationen in den Fugenbereichen führen, was Risse zur Folge haben kann. Weiters wird die Kurvenfahrt bei größeren Tübbingabmessungen erschwert und die Anforderungen an die Vortriebspresen steigen. In ihren Ursprungsformen wurden Tübbingung aus Stahl oder Gusseisen hergestellt, diese Formen finden heute jedoch aus Kostengründen kaum noch Anwendung und wurden von Stahlbetontübbingungen verdrängt. Aufgrund projektspezifischer Anforderungen haben sich mehrere Konstruktionsmöglichkeiten von Tübbingungen entwickelt.⁷⁰ Nachfolgend werden einige Tübbingformen aufgelistet und kurz nach ihren bedeutendsten Merkmalen beschrieben.⁶⁹

Tübbingringe mit ebenen Ringfugen: Diese Tübbingvariante kommt mit Abstand am häufigsten zum Einsatz, wobei etwa 6 bis 9 Tübbingelemente zu einem Ring zusammengesetzt werden.

Keilförmige Tübbingringe: Diese Tübbingform ermöglicht einen zwängungsfreien Tübbingeinbau in der Kurvenfahrt, wobei die Ringbreite auf der Krümmungsaußenseite etwas größer ausgeführt wird als auf der Krümmungsinenseite. Keilförmige Tübbingringe ermöglichen eine reibungslose Ausführung, indem sie beliebig gegeneinander verdreht werden können.

Spreiztübbingringe: Dieses Tübbingssystem beruht darauf, dass ein keilförmiger Schlusstein etwas vor den Ringspalt hervorsteht. Im Zuge des Vortriebs wird dieser Schlusstein plan zum Ringspalt gepresst, wodurch sich der gesamte Tübbingring gegen das umliegende Gebirge spreizt. Dadurch kann die Ringspaltverfüllung entfallen, wobei ein Einsatz auf kurzfristig standfeste Gebirgsarten ohne freiem GW beschränkt ist.

⁶⁹Vgl. [13] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

⁷⁰Vgl. [49] Maidl et al., S. 129 ff.

Spartübbing: Spartübbinge finden Anwendung, wenn die größte Belastung erst nach Fertigstellung der Innenschale auftritt, was beispielsweise bei Tunnelbauprojekten mit Grundwasserabsenkung eintritt.

Wabentübbingringe: Diese Tübbinge weisen eine sechseckige Form auf und werden nicht miteinander verschraubt, weshalb sie meist nur bei einfachen geologischen Bedingungen, wie einem Hartgesteinvortrieb ohne nennenswerten Grundwassereintritt, verwendet werden. Die Kurvenfahrt erweist sich als äußerst herausfordernd und ist nur durch den Ringspalt möglich, welcher für die Kurvenfahrt mit unterschiedlicher Dicke an Füllmaterial ausgefüllt wird.

Sonderformen: Vor allem bei Vortrieb im Hartgestein wurden Sonderformen entwickelt, dazu zählen beispielsweise Tübbingringe mit speziellen Sohlübbingen oder Tübbingsysteme, welche in der Sohle eine einschalige Bauweise aufweisen und im Gewölbe zweischalig ausgeführt werden.

Im Zuge des Planungsprozesses ist eine ausreichende Toleranz zu berücksichtigen, welche den Tübbinginnendurchmesser meist um etwa 20 cm vergrößert. Bei zweischaligem Ausbau kann diese Toleranz geringer ausfallen. Als Richtwert der Tübbingdicke kann ein Wert von 15 bis 75 cm angenommen werden, wobei die Tübbingstärke mit zunehmendem Tunnelquerschnitt größer wird. Die tatsächliche Stärke richtet sich nach statischen und konstruktiven Anforderungen, dabei sollte eine Tübbingstärke von 30 cm bei einschaligem Ausbau nicht unterschritten werden. Die Tübbingbreite variiert zwischen 0,75 bis 2,50 m, die Tendenz geht zu immer breiter werdenden Tübbingen. Die Kurvenfahrt wird durch keilförmige Tübbinge ermöglicht, wobei sich die Keilform aus dem Tübbingaußendurchmesser, multipliziert mit der Ringbreite, geteilt durch den minimalen Kurvenradius errechnen lässt. Da ein Tunnelvortrieb exakt auf der geplanten Route nicht möglich ist, sollten auch bei geradem Vortrieb keilförmige Tübbingringe eingebaut werden. Durch Zwischenlagen in den Ringfugen wird diese Forderung noch verstärkt, da diese ungleichmäßig zusammengedrückt werden. Das keilförmige Tübbingsegment sollte an einer Seite platziert werden und an den bestehenden Tübbingringen anschließen, dadurch kann die Keilform mit einem neu errichteten Tübbingring ausgeglichen werden. Die Tübbingfugen müssen auf die Vortriebspresen abgestimmt werden, dafür sollten sie gleichmäßig über den Umfang der TVM verteilt sein. Die Krafteinleitung sollte stets an dafür vorgesehenen Bereichen erfolgen, da diese mittels Spaltzugbewehrung und eventuell mit Zwischenlagen verstärkt werden. Erfolgt die Einleitung der Vortriebskräfte nicht zentrisch, werden Biegemomente hervorgerufen, welche zu Schäden an den Tübbingen führen können.⁶⁹

Die Fugen zwischen den Tübbingsegmenten sollten so ausgebildet sein, dass eine Kraftübertragung über Bereiche erfolgt, welche mittels konstruktiver Bewehrung verstärkt worden sind. Bereiche welche nicht entsprechend bewehrt werden können, wie beispielsweise Randbereiche, sind durch ihre geometrische Gestaltung zu entlasten, was etwa durch die Ausbildung von Rücksprüngen möglich ist. Neben dieser Anforderung an die Fugengestaltung sollten Kerben in lastübertragenden Bereichen vermieden werden und ein eventuell zum Einsatz kommender Dichtungsrahmen einen ausreichend großen Randabstand aufweisen. Längsfugen dienen vornehmlich der Übertragung der inneren und äußeren Ringschnittkräfte und können auf vier verschiedene Ausführungen hergestellt werden. Die einfachste Ausführungsform stellt die ebene Fuge dar, weitere herstellbare Formen sind Nut und Feder, sowie konvex und konkav und vice versa. Bei einschaligem Tunnelausbau hat sich die ebene Fugen durchgesetzt. Bei der Nut-/Feder Fuge können aufgrund der erforderlichen Betonüberdeckung die wesentlichen Fugenelemente nicht bewehrt werden, was zu einem Abbrechen der Feder führen kann. Die Fugenausbildung mit konvex und konkaven Randflächen stellen eine maßgebliche Herausforderung der Fugenherstellung dar.

Ringfugen übertragen die Vorschubkräfte auf den dahinterliegenden Tübbingring, wobei eine ungleichmäßige Lasteinleitung in der Kurvenfahrt bei der Bemessung berücksichtigt werden muss. Sie können wie Längsfugen als ebene Fuge oder als Nut-/Feder Fuge ausgeführt werden. Darüber hinaus besteht die Option, bei der ebenen Fuge zusätzliche Kopplungselemente vorzusehen. Beim einschaligen Ausbau werden größtenteils ebene Fugen verbaut, welche bei Notwendigkeit mit Zentrierelementen oder Koppellelementen versehen werden können. Dabei kommen meist Dübel sowie bewehrte oder unbewehrte Topf-Nocken Systeme zur Anwendung. Um selbst bei Überschreitung der Tragfähigkeit die Dichtheit des Systems gewährleisten zu können, sollte die Nocke abscheren bevor der Topfrand beschädigt wird. Diese Koppellelemente können aus Kunststoff hergestellt werden. Die Ausbildung der Ringfuge mit Nut und Feder geht mit einer erhöhten Anforderung an die Genauigkeit einher. Bei leicht versetzten Elementen kann es zu Abplatzungen kommen, weshalb dies nur bei schlechten Untergrundeigenschaften eingesetzt wird. Zum Ausgleich von Unebenheiten können Zwischenlagen in der Ringfuge eingebracht werden, dies ist in den Längsfugen nicht vorgesehen. Diese Zwischenlagen können aus Hartfasermaterial oder Sperrholz ausgeführt werden. Ein plastisch verformbares Material eignet sich dazu nicht, da dieses den vorgesehenen Abstand nicht sicherstellen kann. Wird auf Zwischenlagen verzichtet, so ist eine höhere Genauigkeit bei der Tübbingversetzung erforderlich.⁶⁹

Verbindungsmittel zwischen den einzelnen Tübbingringen dienen in erster Linie der Vorspannung der Kompressionsfugenbänder und dem Maschinenvortrieb. Sie werden nach Erhärtung des Ringspaltmörtels oder nach dem Einbau von etwa 10 weiteren Tübbingringen überflüssig und können entfernt werden. Verbleiben die Schrauben als Verbindungsmittel zwischen den Tübbingsegmenten, müssen diese gegen Lösen gesichert sein und einen Korrosionsschutz aufweisen. Dies findet häufig bei Übergängen zu Ortbetonkonstruktionen oder etwaigen Anschlüssen Anwendung. Werden die Verbindungsmittel nur temporär benötigt, können schräggeführte Schrauben oder Kunststoffdübel verwendet werden, welche eine elastische Verbindung darstellen, besonders leicht montiert werden und mit geringem Aufwand ausgebaut werden können. Mittels Steckdübeln kann die Montagezeit reduziert und die Bewehrungsführung vereinfacht werden, wobei Zentrierkonen zweckmäßig sind. Diese Steckdübel sind jedoch nur schwer zurückzubauen. Eine weitere Alternative stellen zugfeste Dübelverbindungen dar, dabei kann auf Schraubverbindungen verzichtet werden.⁶⁹

Soll die Tunnelauskleidung eine Tragfunktion für etwaige Einbauten, wie beispielsweise eine Oberleitung oder Signale, übernehmen, so ist dies bei einschaligem Ausbau bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen. Erfolgt der Ausbau in zweischaliger Weise, können derartige Einrichtungen meist problemlos an der Ortbetonschale montiert werden. Bei einschaligem Tübbingausbau stehen zur Befestigung von Einbauteilen drei wesentliche Optionen zur Verfügung. Es können Ankerschienen in der Tübbingschale verlegt und anschließend mit einbetoniert werden. Stählerne Befestigungsplatten, welche ebenfalls in der Schalung eingebaut werden, stellen eine Alternative dar. Als Option, ohne der Berücksichtigung im Zuge des Herstellungsprozesses, können solche Befestigungen erst nach Errichtung des Tübbingringes angedübelt werden. Wird die künftige Befestigung in den Tübbing eingebaut, muss darauf geachtet werden, dass die Tübbingsegmente in ihrer entsprechenden Position im Tunnel eingebaut werden, wobei auf die Randabstände der Einbauelemente zu den umgebenden Fugen zu achten ist. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Geometrie des Tübbingrektors maßgeblich von der Lage der Ankerschienen und Befestigungsplatten beeinflusst wird. Eine Befestigung mittels Dübeln stellt eine wesentlich flexiblere Option dar, wobei beim Bohren darauf zu achten ist, dass die Bewehrung der Tübbinge nicht beschädigt wird. Aus diesem Grund sollten bei der Herstellung der Tübbingbewehrung eigene Dübelgassen freigehalten und diese auf der späteren Oberfläche gekennzeichnet bzw. Bohrschablonen verwendet werden. Sind besonders hohe Lasten zu befestigen, können diese direkt

im Gebirge montiert werden. Dafür wird die Tübbingschale durchstoßen, was allerdings günstige hydrologische Rahmenbedingungen voraussetzt.⁶⁹

2.5.3 Abdichtungssysteme

Beim einschaligen Tunnelausbau übernehmen die Tübbing vollständig die Dichtfunktion. Wohingegen diese beim zweisehaligen Ausbau meist von der Innenschale oder einer zusätzlich verlegten Kunststoffabdichtung übernommen wird. An die Tübbing sind demnach keine Dichteanforderungen gestellt, weshalb im Folgenden der erste Fall näher beleuchtet wird. Die Dichtigkeit der Tübbingröhre wird fast ausschließlich durch die Dichtigkeit der Fugen bestimmt, da Stahlbeton in den ausgeführten Dimensionen einen ausreichenden Schutz gegen anstehendes Wasser bietet. Dafür haben sich in der Praxis auf den Stirnflächen umlaufende Profile aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) etabliert.⁷¹ Diese Dichtungsbahnen können bereits in die Schalung der Tübbing eingelegt und anschließend mit betoniert, oder nachträglich auf den fertigen Tübbing festgeklebt werden. Abb. 2.8 zeigt systematisch den Aufbau eines nachträglich aufgeklebten Abdichtungsprofils und Abb. 2.9 jenen des im Beton verankerten Profils. Die Verbundwirkung zwischen der Abdichtung und dem Beton wird, bei dem bereits in die Schalung eingebrachtem System, meist über Verankerungsfüße erreicht, welche an der Unterseite der Dichtung extrudiert sind. Dadurch wird der Weg verlängert, an welchem das Wasser die Dichtung hinteraspülen kann, außerdem kann sich die Abdichtung bei Rangierung nicht vom Tübbing lösen, jedoch kommt es zu einer höheren Kerbwirkung, was Betonabplatzungen zufolge haben kann. Die Höhe des Abdichtungsprofils wird meist von dem Hersteller in Abhängigkeit des Wasserdruckes bestimmt, wobei die Profilhöhe meist zwischen 20 und 50 mm liegt und etwa das 1,6-fache der Höhe betragen soll, damit ein Kippen verhindert wird.⁷²

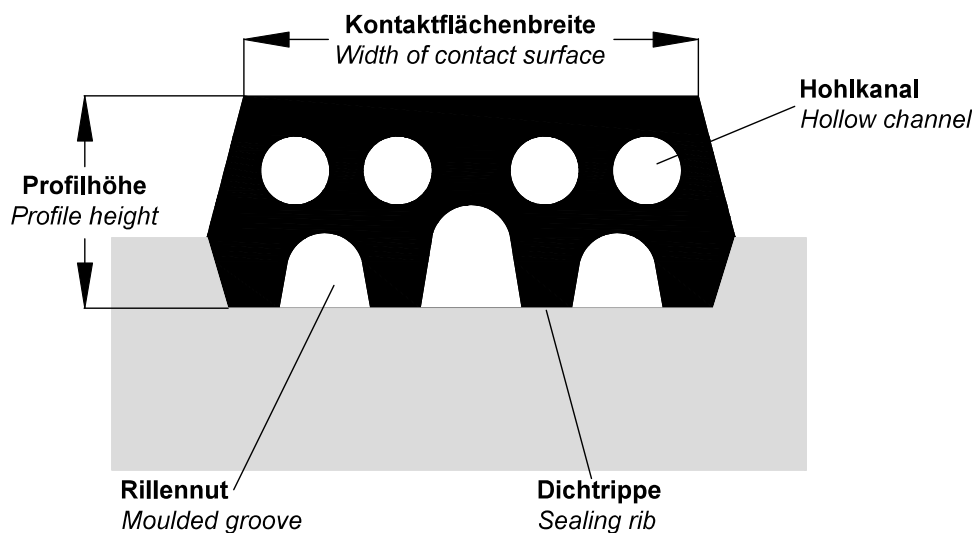


Abb. 2.8: Aufgeklebtes Abdichtungsprofil (Quelle: [72] Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V.)

Die Dichtprofile werden im eingebauten Zustand sowohl paarweise gegeneinander gedrückt, als auch direkt gegen den Stahlbetontübbing. Durch die geometrische Ausbildung der Stirnflächen und der Dichtungsprofile soll eine lückenlose Tübbingschale erzeugt werden, was die Dichtigkeit

⁷¹Vgl. [13] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

⁷²Vgl. [72] Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V.

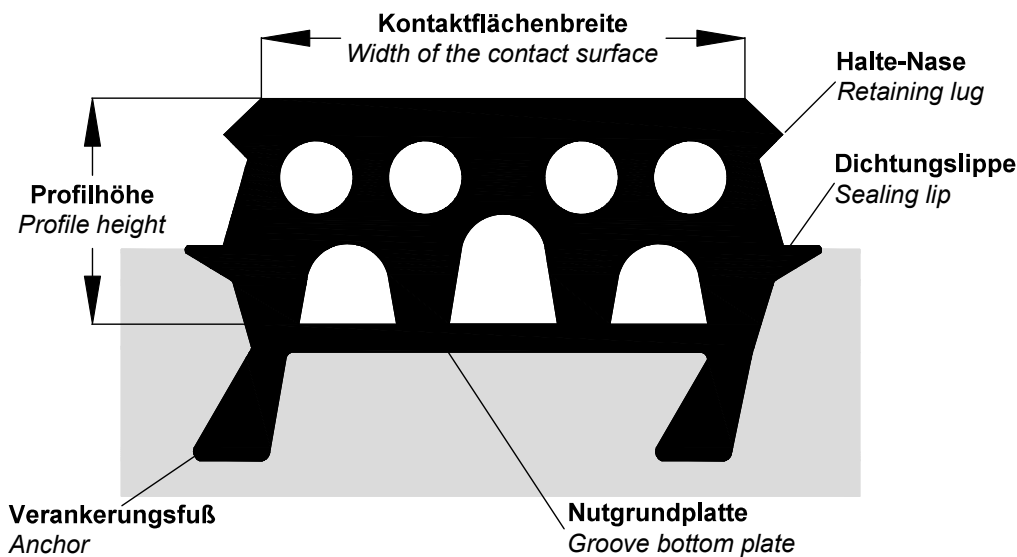


Abb. 2.9: Verankertes Abdichtungsprofil (Quelle: [72] Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V.)

sicherstellt.⁷¹ Um die Abdichtung zu schützen, kann eine Vordichtung bergseitig angeordnet werden, welche Schutz vor eindringendem Ringspaltmörtel und Schildschwanzfett bietet. Diese Vordichtung ist so aufzukleben, dass ein Lösen im Zuge der Manipulation ausgeschlossen werden kann und besitzt im Endzustand keinerlei Funktion mehr.⁷³ Die Dichtfunktion der EPDM-Profile beruht ausschließlich auf dem Kontaktdruck, mit welchem diese gegeneinander gepresst werden, da diese Profile nicht direkt mit dem Beton verbunden sind. Aus diesem Grund ist sicherzustellen, dass der Kontaktdruck mit einer ausreichenden Größe am kompletten Tübbingumfang erfolgt, um den herrschenden Wasserdruck aufnehmen zu können. Die möglichen Versagensstellen sind dabei die Kontaktfläche der beiden Dichtprofile, sowie die jeweilige Kontaktfläche der Dichtprofile mit der Betonnut. Meist kommen bereits in der Praxis bewährte Dichtungssysteme zum Einsatz, dadurch können Kosten für eine Systementwicklung mit notwendiger Systemprüfung und Zulassung gespart werden. Die Entwicklung neuer Systeme erfolgt dabei von den Produzenten, wobei dies meist mehrere Überarbeitungsschritte benötigt und unter Miteinbeziehung anderer Projektbeteiligter erfolgt. Im Zuge des Extrudierens findet die Vulkanisation und Formgebung der EPDM-Profile statt. Die geraden Bahnen werden mittels Eckformteilen zu einem Dichtungsrahmen zusammengesetzt und im Zuge einer erneuten Vulkanisation miteinander verbunden. Bei planmäßiger Komprimierung des Dichtprofils sollte ein Hohlraumanteil von etwa 10% eingehalten werden und sich dieser gleichmäßig über mehrere längliche, voneinander getrennte, Kammern verteilen. Wird ein solcher Hohlraumanteil nicht eingehalten, so steigt die Steifigkeit der Dichtung sprunghaft an und es entstehen Spreizkräfte, welche zu Beschädigungen an den Tübbing führen. Die Dichtfunktion soll nicht ausschließlich bei planmäßig hergestellten Tübbing und Dichtungen gegeben sein, sondern ist für sämtliche Abweichungen innerhalb der gültigen Toleranzen sicherzustellen. Die wesentlichsten Toleranzen können nachfolgender Aufzählung entnommen werden. Abweichungen vom Planzustand, welche nicht angeführt sind, werden mittels eines erhöht angesetzten Prüfdruck berücksichtigt:⁷¹

- Geometrische Abmessungen
- Gewicht

⁷³Vgl. [75] ÖBBV Richtlinie: 2009-08, S. 37

- Verformungsverhalten
- Exzentrischer Druck der Dichtungsprofile
- Nicht ausreichender Anpressdruck der Dichtungen

Um ein Abplatzen des Betons zu verhindern, ist der Abstand der Nut von der Tübbingaußenkante in ausreichender Größe vorzusehen. Als Richtgröße kann ein Wert von 40 bis 50 mm herangezogen werden. Im statischen Nachweis gegen Abplatzen des Betons wird üblicherweise die bei minimalem Nutgrundabstand, also dem Abstand der tiefsten Stellen zweier Dichtungsnuten bei vorherrschender maximaler Kompression, entstehende Spannung als Belastung der Nutflanke angesetzt. Werden Kompressionsfugenbänder eingesetzt, so ist meist eine vorübergehende Verschraubung der Fugen vorzusehen, um die Rückstellkräfte des Dichtungsprofils aufnehmen zu können. Diese ist solange aufzubringen, bis der Ringspaltmörtel vollständig erhärtet ist. Um die Funktionalität der verwendeten Dichtung langfristig sicherstellen zu können, muss das Material eine ausreichende Materialbeständigkeit aufweisen und konstant den erforderlichen Kontaktdruck einhalten. Um das Material in seiner gesamten vorgesehenen Nutzungsdauer auf diese Anforderungen zu prüfen, hat es sich in der Praxis etabliert, einen um den Faktor zwei vergrößerten Wasserdruck anzusetzen. Als besonders kritische Bereiche können Rahmenecken angesehen werden, da diese besonders anfällig gegen Undichtigkeiten und Abplatzungen im Vergleich zu anderen Stellen des Tübbings sind. Bei dem Versuch diese Risiken zu minimieren, stößt man jedoch auf das Problem, dass ein geringerer Kontaktdruck die Gefahr von Abplatzungen vermindert, wohingegen das Risiko von Undichtigkeiten durch einen hohen Kontaktdruck reduziert werden kann. Trotz aller Vorkehrungen kann ein völlig dichter Tunnel bei einschaligem Ausbau nicht gewährleistet werden, auch wenn dies in der Regel von den Bauherrn gefordert wird. Diese Problemstellung sollte im Bauvertrag berücksichtigt werden, ohne die Anforderung auf Dichtheit aufzugeben. Dabei ist zwischen Einzelzutritten und dem Gesamtwasseranfall zu unterscheiden, sowie der Anfallsort des eintretenden Wassers zu berücksichtigen. Im Bauvertrag können die zu tolerierende Restwassermenge und die eventuell notwendigen Nachdichtungsmaßnahmen festgelegt werden. Um sensible Einbauten vor eingedrungenem Wasser zu schützen, kann im Zuge der Planung etwa eine schwalbenschwanzförmige Nut an der Tübbinginnenseite vorgesehen werden, obwohl von einer dichten Tunnelschale ausgegangen wird. Die Entwässerung eingetretener Wassermengen kann mit der meist ohnehin erforderlichen Ableitung des Schleppwassers erfolgen.⁷¹

2.5.4 Produktionsprozess

Tübbinge sind das Produkt einer Massenproduktion, welche ein Kostenminimum bei gleichzeitig hoher Qualität sicher stellen soll. Die Kosten der Tübbinge können bei langen Tunnel bis zu 30% der Projektkosten ausmachen. Es kann zwischen einem statischen Herstellungsverfahren, bei dem die Schalung stets an einem Ort verbleibt und der Bewehrungskorb und der Beton zu diesem transportiert werden und dem Umlaufverfahren unterschieden werden. Das Umlaufverfahren hat sich in der Praxis etabliert, dabei werden die einzelnen Schalungen zufolge dem Fließbandprozess zwischen den einzelnen Arbeitsschritten verschoben. Der wesentliche Vorteil des Umlaufverfahrens bestehen darin, dass eine höhere Produktivität mit einem geringeren Einsatz an Arbeitskräften und weniger Platz- und Maschinenbedarf erreicht werden kann. Im Zuge der Projektplanung ist eine Wahl zwischen einer Tübbingfertigung auf der Baustelle und der Anfertigung im Fertigteilwerk zu treffen. Ein Vorteil der Herstellung vor Ort sind geringe Transportkosten, wohingegen hohe Investitionskosten einen wesentlichen Nachteil darstellen. Vorteile einer Fertigung im Fertigteilwerk sind die eingespielte Qualitätsüberwachung und das erfahrene Personal, allerdings führen die Transportkosten zu einem höheren Preis. Wesentliche Produktionskomponenten sind

die schienengebundene Produktionsstraße, der Platz zur Bewehrungskorbherstellung, eine Betonmischanlage mit zugehörigen Materialsilos, dem Lagerplatz für das fertiggestellte Endprodukt und eine Anlage zur Entsorgung von kontaminiertem Abwasser. Als ersten Produktionsschritt wird die Schalung gereinigt und anschließend mit einem Schalöl bestrichen, darauf folgt der Einbau des Bewehrungskorbes samt Abstandhaltern und etwaigen Einbauteilen. Im Anschluss wird die Schalung seitlich geschlossen und mit Beton befüllt, wobei dieser mittels eines Rütteltisches verdichtet wird. In weiterer Folge wird die Betonoberfläche abgezogen und das Tübbingsegment in eine Dampfanlage verschoben, welche eine beschleunigte Erhärtung ermöglicht. Bevor die Tübbingsegmente zum Lagerplatz gebracht werden und die Abdichtung montiert wird – wenn diese nicht bereits in die Schalung vor dem Betoniervorgang eingelegt wurde – werden sie aus der Schalung genommen und der Qualitätsprüfung unterzogen. In Abb. 2.10 ist ein Tübbingsegment zu sehen, das aus der Schalung gehoben wird. Für die Planung der Tübbingfertigung sind die Menge an zu erzeugenden Tübbingsegmenten, die Qualitätsanforderungen an diese, der Terminplan und die vorherrschenden Platzverhältnisse auf der Baustelle ausschlaggebende Einflussfaktoren.⁷⁴



Abb. 2.10: Tübbing mit Schalung (Quelle: [44] Implenia AG)

Der bei der Produktion verwendete Beton muss den Vorgaben der ÖNORM B 4710-1: 2018-01-01 [55] *Beton – Festlegung, Eigenschaft, Herstellung, Verwendung und Konformität – Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton* genügen, darüber hinaus werden in der ÖBBV Richtlinie: 2009-08 [75] *Tübbingsysteme aus Beton* weitere Anforderungen gestellt. Diese betreffen im Wesentlichen die Festigkeitsklasse, die Expositionsklasse und gegebenenfalls die Festigkeitsentwicklung. Die geforderte Festigkeitsklasse entspricht in der Regel einer Mindestdruckfestigkeit, welche meist obsolet wird, da in der Praxis die Wahl auf eine Betonfestigkeitsklasse C40/50 fällt und diese die geforderten Werte ohnehin übersteigt. Die Konsistenzklasse des Betons ist vom Planer festzulegen. Zu beachten ist, dass im Gegensatz zur sonst üblichen Praxis die Konsistenzgrenze nicht als F45 festgelegt wird, wenn sonstige Angaben fehlen. Vorgaben betreffend Expositionsklasse, Frühfestigkeit, Größtkorn, Oberflächenbeschaffenheit und Betonausgangsstoffe müssen den einschlägig geltenden gesetzlichen Vorgaben entsprechen.⁷⁵

⁷⁴Vgl. [29] Girmscheid, S. 578 ff.

⁷⁵Vgl. [75] ÖBBV Richtlinie: 2009-08, S. 24 ff.

Tübbinge sollten im Allgemeinen so hergestellt werden, dass eine Mindestüberdeckung der Bewehrung von 40 mm stets gegeben ist, wobei diese zum Beispiel an Stirnflächen auf 20 mm reduziert werden kann. Sind besondere Anforderungen an die Dauerhaftigkeit gestellt, kann die Betonüberdeckung größer ausgeführt werden, wobei dies stets mit einer Reduktion der statischen Nutzhöhe einhergeht und einen dementsprechenden statischen Nachweis bedarf. Die Tübbingbewehrung sollte in einem Raster mit etwa einem Abstand von 100 bis 150 mm verlegt werden. Diese Werte können überschritten werden, wobei dies negative Auswirkungen auf den Nachweis der Rissbreiten hat. Werden Einbauteile an der Schalung montiert, sollte eine lichte Öffnung des Bewehrungskorbes von 90 auf 120 mm freigehalten werden. Die Mindestbewehrung kann als allgemeiner Richtwert mit einem Bewehrungsdurchmesser von 10 mm und einem Rasterabstand von 150 mm angegeben werden.⁷⁶

Alternativ zur herkömmlichen Stabstahlbewehrung können Tübbinge mit Stahlfasern hergestellt werden. Diese Stahlfasern sollten im Beton idealerweise in alle Richtungen gleichermaßen orientiert und gleichmäßig innerhalb des Tübbings verteilt sein. Sie erhöhen die Duktilität des Betons und beeinflussen das Rissverhalten positiv. Da sich die Stahlfasern auch in den Randbereichen der Tübbinge befinden, sind Abplatzungen unwahrscheinlicher und die Randzonen im Vergleich zu herkömmlichen Stahlbetontübbingen verstärkt. Es muss jedoch nicht zwischen reinem Stahlfaserbeton oder reinem herkömmlichen Stahlbeton gewählt werden – diese beiden Konstruktionsvarianten können auch kombiniert werden. Häufig wird aufgrund der hohen Spaltzugbeanspruchung durch die Vortriebspresen lokal herkömmliche Stahlbewehrung eingelegt. Die Stahlfasern weisen meist eine Länge von etwa 40 bis 60 mm auf und besitzen eine Schlankheit, also ein Verhältnis Länge zu Durchmesser, von etwa 50 bis 80. Die Menge der Stahlfasern richtet sich nach den Anforderungen, die an den fertigen Tübbing gestellt werden, wobei ein Mindestfasergehalt von 25 kg/m³ eingehalten werden sollte. Dieser Wert besitzt allerdings in der Praxis kaum Bedeutung, da meist Fasergehalte von 30 bis 50 kg/m³ verwendet werden. Um verbesserte Brandeigenschaften zu erhalten, können dem Stahlfaserbeton Polypropylenfasern beigefügt werden. Ein Einsatz von Stahlfaserbetontübbingen bei ungünstigen Expositionsbedingungen ist ungünstig, da es zu einer erhöhten Oxidation der Stahlfasern kommen kann. Die Wirkung der Stahlfasern im Beton zeigt erst nach der ersten Rissbildung ihre Wirkung, davor unterscheidet sich das Verhalten kaum von einem Beton ohne Fasern. In gerissenem Zustand weist Stahlfaserbeton ein erhöhtes Arbeitsvermögen und eine verbesserte Zugfestigkeit auf. Stahlfasertübbinge werden vor allem bei Tunnel mit geringer Beanspruchung und großer Dicke eingesetzt.⁷⁶

Im Zuge des Herstellungsprozesses kann es zu geringfügigen Maßabweichungen der Tübbinge gegenüber der planlichen Festlegung kommen. Um dieses unvermeidbare Phänomen dennoch einzuschränken, sind gewisse Konstruktionstoleranzen einzuhalten. Diese Toleranzen sollen so gewählt werden, dass Schäden durch Spannungsspitzen und Undichtigkeiten lediglich mit einer hinnehmbaren Wahrscheinlichkeit auftreten. Aus diesem Grund hängen die einzuhaltenden Toleranzen von mehreren Faktoren ab, etwa der Beanspruchung des planmäßigen Tübbings, dessen Abmessungen und dem Ausnutzungsgrad des Dichtprofils. Generell dürfen Abweichungen des planmäßigen Zustandes nur akzeptiert werden, wenn ein Schadenseintritt durch zusätzlich entstehende Einwirkungen ausgeschlossen ist. Als Ursachen für die strengen Anforderungen an die Herstellung gelten:⁷⁶

- Große Empfindlichkeit einzelner Tübbinge gegen Ungenauigkeiten
- Hohe einwirkende Lasten
- Nicht erkannte Beschädigungen

⁷⁶Vgl. [13] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.

- Kostenintensive und zeitaufwändige Sanierungen

Werden die Tübbinge planmäßig geringen Beanspruchungen ausgesetzt, so können Zusatzbeanspruchungen aufgrund von Maßabweichungen meist aufgenommen werden, wobei selbiges für die Dichtigkeit gilt. Geltende Herstellungstoleranzen der Tübbinge sind in Tab. 2.8 angegeben. Dabei ist die einzuhaltende Toleranz von dem Ringinnendurchmesser abhängig. Dabei wird zwischen Durchmessern kleiner als 8,0 m und größer als 11,0 m unterschieden. Für Durchmesser zwischen diesen Werten können die Toleranzen linear interpoliert und auf 1/10 mm gerundet werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass das planliche Lichtraumprofil jedenfalls freigehalten werden kann. Die Messungen, um festzustellen ob eventuelle Abweichungen innerhalb der Toleranzen liegen, sollten sowohl am einzelnen Tübbingsegment als auch am eingebauten Tübbingring durchgeführt werden. Die dabei zur Anwendung kommenden Messverfahren, deren Häufigkeit und die Messumstände sollten vor Produktionsbeginn im Bauvertrag festgelegt werden. Deren Ergebnisse sind an den Bauherrn zu übergeben. Werden im Zuge der Messung Toleranzen überschritten, sind alle hergestellten Tübbinge seit der letzten erfolgreichen Messung zu überprüfen. Falls im Bauvertrag nicht anders festgelegt, sollte jeder fünfzigste Tübbingring der Schalung nachgemessen werden und daran anschließend jeder hundertste. Tübbinge, die dieser Überprüfung nicht standhalten, können mit dem benachbarten Tübbing diese Toleranzüberschreitung ausgleichen. Dies ist jedoch mit erheblichem logistischem Aufwand verbunden und birgt Einschränkungen für die Kombinierbarkeit verschiedener Tübbingsegmente.⁷⁶

Herstellungstoleranzen	Ringinnendurchmesser	
	≤ 8,0 m	≥ 11,0 m
Längsfugentoleranz		
Längsfugenverschränkung	± 0,3 mm	± 0,5 mm
Winkelabweichung der Längsfuge	± 0,5 mm	± 0,7 mm
Längsfugenverschränkung & Winkelabweichung der Längsfuge	± 0,6 mm	± 0,9 mm
Abweichungen Gesamttübbing		
Tübbingbreite	± 0,5 mm	± 0,7 mm
Tübbingdicke	± 3,0 mm	± 4,0 mm
Tübbingbogenlänge	± 0,6 mm	± 0,7 mm
Tübbinginnenradius	± 1,5 mm	± 2,5 mm
Differenz der Diagonallänge	± 1,0 mm	± 2,0 mm
Vertikaler Versatz der Tübbingecke in Bezug zu den Anderen	± 5,0 mm	± 8,0 mm
Dichtungsnut		
Dichtungsnutbreite	± 0,2 mm	± 0,2 mm
Dichtungsnuttiefe	± 0,2 mm	± 0,2 mm
Lage d. Dichtungsnutachse	± 1,0 mm	± 1,0 mm
Ebenheit der Kontaktzonen		
Längs- und Ringfuge	± 0,3 mm	± 0,5 mm
Toleranz am Gesamttübbingring		
Außendurchmesser	± 10,0 mm	± 15,0 mm
Innendurchmesser	± 10,0 mm	± 15,0 mm
Außenumfang (an drei Punkten gemessen)	± 30,0 mm	± 45,0 mm
Lage der Einbauteile		
Erektorkonen	± 2,0 mm	± 2,0 mm
Schraubentaschen und Schraubendurchführungen	± 1,0 mm	± 1,0 mm

Tab. 2.8: Herstellungstoleranzen von Tübbing (Quelle: modifiziert nach [13] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kapitel 3

Anfahr- und Ausfahrvorgänge von Schildmaschinen

Dieses Kapitel widmet sich den verschiedenen Möglichkeiten der Anfahr- und Ausfahrvorgänge von SM. Das Anfahren eines Tunnels erfolgt in der Regel von einem Tunnelportal oder einem Startschacht aus. Je nach Maschinenvariante sind Konstruktionen erforderlich, um die erforderlichen Vorschubkräfte ableiten zu können.⁷⁷ Diese werden im gegenständlichen Kapitel näher beleuchtet.

Der einfachste Anfahrvorgang wird mit einer TBM-O realisiert. Diese wird nach dem Antransport vor dem Tunnelportal oder in einem Startschacht zusammengefügt. Der erste Tunnelabschnitt, man spricht von einem Anfahr- bzw. Starttunnel, wird größtenteils in konventioneller Bauweise aufgefahren. Aufgrund beengter Platzverhältnisse kann die Montage der TBM auch im Starttunnel erfolgen. Dieser ist dabei entsprechend aufzuweiten. Der konventionelle Vortrieb der Startstrecke ist meist aufgrund eines nicht tragfähigen Lockergesteinabschnittes an diesen Stellen erforderlich. Dieser Vortriebsabschnitt erfolgt, bis der tragfähige Fels angetroffen wird. Von dort ist ein regulärer Vortrieb möglich.⁷⁷

Ein solcher Anfahrprozess kann als Optimum angesehen werden. Liegen andere Projektrandbedingungen vor, sollte durch geeignete Verfahren eine Ausgangslage erzeugt werden, die der zuvor beschriebenen ähnelt. Wird der Tunnelvortrieb einer geschichteten TVM aus einem konventionell aufgefahrenen und mit Spritzbeton ausgekleideten Anfahrstunnel gestartet, so ist dafür Sorge zu tragen, dass die benötigten Vorschubkräfte in das Gebirge abgeleitet werden können. Im Verlauf des Tunnelvortriebs erfolgt dies über das Tübbingssystem, welches kontinuierlich errichtet wird. Beim Anfahrvorgang ist dies jedoch nicht möglich, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Tübbingringe zum Abstützen errichtet sind. Im Folgenden werden Verfahren aufgezeigt, welche einen Anfahrvorgang unter den beschriebenen Randbedingungen dennoch ermöglichen.

Zunächst sollen gängige Anfahrvorgänge aufgezeigt werden. Dabei wird zwischen Anfahrvorgängen im und außerhalb von drückendem Grundwasser unterschieden. Im Anschluss sind die zugehörigen Ausfahrvorgänge aufgezeigt und die Besonderheiten zu den Anfahrvorgängen dargelegt. Abschließend findet sich eine zusammenfassende Charakterisierung, der in diesem Kapitel dargestellten Verfahren und deren Eignung.

3.1 Anfahrvorgänge bei nicht drückendem GW

In diesem Unterkapitel sollen die wesentlichsten Verfahrensmöglichkeiten des Anfahrvorganges bei nicht drückendem GW erarbeitet werden. Das in *3.1.1 – Anfahrvorgang mittels verankertem Tübbingring* näher beschriebene Verfahren eignet sich lediglich für die Anwendung außerhalb drückender Grundwässer. Jene Methodik aus *3.1.2 – Anfahrvorgang mittels Rücksteifkonstruktion und Blindringen* kann sowohl außerhalb des Grundwassers, als auch, durch die zusätzliche

⁷⁷Vgl. [29] Girmscheid, S. 556 f.

Verwendung einer Startbrille und eines eventuell vorgelagerten Dichtblocks, bei drückenden GW-Verhältnissen eingesetzt werden.

3.1.1 Anfahrvorgang mittels verankertem Tübbingring

Ein einzelner Tübbingring kann die benötigten Vorschubkräfte nicht in das Gebirge leiten. Aufgrund bauverfahrenstechnischer Einschränkungen ist eine Errichtung von mehreren Tübbingringen im Starttunnel hintereinander, bis diese die benötigten Vorschubkräfte in das Gebirge ableiten könnten, nicht möglich. Um die Vorschubkräfte in lediglich einen Tübbingring einleiten zu können, ist dieser mit einer Abstützkonstruktion vor Verschiebung zu sichern. Während der Tübbingring errichtet wird, muss sich die TVM bereits im Tunnel befinden, da der Schildschwanz einen größeren Durchmesser aufweist als die Tübbingringaußenseite. Im Folgenden wird eine praxisbewährte Ausführungsvariante mittels Konsole näher beschrieben.⁷⁸

Eine Ausbildungsmöglichkeit einer solchen Konsole stellt eine stählerne Konstruktion analog Abb. 3.1 dar. Diese ist entsprechend einer statischen Berechnung zu dimensionieren. Die Montage der Konstruktion mit dem umgebenden Gebirge erfolgt mittels vier eingemörtelter Gewindebolzen, je Konsole. Diese weisen eine Länge von 30 cm auf und sind orthogonal zur Konsole orientiert. Die Vorschubkräfte werden allerdings durch einen eingebauten SN-Anker ins Gebirge eingeleitet, welcher auf seiner vollen Länge von 3 m mit Mörtel verpresst ist. Solch ein Anker ist an jeder Konsole in einem 45° Winkel zur Tunnelachse angebracht und übernimmt die maßgebende Befestigung des Systems.⁷⁸

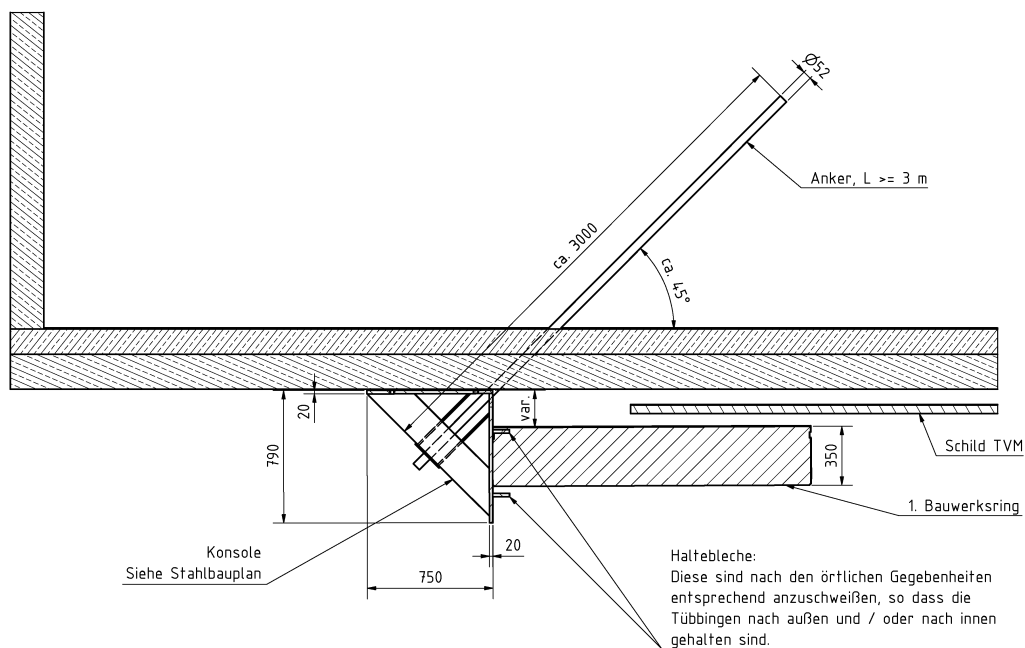


Abb. 3.1: Ausbildungsmöglichkeit eines verankerten Tübbingrings (Quelle: modifiziert nach [70] Strabag AG)

Um die Gebirgsverformungen gering zu halten, wird der Anker mit 50% der zu erwartenden Ankerkraft vorgespannt. Diese Vorspannkraft wird als Querkraft über eingemörtelte Bolzen, welche sich orthogonal zur Tunnelachse befinden, ins Gebirge geleitet. Die Tragfähigkeit der

⁷⁸Vgl. [70] Strabag AG

Bolzen ist entscheidend von der Spritzbetonfestigkeit abhängig. Sollte der Spritzbeton eine geringe Festigkeit aufweisen, kann dies zu einem Versagen der Bolzen führen. In solchen Fällen müssten die gesamten Vorschubkräfte von den Ankern ins Gebirge abgeleitet werden. Diese sind auf eine entsprechende Belastungen dimensioniert, was ein Versagen der gesamten Konstruktion verhindert. Im Falle hoher Spritzbetonfestigkeiten werden die Vorschubkräfte sowohl mittels Bolzen, als auch Ankern ins Gebirge geleitet, ohne große Verformungen zu ermöglichen. Nach Errichtung des ersten Tübbingringes ist der Ringspalt unlaufend zu verfüllen. Ab jenem Zeitpunkt, ab welchem die Vorschubkräfte durch die Reibung des Tübbingsystems mit dem Gebirge aufgenommen werden können, ist die Entfernung der Konsolen möglich. Bei der Berechnung, ab dem wievielten Tübbingring dies umsetzbar ist, sollte berücksichtigt werden, dass der Ringspaltmörtel zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig ausgehärtet ist. Dieser kann in der statischen Berechnung mit der Hälfte der Endfestigkeit angesetzt werden. Als grober Richtwert sei dabei der neunte Tübbingring genannt, wobei dies projektspezifisch zu ermitteln ist. Im Folgenden wird der Bauablauf eines solchen Anfahrvorganges beschrieben:⁷⁸

- Einbau 1. Tübbingring:
 - Einbau des Blindsohltübbings durch einen Kran
 - Versetzen des Sohltübbings mittels des Erektors
 - * Plangemäßer Einbau der Konsolen durch Stahlbauer
 - * Fixierung des Tübbings mittels Vortriebspresen der TVM
 - * Vermörteln durch rückseitiges Einspritzen
 - * Schutz der Schildschwanzdichtung vor Beschädigung
 - Abwechselnder links- und rechtsseitiger Tübbingeinbau, zuletzt den Schlussstein
 - * Plangemäßer Einbau der Konsolen durch Stahlbauer
 - * Fixierung des Tübbings mittels Vortriebspresen der TVM
 - * Vermörteln durch rückseitiges Einspritzen in zwei Phasen, nach Errichtung des halben Tübbingrings und nach Fertigstellung
 - * Schutz der Schildschwanzdichtung vor Beschädigung
 - Verschrauben der Tübbinge untereinander in den Längsfugen direkt nach dem Versetzen.
 - Tübbinge können als kompletter Ring vermörtelt werden, wobei eine ausreichende Fixierung erforderlich ist.
 - Bohrvorgang der TVM durch Ausfahren der Vortriebspresen, bis der nächste Tübbingring gerade noch eingebaut werden kann.
 - Füllen des Ringspalts mit Ringspaltmörtel oder Perlkies.
- Einbau 2. bis 8. Tübbingring:
 - Bauablauf wie beim 1. Tübbingring, wobei auf die Konsolen verzichtet wird.
 - Maximal aufbringbare Vortriebspresenkräfte können je Tübbingring zunehmen:
 - * Ring 2 bis 4: 100 kN
 - * Ring 5: 120 kN
 - * Ring 6: 140 kN
 - * Ring 7: 180 kN

* Ring 8: 220 kN

- Der 9. Tübbingring ermöglicht einen normalen Tunnelvortrieb. Die angebrachten Konsolen können bei Ringspaltmörtelfestigkeiten von 50% der Endfestigkeit entfernt werden.

Dieses Verfahren ermöglicht die Anfahrt bei nicht drückendem GW. Daher eignet es sich besonders für den Einsatz einer TBM-S oder TBM-DS. Es bedarf verhältnismäßig wenig zusätzlicher Konstruktionen, was sich günstig auf die Bauzeit und Baukosten auswirkt. Es ist jedoch, selbst mit zusätzlichen Konstruktionen, nicht möglich dieses Verfahren bei vorherrschendem drückendem GW einzusetzen.

3.1.2 Anfahrvorgang mittels Rücksteifkonstruktion und Blindringen

Ist ein Anfahrvorgang ohne Herstellung eines konventionell aufgefahrenen Starttunnels geplant, so kann eine Rücksteifkonstruktion zur Ableitung der Vorschubkräfte vorgesehen werden. Dieses System kann sowohl für die Tunnelanfahrt im Portalbereich, als auch für die Anfahrt in einem Schacht verwendet werden. Das Funktionsprinzip unterscheidet sich dabei nicht voneinander.⁷⁹ In beiden Fällen befindet sich die geschildete TBM außerhalb der Tunnelröhre auf einer Schildwiege. Diese dient der Ablage einer TVM auf ebenem Untergrund. Abb. 3.2 zeigt eine solche stählerne Schildwiege, an der letzte Arbeiten im Schacht vorgenommen werden. Alternativ kann sie aus Beton hergestellt werden.



Abb. 3.2: Schildwiege (Quelle: [43] Hoffmann et al.)

Da sich die Maschine beim Anfahrvorgang nicht in der Tunnelröhre befindet, kann die Ausbruchsleibung nicht zur Kraftableitung herangezogen werden. Aus diesem Grund wird ein Widerlager

⁷⁹Vgl. [29] Girmscheid, S. 557

benötigt. Der Kraftschluss zwischen den Vortriebspresen und der Widerlagerkonstruktion, auch A-Bock genannt, wird durch einen stählernen Druckring hergestellt, welcher an der Rücksteifkonstruktion befestigt ist. Im Zuge des Vortriebs werden Blindtübblingringe errichtet, welche den im Zuge des Vortriebs entstehenden Spalt zwischen der Vortriebspresen und dem Druckring überbrücken. Diese Blindringe müssen an zusätzlichen Stützpunkten gesichert werden, um etwaige Verformungen zu verhindern. Da die Startbaugrube jedoch nicht von Gebirge umschlossen ist, stellt dies bei der Anfahrt außerhalb des Tunnels keine Option dar. Aus diesem Grund ist eine zusätzliche Konstruktion erforderlich. Diese wird meist als Stahlbaukonstruktion analog Abb. 3.3 ausgeführt. Neben der Begrenzung der Verformungen ermöglicht sie die Errichtung der Blindringe.⁸⁰



Abb. 3.3: Stahlkonstruktion zur Begrenzung der horizontalen Verformung der Blindringe (Quelle: [46] KREBS+KIEFER Service GmbH)

Die Blindringe und deren Stützkonstruktion engen die Baugrube maßgeblich ein, was den Bauablauf stören kann.⁸¹ In Startschächten ist, aufgrund der beengten Platzverhältnisse, ein besonderes Augenmerk auf die Arbeitssicherheit bei der Errichtung der Stützkonstruktion und der Blindringe zu legen. Dies gilt ebenfalls beim Rückbau dieser Konstruktion.⁸⁰ Abb. 3.4 zeigt schematisch den Anfahrvorgang mittels Rücksteifkonstruktion, welche samt Druckring in blau

⁸⁰Vgl. [45] Kirsten et al., S. 98 f.

⁸¹Vgl. [3] Assenmacher, S. 34 ff.

dargestellt ist. Im Zuge des Vortriebs, der in orange skizzierten TVM, werden Blindtübbringringe errichtet, welche in grün abgebildet sind.

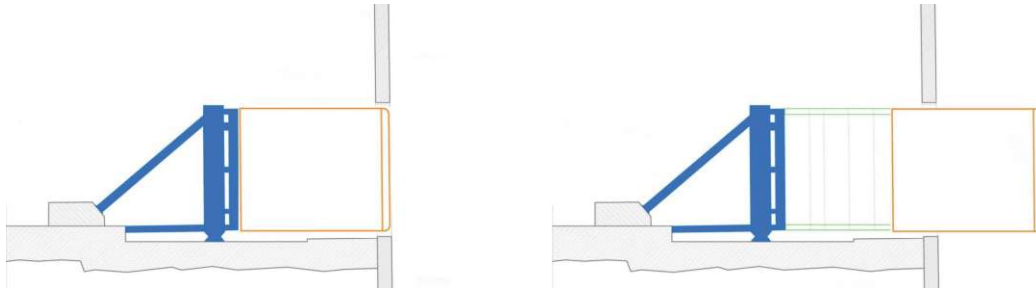


Abb. 3.4: Ablaufschema des Anfahrvorganges mittels Rücksteifkonstruktion (Quelle: modifiziert nach [22] Erritt)

Die Vorschubkräfte gelangen von den Vortriebspresen in die Blindringe, von wo aus die Kräfte über den Druckring in das Widerlager geleitet werden. Die Kraftableitung der Rücksteifkonstruktion kann durch eine Ableitung in den Boden erfolgen. Dabei erzeugen die Vortriebspresen ein Moment am oberen Ende der Konstruktion. Dieses Biegemoment erzeugt eine Zugkraft, welche über die vertikalen Träger des Rahmens in die Baugrubensohle einzuleiten ist. Die Kraftübertragung mit dem Baugrund erfolgt mittels Verpressanker. Die durch das Moment entstehende Druckkraftkomponente wird über schräg ausgebildete Streben abgeleitet und gelangt von dort in den Untergrund. Dieser Kraftverlauf kann in Abb. 3.5 nachvollzogen werden. Alternativ zur Ausbildung eines A-Bocks können die Kräfte durch Baugrubenaussteifungen in die Schachtwände geleitet werden. Bei beengten Baugruben kann eine Verlängerung der Blindringe bis zur rückwärtigen Schachtwand erfolgen, um die Vortriebskräfte ohne Stahlbauwiderlager abzuleiten.⁸⁰

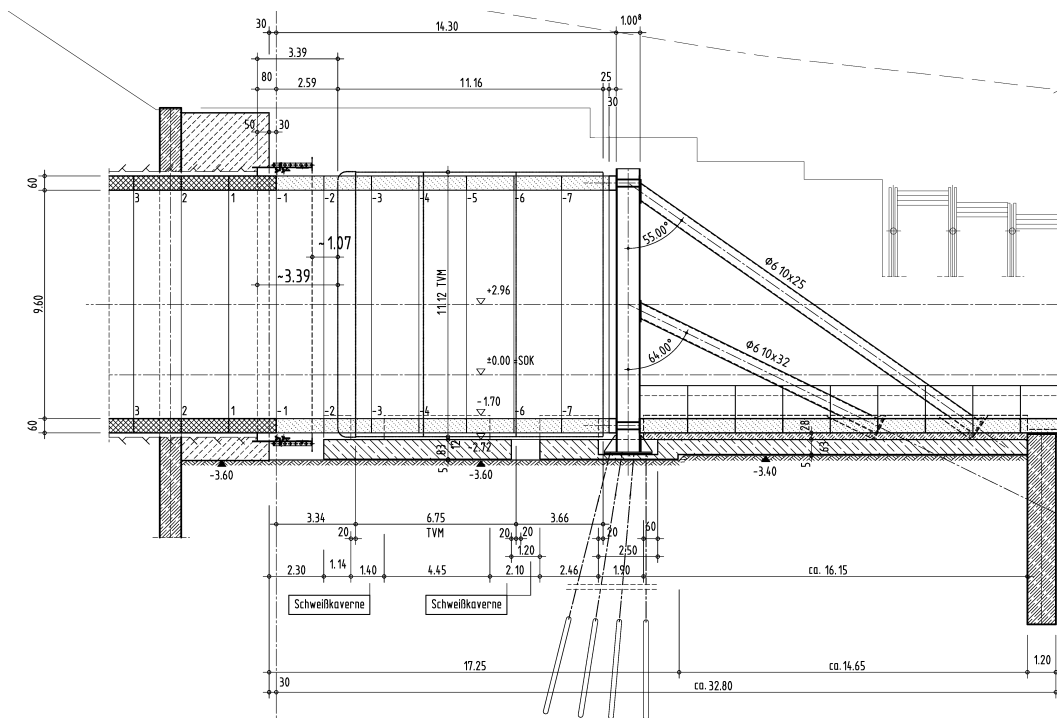


Abb. 3.5: Längsschnitt eines Anfahrvorganges mittels A-Bock (Quelle: modifiziert nach [70] Strabag AG)

Die wesentlichen Systemkomponenten sind die Widerlagerkonstruktion, der Druckring, die Blindringe samt Stützkonstruktion und eine Schildwiege. Diese Konstruktionen können nach abgeschlossenem Anfahrvorgang wieder rückgebaut werden.⁸¹ In Abb. 3.6 ist die Anfahrssituation eines Anfahrvorganges mittels Rücksteifkonstruktion dargestellt. Die TVM befindet sich dabei in einem mehrfach ausgesteiften Startschacht und liegt auf einer Schildwiege aus Stahlbeton auf. Um die benötigten Vorschubkräfte aufnehmen zu können, ist die Rücksteifkonstruktion aus zwei Rahmen ausgebildet, welche mit Querstreben miteinander verbunden sind. Außerdem wurden je Seite drei schräge Streben angeordnet.



Abb. 3.6: Anfahrvorgang mittels Rücksteifkonstruktion (Quelle: [76] TunnelPro S.r.l.)

Erfolgt die Anfahrt aus einem Schacht, so ist dies bei der Planung der Schachtwand, welche durchörtert wird, zu berücksichtigen. Diese Schachtwand kann als Spundwand, überschnittene Bohrpfehlwand oder Schlitzwand hergestellt werden. Kommt eine Spundwand zum Einsatz, so ist diese mittels eines Schneidbrenners im Bereich des Schneidrades zu öffnen. Bei Bohrpfehl- oder Schlitzwänden kann ein glasfaserbewehrter Beton angewandt werden, wodurch ein Durchörteren mittels TVM ermöglicht wird. Dafür sind Disken am Schneidrad vorzusehen. Bei der Verwendung von Stahlbeton sollte dieser vorab im Bereich der Anfahröffnung entfernt werden, um die Abbauwerkzeuge zu schonen. Die nötigen Vorkehrungen wenn mit drückendem GW zu rechnen ist, werden zu einem späteren Zeitpunkt erläutert.⁷⁹

3.2 Anfahrvorgänge bei drückendem GW

Der Tunnelvortrieb in drückendem GW stellt eine herausfordernde bautechnische Aufgabe dar. Da zahlreiche Tunnel jedoch unterhalb des Grundwasserspiegels vorgetrieben werden, wird man mit dieser Aufgabenstellung sehr häufig konfrontiert. Es ist der gesamte Tunnel vor GW-

Einbruch zu schützen, dazu zählen insbesondere das Start- und Zielbauwerk, sowie sämtliche Systemschnittstellen. Diese stellen eine besondere Herausforderung dar, da die Bauteile meist ein unterschiedliches Verformungsverhalten aufweisen und dauerhaft miteinander zu verbinden sind.⁸²

Beim Anfahrvorgang ist besonders auf die Dichtheit zwischen dem Schild der Maschine und der Ausbruchslaibung zu achten. Dieser Spalt wird in der Anfahrssituation meist von einer Startbrille abgedichtet. Diese wird mittels Kopfbolzendübeln in der Schachtwand angebracht und nach innerer Aussteifung außen mit Beton vergossen, wodurch die so genannte Brillenwand entsteht.⁸³ Als zusätzliche Sicherheit kommt gewöhnlich ein Dichtblock zum Einsatz, welcher sich typischerweise gebirgseitig hinter der Schachtwand befindet. Dieser übernimmt meist eine Doppelfunktion. Neben der Wirkung als zusätzliche Dichtebene wird durch die verbesserte Standfestigkeit das Risiko eines Grundbruchs reduziert und etwaige Setzungen klein gehalten. Ein solcher Dichtblock kann beispielsweise durch das Düsenstrahlverfahren (DSV) hergestellt werden. Alternativ kann ein Lamellenverfahren zur Anwendung kommen, wobei der Dichtblock aus sich überschneidenden Schlitzwandsegmenten oder Bohrpfählen besteht. Eine sehr teure und zeitaufwändige, allerdings manchmal die wirtschaftlichste, Maßnahme stellt eine Vereisung des anstehenden Erdreichs dar.⁸³ Startbrille und Dichtblock können bei einem Anfahrvorgang mittels Rücksteifkonstruktion ergänzt werden, wodurch dieses Verfahren bei drückenden GW-Verhältnissen eingesetzt werden kann.

In diesem Kapitel werden zunächst in 3.2.1 – *Brillendichtungssysteme der Startbrille* verschiedene Dichtungssysteme näher erläutert, welche in der Startbrille angebracht werden. Im Anschluss wird in 3.2.2 – *Dichtblock* die Herstellung und Wirkungsweise eines Dichtblockes aufgezeigt. Die folgenden Abschnitte 3.2.3 – *Fliegende Schildanfahrt*, 3.2.4 – *Anfahrt mit vorgelagertem Betontopf* und 3.2.5 – *Schild Transfer System* beinhalten Verfahren, welche als Sonderlösungen konzipiert wurden und mittlerweile etabliert sind.

3.2.1 Brillendichtungssysteme der Startbrille

Die Weiterentwicklung des Dichtungssystems der Dichtbrille ist, aufgrund seiner vermeintlich geringen wirtschaftlichen Bedeutung, ins Stocken geraten. Die Denkweise, welche dem Brillendichtungssystem eine geringere Bedeutung zuweist wirkt schlüssig, jedoch stellt sie den tatsächlichen Sachverhalt nicht korrekt dar. Als Anschauungsbeispiel kann ein 1.000 m langer Tunnel mit einem Durchmesser von 10 m dienen. Dieser weist etwa 60 m an Brillendichtung auf, jedoch knapp 60.000 m der Tübbingdichtung. Unter Berücksichtigung der Risiken, welche mit den Start- und Zielvorgängen einhergehen, ergibt sich jedoch ein anderes Bild. Betriebsunfälle im Zuge des Start- oder Zielvorgangs gehören zu den häufigsten Unfallursachen im maschinellen Tunnelbau. Daher ist es ein elementares Ziel, ein zuverlässiges und redundantes Dichtungssystem in die Start- und Zielbrille einzubauen.⁸⁴ Die Dichtfunktion kann aufgrund folgender Punkte nicht alleine von der Brillendichtung übernommen werden, weshalb ein zusätzlicher Dichtblock anzuordnen ist.⁸⁵

- Es gibt kein geprüftes Brillendichtungssystem.
- Es gibt keine Prüfkriterien, die man als „Stand der Technik“ bezeichnen kann.
- Es gibt keine anerkannten Versuche für die Prüfung.
- Es gibt keine zugelassenen Systeme.

⁸²Vgl. [67] Schwarz et al.

⁸³Vgl. [29] Girmscheid, S. 557

⁸⁴Vgl. [67] Schwarz et al.

⁸⁵Aus [67] Schwarz et al.

Die Komplexität des Start- und Zielvorganges wird zusätzlich durch den Umstand verstärkt, dass Kontaktflächen zwischen statischer und sich bewegendem Bauteilen abzudichten sind. Die Abdichtung dient primär der Überbrückung des Spaltes zwischen dem Bauwerk und der TVM gegen den vorherrschenden Wasserdruck. Nebst dieser, vergleichsweise leicht zu erfüllenden, Aufgabe muss das Dichtungssystem in der Lage sein, variierende Spaltweiten zu überbrücken. Diese können sowohl abrupt, wie beispielsweise aufgrund der Schildkonizität oder Fertigungstoleranzen, als auch allmählich, etwa infolge eines Lageversatzes der TVM zur Startbrille, auftreten. Dies erzeugt hohe Anforderungen an die Planung, das Material und das ausführende Personal. Die geforderte Dichtigkeit des Abdichtungssystems ist im Vorhinein zu definieren. Dabei ist die Gesamtsituation aller Dichtungsebenen zu berücksichtigen. Die Empfindlichkeit der Dichtung kann ebenfalls beurteilt werden, beispielsweise ob eine kleine Undichtigkeit zum Versagen der Gesamtabdichtung führt, oder ob in diesen Fällen eine Selbstverdichtung erwartet werden kann. Überdies ist die Forderung nach einer Kontrollierbarkeit der Dichtwirkung im Betriebszustand möglich. Nach der Wahl des Abdichtungssystems folgt die Herstellung sämtlicher benötigter Konstruktionen, beispielsweise der Schildwiege, der Nachläufereinrichtung, etwaige Silos, der Widerlagerkonstruktion oder der Anfahrbrille.⁸⁴

Ist ein Abbruch der Schachtwand im Vorfeld notwendig, um sie nicht mit der TVM durchfahren zu müssen, so ist der Dichtblock, für die Zeitspanne nach dem Abbruch der Schachtwand bis zur Montage der Startbrille und dem Einschleiben der Vortriebsmaschine in diese, die einzige Dichtungsebene. Kann die zu durchörternde Wand mittels der TVM durchfahren werden, wird zu jedem Zeitpunkt ein redundantes Dichtungssystem, bestehend aus dem Dichtblock und der Brillendichtung, sichergestellt. Das Brillendichtungssystem besteht aus zwei Abdichtungsebenen. Zum einen sind Lippendichtungen angeordnet, welche den Spalt zwischen der Dichtbrille und dem Schildschwanz abdichten. Darüber hinaus ist meist eine Schlauchdichtung, bestehend aus einem mit Mörtel verfülltem Textilschlauch aus hochfestem Gewebe angeordnet. Das patentierte BULLFLEX^{®86} Abdichtungssystem beruht auf diesem Funktionsprinzip. Es dichtet den Spalt zwischen der Startbrille und der Tübbingaußenschale ab. Die Durchfahrsequenz einer TVM durch eine Startbrille kann in zwei Phasen unterteilt werden. Eine solche Durchfahrsequenz ist in Abb. 3.7 ersichtlich. Im Zuge der ersten Phase sind die Tübbingringe im Bereich der Brillendichtung noch durch den Schildschwanz verdeckt. Dabei ist die Schlauchdichtung zusammengefaltet und zu diesem Zeitpunkt noch nicht mit Mörtel verpresst an der Startbrille angebracht. Die Lippendichtungen dichten den Ringspalt zum Schildschwanz ab.⁸⁴ Die zweite Phase beginnt, wenn der Vortrieb weit genug fortgeschritten ist und sich der Abschluss des Schildschwanzes zwischen beiden Dichtungsebenen der Brillendichtung befindet. Daraufhin wird die Schlauchdichtung mit Mörtel verpresst und übernimmt dadurch die ihr zugeteilte Dichtfunktion. Um Redundanz in dieser Zeitspanne zu gewährleisten, müssen der Dichtblock und die Brillendichtung lange genug sein, um vor dem Ausfahren aus dem Dichtblock die Schlauchdichtung aktivieren zu können. In der Phase vor ihrer Aktivierung dient sie als zusätzliche Notdichtung und kann bei Bedarf zum Einsatz kommen. Durch Einbau der im Tunnel verbleibenden Tübbingringe und der einhergehenden Verpressung des Ringspaltes entsteht ein weiteres Dichtungssystem. Ist der Ringspaltmörtel ausgehärtet, kann die Startbrille rückgebaut werden. Eine Redundanz ist zu diesem Zeitpunkt nicht mehr gegeben, jedoch erfolgt die Dichtung durch ein geprüftes System.⁸⁴

⁸⁶[5] BuM Beton- und Monierbau GmbH

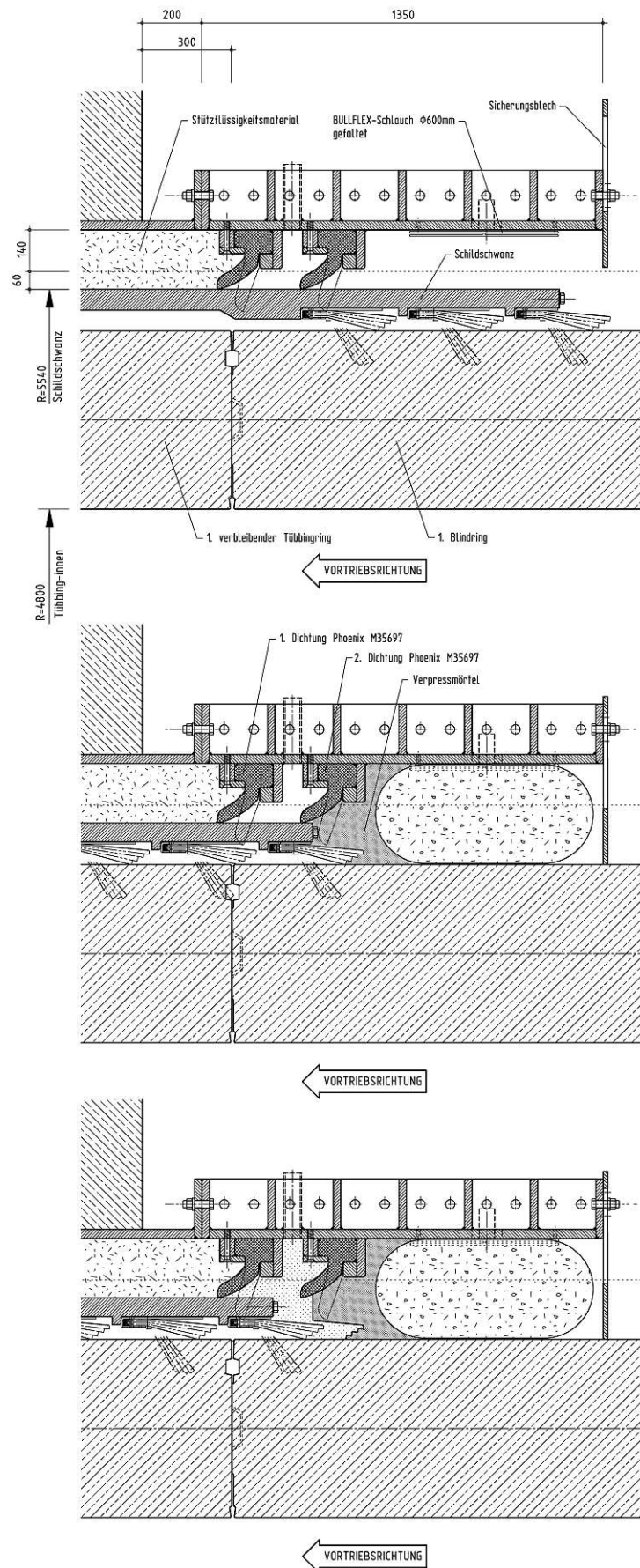


Abb. 3.7: Durchfahrsequenz durch eine Startbrille (Quelle: modifiziert nach [70] Strabag AG)

Die Dichtwirkung von Lippendichtungen beruht darauf, dass sie durch die Eigenspannungen gegen den Schildmantel gepresst werden. Durch die Bauform und den Wasserdruck wird der Anpressdruck der Dichtung gegen das Schild verstärkt. Die Toleranzen des Arbeitsbereiches von Lippendichtungen liegen gemäß Herstellerangaben meist zwischen ± 25 mm und ± 45 mm. Jedoch gilt es zu beachten, dass davon rund 20 mm auf die Schildkonizität und Fertigungstoleranzen des Herstellers entfallen. Demnach bleibt lediglich ein sehr geringer Spielraum für Abweichungen im Zuge des Startvorganges. Beispielsweise ist bei einem 9 m langen Schild lediglich eine Winkelabweichung von $4,5^\circ$ zulässig, bei einem Maschinendurchmesser, welcher etwa der Schildlänge entspricht. Gemäß Herstellerangaben können Wasserdrücke von 4,0 bar bei geringen Spaltenweiten bewältigt werden, wobei diese Angaben reine Erfahrungswerte aus früheren Projekten sind und keinen versuchstechnischen Hintergrund haben. Zwar gibt es statische FEM-Berechnungen, diese wurden jedoch am ebenen System durchgeführt. Demnach finden sich keine Berechnungen, welche die Empfindlichkeit der Dichtlippen berücksichtigen, beispielsweise die Überschreitung der Toleranzen. Folglich gibt es keine Lippendichtungssysteme für den Anfahrvorgang im Tunnelbau, welche als geprüft betrachtet werden können. Die Dimensionierung erfolgt letztlich auf Grundlage von Erfahrungswerten.⁸⁴

Es kann zwischen Einfachlippendichtungen und Doppellippendichtungen unterschieden werden. Letztere bieten eine erhöhte Sicherheit, ermöglichen jedoch meist einen geringeren Arbeitsbereich. In Abb. 3.8 sind Doppellippendichtungen der Firma Theodor Cordes GmbH & Co. KG abgebildet. Der Vortrieb erfolgt dabei von rechts nach links. Der Wasserdruck wirkt dem entgegen. Diese Dichtungsprofile sind für Drücke von bis zu 4,0 bar ausgelegt, was mittels einer FEM-Berechnung bestimmt wurde. Der Arbeitsbereich des linken Profils aus Abb. 3.8 beträgt 30 ± 15 mm und jener des rechten Profils 40 ± 25 mm. Diese Werte sind als Angaben vom untersten Punkt der Profile zu interpretieren und definieren den Bereich, in dem sich der Schild befinden muss, um in dem maximal definierten Wasserdruck eingesetzt zu werden. Die Linie in Mitten des in grau markierten Arbeitsbereiches stellt die planmäßige Position des Durchmessers der TVM dar.⁸⁷

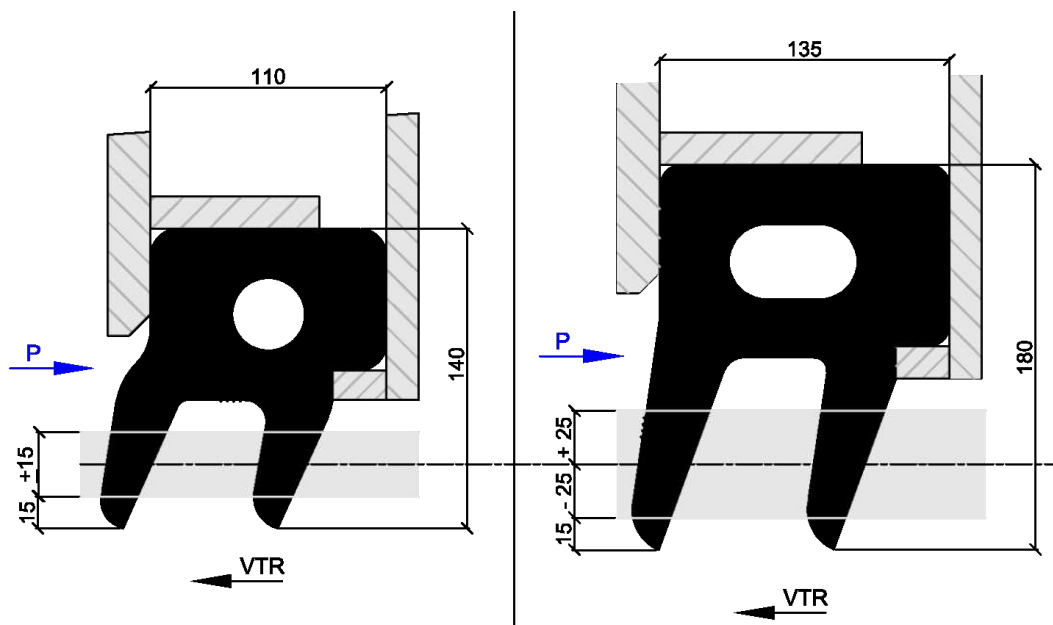


Abb. 3.8: Doppellippendichtungen (Quelle: [74] Theodor Cordes GmbH & Co. KG)

⁸⁷Vgl. [74] Theodor Cordes GmbH & Co. KG

Abb. 3.9 zeigt Einfachlippendichtungen der Firma Theodor Cordes GmbH & Co. KG. Diese weisen einen größeren Arbeitsbereich als jene Doppellippendichtungen der Abb. 3.8 auf. Während der linke Dichtungstyp der Abb. 3.9 für Drücke von bis zu 4,0 bar ausgelegt wurde, liegt der Druckbereich der rechten Lippendichtung zwischen 2,5 und 4,0 bar, in Abhängigkeit des Arbeitsbereiches. Dabei wirken sich bereits geringe Abweichungen des Arbeitsbereiches gravierend auf den bewältigbaren Wasserdruck aus. So können bei einem Arbeitsbereich von 95 ± 40 mm noch Drücke von 4,0 bar bewältigt werden. Wird der Arbeitsbereich auf eine Bandbreite von $92,5 \pm 42,5$ mm geändert, sind lediglich Wasserdrücke von 3,0 bar bewältigbar. Bei einer weiteren Verschiebung des Arbeitsbereiches um 2,5 mm auf 90 ± 45 mm sind lediglich Wasserdrücke von 2,5 bar auffahrbar. Demnach variiert der bewältigbare Wasserdruck bereits um 1,5 bar, wenn der Arbeitsbereich um 5 mm verschoben wird. Dies ist bei gängigen Vortriebsmaschinen mit Durchmessern im Bereich von 8 – 12 m äußerst schwer einzuhalten. Die Vortriebsrichtung ist bei Einfachlippendichtungen entgegen dem Wasserdruck gerichtet.⁸⁷

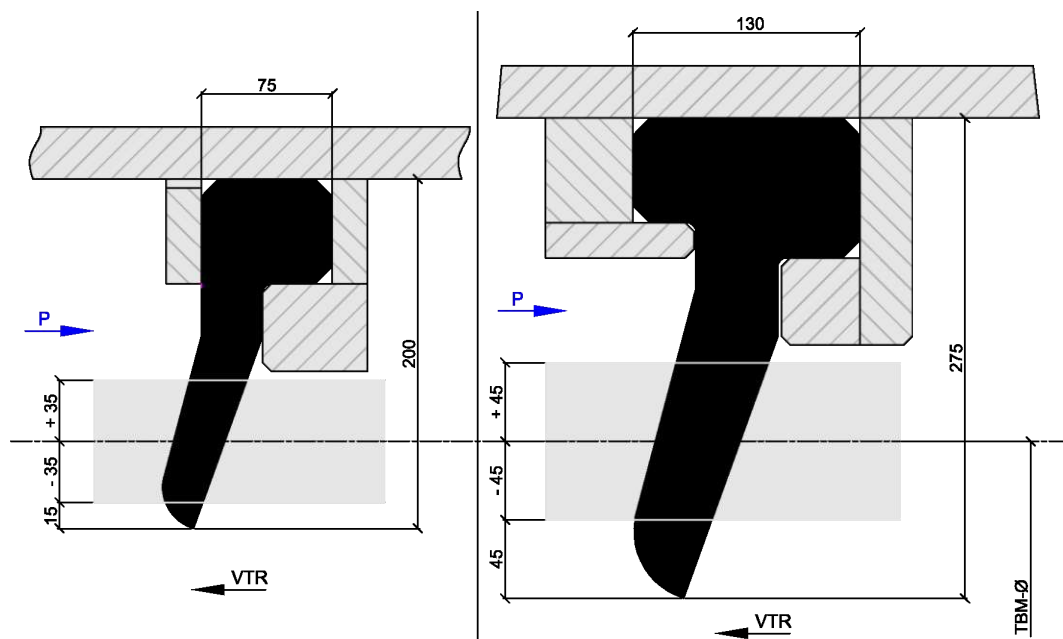


Abb. 3.9: Einfachlippendichtungen (Quelle: [74] Theodor Cordes GmbH & Co. KG)

Ursprünglich waren Schlauchdichtungen nur als statisch wirkende Dichtungsebene oder als Notdichtung konzipiert. Durch die Verwendung einer Schaumstoffauflage kann dieses Dichtungssystem jedoch auch als bewegliche Dichtung zum Einsatz kommen. Überdies können zwei Schlauchdichtungen in Kombination miteinander eingesetzt werden. Dabei wird ein Schlauch mit Mörtel gefüllt und der andere mit einer Bentonitsuspension. Der Stützdruck des Bentonits kann nach Bedarf nachgestellt werden. Durch das hohe Maß an Flexibilität der Schlauchdichtungen kann die Dichtigkeit selbst bei unterschiedlichen Spaltweiten im Umfang garantiert werden. Regelgrößen des Schlauchdurchmessers liegen zwischen 230 – 800 mm. Andere Anforderungen sind prinzipiell möglich, bedürfen allerdings Rücksprache mit dem Produzenten. Der benötigte Schlauchdurchmesser wird in Absprache mit dem Hersteller festgelegt. Dabei wird der Schlauchdurchmesser umso größer je höher der Wasserdruck oder größer die Spaltweiten sind. Die maximale Druckbeständigkeit in Abhängigkeit der Spaltweite und des Schlauchdurchmessers ist in Abb. 3.10 dargestellt. Einen Nachteil in der Verwendung von Schlauchdichtungen stellt die verzögerte Funktionalität gegenüber herkömmlichen elastomeren Systemen dar. Sie erhalten ihre Dichtwirkung erst nach der Schildeinfahrt und der anschließenden Verpressung des Schlauches,

wodurch die Nachprüfbarkeit erschwert wird. Vorteilhaft zu erwähnen ist jedoch das hohe Maß an Flexibilität beim Einsatz dieses Dichtungssystems. Ein einheitliches Prüfverfahren existiert jedoch bei diesem Dichtungssystem ebenfalls nicht.⁸⁴ Zu den bedeutendsten Vorteilen einer Schlauchdichtung zählen die folgenden Punkte:⁸⁸

- Schnelle und unkomplizierte Installation
- Kompensation der Unebenheiten
- Druckbeaufschlagung von bis zu 4 bar
- Einbau in beengten Platzverhältnissen
- Hoher Reißwiderstand
- Für verschiedene Füllmaterialien geeignet
- Schrumpffrei
- Beschleunigte Mörtelaushärtung durch Ausfiltern überschüssigen Wassers

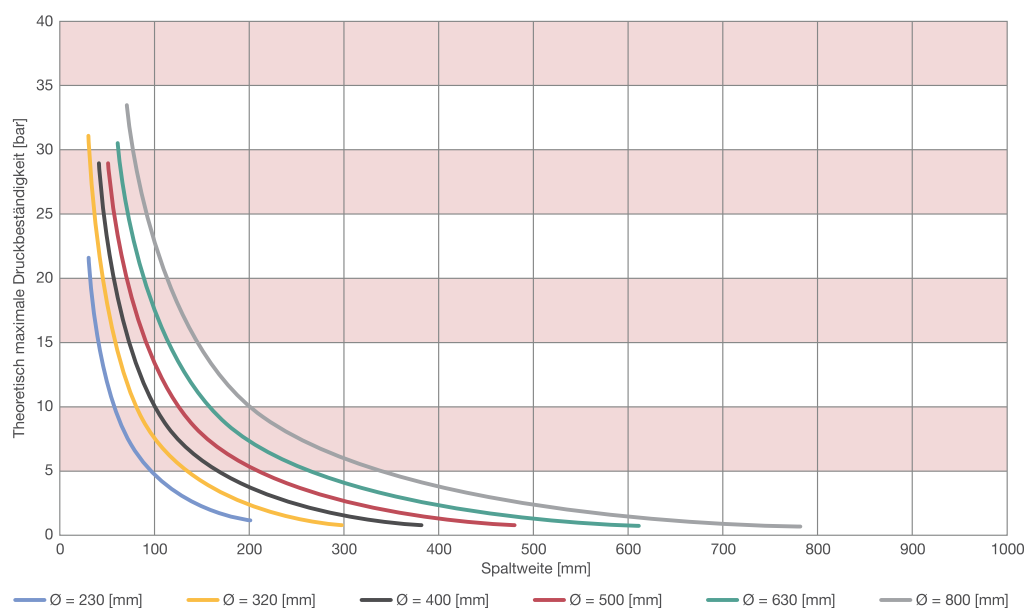


Abb. 3.10: Maximale Druckbeständigkeit in Abhängigkeit der Spaltweite und des Durchmessers (Quelle: [17] DSI Underground GmbH)

Der Einbau der Schlauchdichtung erfolgt zunächst durch die Markierung der Schweißpunkte zur späteren Befestigung. Im Anschluss werden die Füllrohre befestigt, wobei diese zu markieren sind, um die korrekte spätere Mörtelabfolge sicherzustellen. Darauf folgend werden Schrauben mit den Dichtungshaltern verschweißt. Der Schlauch ist im Zuge des Schweißvorganges vor schädlichen Einflüssen zu schützen. In einem weiteren Arbeitsschritt werden die Füllrohre angeschlossen und die Schlauchdichtung im unteren Bereich der Startbrille angebracht. Mit Abschluss dieser Arbeitsschritte ist die Dichtung einsatzbereit. Die Schlauchdichtung kann sowohl in die bereits eingebaute, als auch in die noch zu montierende, Startbrille integriert werden. Abb. 3.11 zeigt auf

⁸⁸Vgl. [17] DSI Underground GmbH

der linken Seite eine Startbrille obertage, welche mittels Kran in die Startbaugrube gehoben wird. Es sind die zwei Dichtungsebenen ersichtlich, die Lippendichtung in schwarz und der BULLFLEX® Schlauch in weiß. Am äußeren Umfang der Startbrille sind Injektionsstellen ersichtlich, mittels welcher die Schlauchdichtung verpresst wird. Das rechte Bild der Abb. 3.11 stellt eine bereits eingebaute Schlauchdichtung dar. Das verwendete System bestand aus zwei Schlauchdichtungen. Beim Einbau der Dichtung in die Startbrille ist besondere Sorgfalt gefordert, da ansonsten die ohnehin schon geringen Toleranzen weiter reduziert werden. Beim Verheben ist äußerste Vorsicht geboten, da ein Verformen der Startbrille eine Anfahrt sogar verhindern kann. Um das Risiko gering zu halten, sollte die Startbrille beim Anheben ausgesteift sein. In Tab. 3.1 sind die wesentlichen Eigenschaften eines BULLFLEX® Schlauches angegeben.⁸⁸



Abb. 3.11: Einbau der Schlauchdichtung in der Startbrille (Quelle: [7] BuM Beton- und Monierbau GmbH und [6] BuM Beton- und Monierbau GmbH)

Eigenschaften	Einheit	Wert	Hinweis
Material	-	Polyamid 6.6	Nylon
Gewicht	[g/m ²]	ca. 660	-
Stoffdicke	[mm]	ca. 1	-
Mindestzugfestigkeit	(längs/quer), [N]	12.000/24.000	100 [mm] Breite gem. EN ISO 10319
Elastische Dehnung	[%]	15	gem. EN ISO 10319
Bruchdehnung	[%]	20	gem. EN ISO 10319
Minimale Nahtfestigkeit	[kN/m]	155	-
Luftfluss durch Stoff bei Druck	(10 [mbar], 20 [mbar], 30 [mbar]), [l/min]	6,5/13/19	Bei 100 [cm ²]

Tab. 3.1: Technische Daten eines BULLFLEX® Schlauches (Quelle: modifiziert nach [17] DSI Underground GmbH)

Bei der Handhabung einer Schlauchdichtung ist der Kontakt mit scharfen Kanten jedenfalls zu verhindern. Dieser könnte zu einer Beschädigung des Schlauches führen. Zur Verfüllung mittels Mörtel sind stahlverstärkte Schläuche zu verwenden, da diese den hohen Verpressdrücken standhalten müssen. Vor Beginn des Verpressvorganges sind die Schläuche von innen mit ausreichend

Schmiermittel zu behandeln. Der Mörtel muss einfach zu verarbeiten sein und darf durch keine undichten Stellen des Schlauches austreten. Der Injektionsmörtel ist meist aus etwa 25% – 50% Portlandzement und 50% – 75% Flugasche zusammengesetzt. Anstelle der Flugasche kann Gesteinsmehl oder eine Mixtur aus Sand und Flugasche verwendet werden. Das Größtkorn beträgt dabei 3,8 mm und der W/Z-Wert liegt in einem Bereich zwischen 0,7 und 0,9. Die Verpressung des Schlauches sollte in einer Geschwindigkeit von etwa 80 bis 180 L/min erfolgen.⁸⁸

3.2.2 Dichtblock

In homogenen Böden mit lediglich moderatem Wasserdruck kann auf die Herstellung eines echten Dichtkörpers verzichtet werden. In diesen Fällen genügt eine Bodenverbesserung, da etwaiger Wasserandrang meist problemlos im Startschacht abgeführt werden kann. In Böden mit hohem Wasserdruck können kleine Undichtigkeiten, welche zunächst lediglich zu einem tröpfchenweisen Wasserzutritt in die Baugrube führen, innerhalb von kurzer Zeit in einem Versagen des Untergrundes resultieren. Dies kann eine Flutung der Baugrube zur Folge haben.⁸⁹

Üblicherweise wird ein Dichtblock hinter einer Schachtwand im anstehenden Lockergestein vertikal errichtet. Er kann allerdings im Zuge des Schachtaushubs auch horizontal hergestellt werden. Ein solcher Dichtblock soll die Dichtigkeit des Schachtes sicherstellen, nachdem die SM die Schachtwand abgebaut hat.⁹⁰ In Abb. 3.12 ist ein Anfahrvorgang mit einem solchen Dichtblock dargestellt. Zusätzlich sind weitere erforderliche Konstruktionselemente abgebildet und beschriftet. Es bestehen mehrere Ausführungsformen für einen Dichtblock. Grundsätzlich kann zwischen einer Herstellung im Bodenaustauschverfahren oder im Bodenverfestigungsverfahren unterschieden werden. Beispielsweise kann ein Dichtkörper aus Schlitzwandlamellen, welche sich in Längs- und Querrichtung überlagern, hergestellt werden. Um den Dichtblock mit der Schachtwand zu verbinden, können die äußeren Lamellen mit Dichtprofilen an diese angeschlossen werden. Dadurch wird die Schnittstelle dieser zwei Systeme abgedichtet. Bei der Dichtblockherstellung mittels Schlitzwandlamellen wird der anstehende Boden vollkommen ausgetauscht. Dies ermöglicht eine einheitliche Festigkeit des Dichtkörpers mit homogener Struktur.⁹¹ Alternativ kann ein Dichtblock aus überschnittenen Bohrpfählen hergestellt werden, wobei bei der Herstellung Magerbeton zum Einsatz kommt. Die Anbindung an die Schachtwand und die Herstellungsrahmenbedingungen unterscheiden sich nicht von obiger Ausführung der Schlitzwandlamellen. Dabei ist die Zugänglichkeit von der Geländeoberfläche erforderlich. Es handelt sich um ein erschütterungsarmes Verfahren, welches sich zum Einsatz in bebauten Gebieten eignet. Eine weitere Herstellungsmöglichkeit eines Dichtblockes stellt ein Magerbetonblock dar. Dazu wird eine zweite Schachtwand außerhalb des Schachtes errichtet und das Erdreich zwischen diesen Schachtwänden ausgehoben. Der Zwischenraum dieser zweier Wände, welche meist als Spundwände ausgeführt werden, wird mittels Magerbeton verfüllt. Anschließend können die Spundwände herausgezogen werden. Dieses Verfahren erfordert jedoch einen großen Platzbedarf und eignet sich daher lediglich, wenn keinerlei Bauwerke in der näheren Umgebung stehen. Die bisher beschriebenen Verfahren zur Dichtblockherstellung stellen allesamt Bodenaustauschverfahren dar. Alternativ dazu können Bodenverfestigungsverfahren zum Einsatz kommen. Das bedeutendste dieser Verfahren stellt das DSV dar, wobei eine Zementsuspension injiziert wird. Anzumerken ist jedoch, dass bei Bodenverfestigungsverfahren ein direkter Zusammenhang zwischen dem anzutreffenden Baugrund und den Eigenschaften des Dichtblocks besteht. Problematisch können sich außerdem Rammhindernisse,

⁸⁹Vgl. [65] Schwarz

⁹⁰Vgl. [29] Girmscheid, S. 562

⁹¹Vgl. [66] Schwarz und Mörchen, S. 1 ff.

beispielsweise größere Gesteinsblöcke, in der planmäßigen Säulenachse auswirken.⁹² Vorteilhaft wirkt sich jedoch die einfachere und kostengünstigere Herstellbarkeit der DSV-Säulen aus.

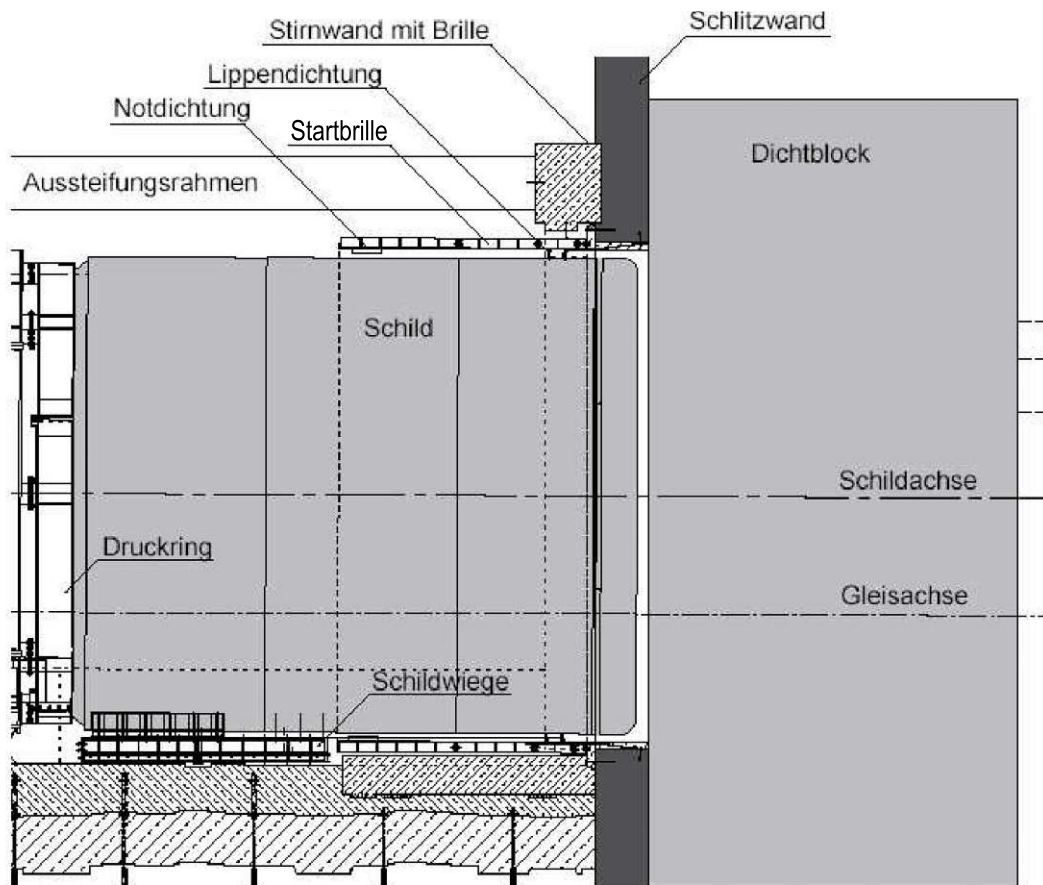


Abb. 3.12: Anfahrvorgang mit vorgelagertem Dichtblock (Quelle: modifiziert nach [67] Schwarz et al.)

Um die Funktionalität des Dichtblocks gewährleisten zu können, ist die Herstellung genau zu überwachen und zu dokumentieren. Dabei können Neigungsmessungen durchgeführt werden, wodurch die vertikale Abweichung der Dichtkörperlamellen kontrolliert wird. Aus unzureichender Überlappung der einzelnen Dichtkörper, können undichte Fugen resultieren. Die äußere Dichtigkeit des in einen GW-Stauer einbindenden Dichtkörpers, sollte vor Durchbrechen der Schachtwand kontrolliert werden. Dies kann durch Abteufen einer vertikalen Bohrung und anschließender Durchführung eines Pumpversuchs erfolgen. Dadurch soll der Boden unterhalb des Dichtkörpers entwässert werden. Wenn sich der Wasseranstrom unter einem zuvor definierten Wert befindet, ist die äußere Dichtigkeit des Dichtkörpers gegeben.⁹¹

Die innere Wasserundurchlässigkeit wird mittels einer horizontalen Bohrung überprüft. Die Bohrlanzen werden bis zu einer planmäßigen Fuge zweier Dichtkörperlamellen vorgetrieben. Anschließend wird ein Pumpversuch durchgeführt. Im ersten Schritt wird die Schnittstelle zwischen Schachtwand und Dichtkörper untersucht. Daran anschließend erfolgt die Überprüfung der folgenden Fugenüberschnitte. Ein Durchbohren des Dichtblocks ist jedenfalls zu verhindern. Wird ein Wasseraustritt beobachtet, kann versucht werden diesen mittels Feinzementinjektion zu unterbinden. Die horizontalen Bohrungen sind zunächst im Bereich der späteren Tunnelsohle

⁹²Vgl. [26] Flath

durchzuführen, da die Wahrscheinlichkeit für Fehlstellen dort am größten ist. Nebst der Überprüfung der Dichtheit können Festigkeitsprüfungen am Dichtblock durchgeführt werden.⁹¹ Als Größenordnung der zu erreichenden einaxialen Druckfestigkeit eines Dichtblockes kann eine Festigkeit von 5 N/mm² herangezogen werden.⁹² Der Dichtkörper leitet die einwirkenden Lasten mittels Gewölbewirkung ab. Die Bemessung muss die Einwirkungen aus Erd- und Wasserdruck, den Geländeaufasten, sowie jenen Lasten durch den Maschinenvortrieb berücksichtigen. Im Zuge der statischen Berechnung sind die maximale Druckbeanspruchung des Gewölbes, die Auflagerpressung an der Schachtwand und der erforderliche Erddruck zur Aufnahme des Horizontalschubes nachzuweisen.⁹¹

3.2.3 Fliegende Schildanfahrt

Die fliegende Schildanfahrt findet überall dort Anwendung, wo ein Anfahrvorgang mittels Rücksteifkonstruktion und Blindringen ebenfalls möglich ist. Hauptsächlich wird dieses Verfahren jedoch bei drückendem GW angewandt. Es ergeben sich Vorteile, wie eine ununterbrochene Anfahrt und eine erhöhte Arbeitssicherheit aufgrund des Entfalls der zahlreichen Blindringe, im Vergleich zur Anfahrt mit einem A-Bock. Diesen Vorteilen kommt bei beengten Startbaugruben eine besondere Bedeutung zugute.⁹³ Das Verfahren wurde von drei Mitarbeitern der Firma HOCHTIEF Infrastructure GmbH entwickelt und am 23.12.2004 beim Europäischen Patentamt zum Patent angemeldet.⁹⁴ Die fliegende Schildanfahrt basiert auf der Verschiebung der Rückverankerung samt der geschildeten TVM gegen die Ortsbrust. Demnach werden die Vorschubkräfte durch die Bewegung der Rückverankerung initiiert und nicht durch die Vorschubpressen der TVM. Die Vortriebspressen sorgen für eine permanente Spannung im Kontaktbereich des Druckrings mit der Schildmaschine. Durch das Verschieben des Druckringes gegen die Ortsbrust wird der zuvor blockierte Platz sukzessive frei. Dies stellt einen wesentlichen logistischen Vorteil, im Vergleich zu anderen Anfahrvorgängen, dar. Um die Kraft aus dem Druckring in die TVM einzuleiten, sind meist ein oder zwei Blindtübblinge erforderlich, da eine Krafteinleitung in den Schildschwanz nicht vorgesehen ist. Diese Blindringe überbrücken den Bereich zwischen den Vortriebspressen und dem Druckring, welcher durch den Schildschwanz geschützt ist.⁹⁵

Neben dem logistischen Vorteil einer fliegenden Schildanfahrt können weitere Vorteile beobachtet werden. So gilt die Tunnelanfahrt mittels fliegender Schildanfahrt als weniger zeitaufwändig verglichen mit dem herkömmlichen Anfahrvorgang, welcher einer Widerlagerkonstruktion bedarf. Die Herstellungskosten fallen aufgrund eines reduzierten Stahlverbrauchs geringer aus. Der Druckring ist zwar massiver auszuführen, jedoch entfällt die Stützkonstruktion der Blindtübblingröhren bei der fliegenden Schildanfahrt. Darüber hinaus ist eine Kosteneinsparung durch die Reduktion der Tübblingringanzahl zu verzeichnen. Aufgrund dieser Merkmale reduzieren sich die Rückbaukosten der Konstruktion ebenfalls. Die Rückbauarbeiten stellen aus arbeitssicherheitstechnischer Sicht ein großes Gefährdungspotential dar. Es wird mit schweren Bauteilen, welche teilweise vorgespannt sind, unter beengten Platzverhältnissen gearbeitet. Kommt ein Kran zum Einsatz, erhöht sich die Gefährdung durch fehlenden Sichtkontakt des Kranführers zum Anschläger.⁹⁶

Die wesentlichen Konstruktionselemente der fliegenden Schildanfahrt sind der Druckring, welcher als Stahlbaukonstruktion hergestellt wird, eine Hydraulikanlage, welche die Vortriebskräfte erzeugt und Zugseile, die die Kräfte in die Ortsbrust oder Schachtwand einleiten. Die Zugseile werden mittels Ankerplatten und Muttern an dem Druckring befestigt. Um die Vortriebskräfte in die Schachtwand oder Ortsbrust einzuleiten, gibt es mehrere Methoden. Beispielsweise können

⁹³Vgl. [45] Kirsten et al., S. 97

⁹⁴Vgl. [77] Europäische Patentschrift: 2008-02, S. 1

⁹⁵Vgl. [45] Kirsten et al., S. 99 ff.

⁹⁶Vgl. [3] Assenmacher, S. 34 ff.

die Kräfte über Vertikalträger in eine Baugrubenaussteifung geleitet werden, oder mittels Anker in das Gestein hinter der Schachtwand. Der Vorschub wird von einem Steuerstand geleitet. Die hydraulischen Hohlkolbenpressen, welche Zugkräfte erzeugen, leiten den Vorschub erst dann ein, wenn gewisse Randbedingungen eingehalten werden. Diese Bedingungen können beispielsweise die Rotation des Schneidrades oder ein aufgebauter Spülkreislauf sein.⁹⁵ Das Funktionsprinzip wird in Abb. 3.13 ersichtlich. Die linke Abbildung stellt die Ausgangsposition des Anfahrvorganges dar. Das Schneidrad der SM befindet sich an der Schachtwand. Am hinteren Ende der Maschine ist ein Druckring mit hydraulischen Pressen angebracht. Die Hubzylinder sind mittels Zugseilen oder Zugstangen mit vertikalen Trägern an der Schachtwand verbunden, wohin die Vorschubkräfte eingeleitet werden. Der Vorschub erfolgt kontinuierlich. Die Endposition der fliegenden Schildanfahrt ist im rechten Teil der Abb. 3.13 dargestellt.

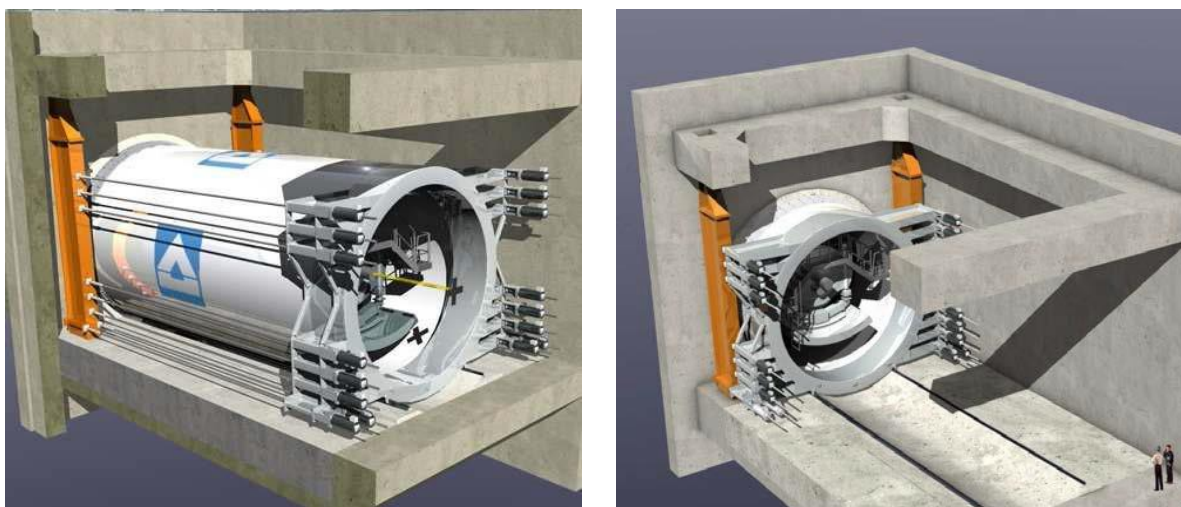


Abb. 3.13: Funktionsprinzip der fliegenden Schildanfahrt (Quelle: [45] Kirsten et al., S. 101)

Die Errichtung des Systems erfolgt durch das Absetzen des Druckringes auf einer Schildwiege, auf welcher sich die TVM bereits befindet. Anschließend werden, je nach Notwendigkeit, ein oder zwei Blindringe errichtet. Den Abschluss bildet die Befestigung der Zugstreben in dem vorgesehenen Verankerungsmechanismus. Die Vortriebspresen der TVM übernehmen bei der fliegenden Schildanfahrt lediglich eine Stütz- und keine Vortriebsfunktion. Der Vortrieb erfolgt ausschließlich mittels Hohlkolbenzylinder. Diese sind um den Druckring verteilt oder bereichsweise angeordnet. Um auf etwaige Lageänderungen reagieren zu können, sind die Vortriebspresen in verschiedene Pressengruppen eingeteilt. Jede dieser Gruppen ist separat von den anderen über einen eigenen Hydraulikkreislauf steuerbar. Die wesentlichen Kenngrößen des Vortriebs sind die maximalen Vortriebskräfte, sowie deren Verteilung auf die Pressengruppen, die Vortriebsgeschwindigkeit und die maximale Schiefstellung des Druckringes. Im Zuge der fliegenden Schildanfahrt erfolgt eine permanente Lagekontrolle mittels mechanischen Wegmesssystems. Dieses Messsystem wirkt in Form von Seilzugsensoren, welche in die Systemsteuerung integriert sind.⁹⁵ Das zugehörige Kontrollsystem ist mit einem Grenzwert der maximalen Schiefstellung des Druckringes von 0,25% programmiert. Bei einem Abstand der Druckwand zur Ortsbrust von 8 m, würden die hydraulischen Pressen einen automatischen Korrekturprozess einleiten, wenn die Differenz zweier Pressengruppen einen Wert von 20 mm überschreitet. Mittels einer Störfallanalyse kann auf einen Bruch von Hydraulikleitungen, einen Stromausfall oder ein Zugseilversagen sofort reagiert werden. Unter solchen Umständen sorgt die Hydrauliksteuerung unverzüglich dafür, dass das System in einen sicheren Zustand gebracht wird.⁹⁶ Befinden sich die Hohlkolbenpressen in völlig

ausgefahrener Stellung, müssen die Ankermuttern des Druckrings nachgezogen werden. Dadurch wird sichergestellt, dass das Gesamtsystem statisch bestimmt bleibt, solange die Pressen eingefahren werden und man die Ankermuttern hinter den Kolbenpressen anzieht. Die Anzahl der Vortriebszyklen wird durch die geforderte Endposition des Druckringes bestimmt. Im Anschluss an die fliegende Schildanfahrt erfolgt der Vortrieb mittels Vortriebspressen der TVM. Ist eine ausreichende Verbundwirkung zwischen dem Tübbingausbau und dem anstehenden Gebirge gewährleistet, kann mit dem Rückbau der Anfahrkonstruktion begonnen werden. Der Vortrieb kann dabei ungestört weiter ablaufen.⁹⁵

Die für den Vortrieb benötigten Vortriebskräfte sind wesentlich von dem Maschinendurchmesser und dem aufzufahrenden Gebirge abhängig. Die Entwicklung dieses Anfahrvorganges führt in Richtung immer größerer Durchmesser und der Realisierung höherer Anfahrkräfte. Als Größenordnung der erforderlichen Vortriebskräfte können Werte zwischen 10.000 und 15.000 kN herangezogen werden. Dieser Wert ist jedoch projektspezifisch zu ermitteln und kann die angegebenen Werte sowohl unterschreiten als auch übertreffen. Es hat sich bei der fliegenden Schildanfahrt jedoch etabliert, diese geforderten Werte – meist sehr deutlich – zu überschreiten und damit eine zusätzliche Systemsicherheit zu erzeugen.⁹⁵

Die erste Anwendung fand die fliegende Schildanfahrt beim U-Bahnbau in Köln im Jahr 2006.⁹⁵ Die Vortriebsmaschine wies einen Durchmesser von 6,80 m auf. Die Aufstellfläche im Startschacht war mit einer Länge von etwa 33 m begrenzt. Der Anfahrvorgang führte durch eine 80 cm dicke unbewehrte Schlitzwand, mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min. Im Anschluss wurde ein 3,40 m dicker Dichtblock mit einer Geschwindigkeit von 10 bis 15 mm/min durchfahren. Nach dem Dichtblock konnte eine Vortriebsgeschwindigkeit von 25 mm/min realisiert werden. Der gesamte Anfahrvorgang benötigte 36 Stunden, wovon 12 Stunden auf einen Bentonitaaustausch nach Verlassen des Dichtblocks entfallen sind.⁹⁶ Im Zuge des Baus der Metro in London im Jahr 2012 kam ein Schild mit einem Durchmesser von 7,12 m in Kombination mit dieser Anfahrvariante zum Einsatz. Die prognostizierten Vorschubkräfte lagen bei 12.400 kN. Während des Anfahrvorganges, welcher mit einer Geschwindigkeit von etwa 25 mm/min erfolgte, wurden die tatsächlich benötigten Kräfte aufgezeichnet. Sie lagen zwischen 7.100 und 8.800 kN und damit erheblich unter den ursprünglich prognostizierten Werten. Zur Anwendung kamen Pressen mit einer maximalen Vorschubkraft von 19.000 kN.⁹⁵ Abb. 3.14 zeigt die im Jahr 2008 beim U-Bahnbau der Linie U3 in München zur Anwendung gekommenen TVM. Der Maschinendurchmesser beträgt 6,57 m. Bei dieser fliegenden Schildanfahrt waren die Kolbenzylinder rund um den Druckring verteilt. Diese Pressen konnten Vortriebskräfte von 23.720 kN generieren.⁹⁵ Die Zugseile sind in die Schachtwand eingebunden und sind dort an Anker angeschlossen, welche die Vorschubkräfte in das Gebirge ableiten.

3.2.4 Anfahrt mit vorgelagertem Betontopf

Im Folgenden wird eine Sonderlösung näher beleuchtet, welche bei der Errichtung des City-Tunnel Leipzig zum Einsatz gekommen ist. Ursprünglich waren überschnittene DSV-Pfähle vorgesehen. Während der Herstellung dieser Säulen wurden jedoch Holz- und Braunkohleeinlagerungen im anstehenden Boden entdeckt. Diese würden die Dichtwirkung des Dichtblocks maßgeblich negativ beeinflussen, daher kann ihnen lediglich eine Bodenverfestigungswirkung zugeschrieben werden. Aus diesem Grund galt es eine alternative Lösung zu finden. Die Stützung der Ortsbrust sollte zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein, was zu technischen und terminlichen Herausforderungen führte. Im Zuge einer Machbarkeitsstudie wurden verschiedene Lösungsansätze für den Anfahr- und Ausfahrvorgang in die Haltestelle untersucht. Jene Ansätze, bei welchen die Brillendichtung als erste Dichtungsebene gegen die hohen Wasserdrücke eingesetzt wurde, mussten aufgrund der fehlenden Prüfbarkeit dieser Brillendichtungssysteme ausgeschlossen werden. Aus diesem



Abb. 3.14: Fliegende Schildanfahrt (Quelle: [64] Schütz und [63] Schütz)

Grund wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches unter den schwierigen Rahmenbedingungen und hohen Sicherheitsanforderungen funktionstüchtig war. Dabei handelte es sich um einen Betontopf, welcher als innen liegender Dichtblock ausgeführt wird. Dieser ermöglicht es, das geforderte Sicherheitsniveau bei gegebenen Bedingungen zu erreichen. Das Funktionsprinzip eines solchen Betontopfes beruht darauf, dass die erste Dichtungsebene in den Bereich innerhalb der Schachtwand verlagert wird und sich nicht, wie üblich, im Dichtblock außerhalb befindet. Die angewandten Betontöpfe sind in ihrer Schale bewehrt und im Kern unbewehrt ausgeführt, wobei der Kern bereits hohl hergestellt werden kann. Abb. 3.15 zeigt die Herstellung dieses Betontopfes. Im linken Teil der Abbildung ist die Abbaukammer ersichtlich, welche sich direkt vor der Schachtwand befindet. Auf diese wird im weiteren Verlauf näher eingegangen. Im Anschluss an die Abbaukammer ist eine Betonröhre zu erkennen, welche aus Fertigteilsegmenten errichtet wurde und im Inneren hohl ist. Außerdem erfolgte bereits der Start der Schalungsarbeiten des bewehrten Teil des Betontopfes. Diese Schalung ist im rechten Teil der Abbildung bereits fertiggestellt und es konnte betoniert werden. Die Länge eines solchen Betontopfes berechnet sich aus geometrischen, statischen und baubetrieblichen Einflussparametern.⁹⁷ Dieses Verfahren wurde von dem Unternehmen DYWIDAG Bau GmbH am 18.05.2007 beim Europäischen Patentamt zum Patent angemeldet.⁹⁸ Die statischen Nachweise der inneren und äußeren Standsicherheit sind für die folgenden Lastfälle durchzuführen:⁹⁹

- Druckluftbelastung
- Betonierdruck
- Stützdruck

⁹⁷Vgl. [66] Schwarz und Mörchen, S. 6 ff.

⁹⁸Vgl. [78] Europäische Patentschrift: 2007-05, S. 1

⁹⁹Vgl. [66] Schwarz und Mörchen, S. 7 ff.

- Eigengewicht der TVM
- Schneidradanpressdruck
- Ringbaukraft
- Reibung des Schildmantels



Abb. 3.15: Betontopf des City-Tunnel Leipzig (Quelle: [18] Erritt und [21] Erritt)

Beim City-Tunnel in Leipzig wurde der Betontopf mit einer Länge von 23 m ausgeführt. Dies ermöglichte es, die SLS komplett hineinzuschieben und den benötigten Stützdruck, welcher Wasserdrücken von bis zu 18 m entgegenwirken musste, von der Restblocklänge aufzunehmen. Die Ausführung des Betontopfes kann auch so erfolgen, dass mit einer Kurvenfahrt gestartet werden kann. Die Vorschubkräfte werden über die Vortriebspresen in die Blindringe geleitet. Von dort führte der Kraftfluss beim City-Tunnel Leipzig über Konsolen in den Betontopf. Alternativ kann ein Druckring am Ende des Betontopfes angebracht werden, wogegen die Vortriebspresen die Blindringe drücken können. Ein solcher Druckring muss mittels Anker im Erdreich hinter der Schachtwand verankert sein. Es muss jedenfalls sichergestellt werden, dass die Vortriebskräfte über Reibung in die Bodenplatte abgeleitet werden können. Der Vortrieb im inneren des Betontopfes erfolgt mittels Blindtübungen, welche ab der Brillenwand von verbleibenden Tübungen ersetzt werden. Der Ringspalt wird im Zuge des Vortriebs kontinuierlich verpresst. Da die Schachtwand in Leipzig mit einer stählernen Bewehrung ausgeführt wurde, wird die Schachtwand, von einer druckluftbeaufschlagten Abbaukammer im Betontopf aus, händisch abgebaut. Diese ist durch eine, seitlich am Betontopf angeordnete, Material- und Personalschleuse zugänglich. Der Abbau erfolgt mittels Hochdruckstrahlen. Anschließend an den Abbruch wird die Abbaukammer mit einem Beton verfüllt und die Schleusen demontiert. Dadurch wird der Vortrieb durch den Betontopf ermöglicht. Auf eine solche Abbaukammer kann verzichtet werden, wenn die Schachtwand mit einer Glasfaserbewehrung ausgeführt wird. Nach einem Tunnelvortrieb von etwa 50 m ist die Reibung zwischen den Tübungen und dem umhüllenden Erdreich groß genug, um auf den Betontopf zur Kraftabtragung verzichten zu können. Ab diesem Zeitpunkt kann mit dessen Rückbau begonnen werden. Dieser Ablauf ist in Abb. 3.16 schematisch dargestellt. Der abgebildete Dichtblock wurde beim City-Tunnel Leipzig vor dem Betontopf errichtet. Diesem wird jedoch aufgrund der Einlagerungen keine Dichtwirkung zugeteilt. Die Dichtigkeit des Betontopfes wird durch die folgenden Maßnahmen beeinflusst:⁹⁷

- Rissvermeidung durch entsprechende Bewehrung und Betonnachbehandlung
- Abdichten der Fuge zwischen Betontopf und Brillenwand mittels Verpressschläuchen oder Nachinjektionen



Abb. 3.16: Ablaufschema des Anfahrvorganges mittels Betontopf (Quelle: modifiziert nach [23] Eritt)

- Verkeilung der TVM im Betontopf als Lastfall berücksichtigen
- Verhindern des Weggleitens des Betontopfes durch Begrenzung des Stützdrucks oder entsprechender Dimensionierung der Schubverzahnung (Trapezleisten zwischen Sohle und Betontopf)
- Verhindern des Kippens des Betontopfes

Kann die Dichtheit zwischen der Schachtwand und dem Betontopf garantiert werden, ermöglicht das Verfahren einen Tunnelvortrieb bei drückendem GW ohne einen, der Schachtwand vorgelagerten, Dichtblock. Im städtischen Bereich kann oftmals aufgrund dichter Bebauung und zahlreicher Einbauten im Untergrund kein Dichtblock in ausreichender Größe hergestellt werden.

3.2.5 Schild Transfer System

Im Zuge des Baus der Nord/Süd-Metrolinie Amsterdam, im Jahr 2010 in den Niederlanden, wurde eine Sonderlösung entwickelt – das so genannte Schild Transfer System (STS). Diese Konstruktion beinhaltet die erforderlichen Einrichtungen der Start- und Zieldichtebenen und ermöglicht darüber hinaus einen Transfer des SLS, vom Ausfahrtpunkt zum folgenden Anfahrtpunkt einer Haltestelle.

Herkömmliche Verfahren konnten aufgrund geometrischer Gründe nicht zum Einsatz kommen. Der Baugrund in Amsterdam besteht hauptsächlich aus Lockergesteinen, wobei sich die GW-Oberfläche nur knapp unter der Geländeoberfläche befindet. Die dichte historische Bebauung ist meist auf hölzernen Pfählen gegründet, welche sehr setzungsempfindlich auf Zustandsänderungen reagiert. Aus diesem Grund ist ein besonderes Augenmerk auf die Dichtungsebenen zu legen, um das Eindringen etwaigen Bodenmaterials in den Schacht zu verhindern. In Bereichen wo herkömmliche Start- und Zielvorgänge realisiert werden konnten, wurde wie üblich ein sich vor der Station befindlicher Dichtblock eingesetzt. Alternativ dazu konnte ein Dichtblock aus Beton im Inneren der Station angewandt werden, wenn die geometrischen Rahmenbedingungen dies zu ließen.¹⁰⁰

Aufgrund vertraglicher Vorgaben konnte die Herstellung des Dichtblockes nicht mittels Bodenaustauschverfahren erfolgen. Eine Anwendung des DSV wäre mit hohen Risiken verbunden, da dieses bei vergangenen Projekte keine ausreichende Dichtwirkung erzeugte. Die Lösung eines Betontopfes, wie in *Kapitel 3.2.4 – Anfahrt mit vorgelagertem Betontopf* beschrieben, konnte aufgrund der Stationsgeometrie nicht zur Anwendung kommen. Als weitere Erschwernis kommt hinzu, dass aufgrund einer Optimierungsmaßnahme zur Minimierung der Aushub- und Ausbaumassen, die Bodenplatte im mittleren Bereich der Station höher ausgeführt wurde als in den seitlichen Bereichen. In einer Entfernung zur Schachtwand von etwa 10 m bis 20 m befindet sich eine Stufe in der Bodenplatte mit einer Höhe von bis zu 1,65 m. Diese muss im Zuge des Transfers der SLS durch die Station überwunden werden. Dies verhindert in weiterer Folge die Verwendung eines Dichtblocks innerhalb der Station. Herkömmliche Hebeeinrichtungen für den Transfer der TVM durch die Haltestelle konnten aufgrund von Platzgründen und des hohen Gewichts, von etwa 450 t, nicht zum Einsatz kommen. Als Ergebnis einer Machbarkeitsstudie wurde das STS entwickelt, welches aus einem, die TVM einhüllenden, stählernen und druckwasserdichten Drucktopf besteht. Dieses System ermöglichte darüber hinaus den Transfer des SLS innerhalb der Station und die Überwindung der Höhendifferenz. Der Drucktopf fungiert als Dichtblock, wobei in Ergänzung eine herkömmliche Brillendichtung in der Anfahrbrille eingesetzt wird.¹⁰⁰

Die wesentlichen Systembestandteile des STS sind der stählerne Drucktopf, eine Schildwiege und eine Hebeeinrichtung, welche aus vertikal und horizontal angeordneten Hydraulikpressen besteht. Der Drucktopf ist lediglich auf die Schildwiege aufgelegt, es herrscht keine kraftschlüssige Verbindung. Dies bietet den Vorteil, dass es zu keinen Zwängungen, infolge Positionierungsabweichungen der TVM im Drucktopf, kommt und das Dichtungssystem unbeeinträchtigt bleibt. Die Hydraulikpressen weisen eine Gesamthöhe von etwa 2,55 m auf und sind an der äußeren Umrandung der Schildwiege angeordnet. Das Gesamtgewicht des STS beläuft sich auf etwa 150 t.¹⁰⁰ Bei dem in Abb. 3.17 dargestellten STS ist der Drucktopf in rot dargestellt, die Hydraulikzylinder in grün und die Schildwiege in grau.

Um den Anfahrvorgang mit dem STS zu ermöglichen, wird dieses an die Schachtwand geschoben und mittels hydraulischer Pressen gegen eine Rücksteifkonstruktion, wie in *Kapitel 3.1.2 – Anfahrvorgang mittels Rücksteifkonstruktion und Blindringen* beschrieben, gedrückt. Dadurch wird ein Verschieben des Drucktopfes ausgeschlossen, was sonst zu Undichtigkeiten führen würde. Die Rücksteifkonstruktion ist so ausgeführt, dass der Nachläufer der TVM durch sie hindurch in den Drucktopf fahren kann. Vor dem Startvorgang wird der Drucktopf an der Ortsbrust mit der Stützflüssigkeit gefüllt und ein Druck von bis zu 3,5 bar aufgebaut. Bei der Metrolinie in Amsterdam bestand die Rücksteifkonstruktion aus einem Rahmen von HEM-1000 Profilen, welche miteinander verschraubt waren und einer schrägen Aussteifung aus Rundstützen mit einem Durchmesser von 50 cm. Der Innendurchmesser des Drucktopfes ist mit einem Durchmesser von 7,10 m lediglich um 22 cm größer als die SM, welche einen Durchmesser von 6,88 m aufweist. Aus

¹⁰⁰Vgl. [28] Friedemann et al.

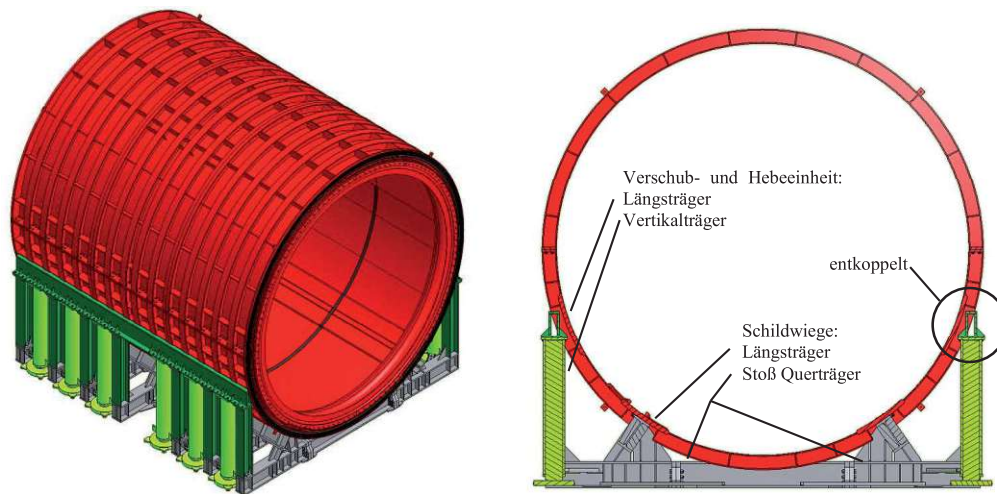


Abb. 3.17: Aufbau des STS (Quelle: [28] Friedemann et al.)

diesem Grund ist ein besonderes Augenmerk auf die Präzision beim Einfahren in den Drucktopf zu legen. Abweichungen im Zuge der Ein- und Ausfahrt in den Drucktopf können nur bis zu einer Größe von 50 mm toleriert werden. Größere Differenzen würden zu einer Beschädigung der Dichtebene führen. Die Vorschubkräfte beim Anfahrvorgang werden von den Vorschubpressen in einen Druckring geleitet. Dieser besteht aus einzelnen Stahlsegmenten, welche eine Breite von etwa 1 m und eine Höhe von 35 cm aufweisen. Die Segmente werden miteinander verschraubt und sind vom Drucktopf statisch entkoppelt. Dadurch wird sichergestellt, dass keine Lastabtragung über das STS erfolgt.¹⁰⁰

Für den Transfer der TVM durch die Station wird der Nachläufer abgekoppelt. Dieser ist wesentlich leichter und flexibler als das Schild der Maschine und kann im Anschluss an dieses über Rampen durch die Station gezogen werden. Das Schild der Maschine wird mittels des STS durch die Station befördert. Dabei hält die TVM die selbe Lage bei, welche sie nach dem Ausfahrvorgang einnimmt. Um etwaige Verrollungen der Maschine zu korrigieren sind im Drucktopf Führungsschienen angebracht. Das STS ist mit sechs Hydraulikpressenpaaren ausgestattet, welche eine Hubhöhe von 1,85 m ermöglichen. Das Gesamtgewicht, bestehend aus SLS und STS, beläuft sich auf etwa 600 t. Dies steht einer maximal aufnehmbaren Pressenlast von 1.250 kN je Presse gegenüber. Bei Anordnung von insgesamt 12 Pressen kann demnach eine Last von etwa 1.500 t verhoben werden. Dadurch ist eine ausreichende Sicherheit gegeben. Der Transfer wird durch Lastmodule ermöglicht, welche sich unterhalb der Pressen befinden. Diese sind mit Stickstoff betrieben und heben das STS, samt der SM, mittels eines Luftkissens – vergleichbar mit einem Luftkissenboot – an. Dadurch wird ein Verschieben der Konstruktion mit einem Reibungskoeffizient von lediglich 1% möglich. Das STS gleitet auf ebenen Blechen mit glatter Oberfläche auf einem definierten Weg. Durch seitlich angebrachte L-Profile wird es vor Verschieben gesichert. Die Bleche sorgen für minimierte Stickstoffverluste im Zuge des Transfers. Die Verschiebung wird durch Seilwinden initiiert. Zunächst wird das STS an die Stufe in der Station verschoben. Im Anschluss daran werden die Hydraulikpressen ausgefahren und die Konstruktion auf die nötige Höhe angehoben. Die Überwindung der Stufe erfolgt schrittweise. Im ersten Schritt wird das vorderste Pressenpaar eingefahren und das STS so weit gegen die Stufe verschoben, dass das zweite Pressenpaar an der Stufe ansteht. Darauf hin können die Pressen des ersten Pressenpaares erneut ausgefahren werden und jene der zweiten Hydraulikzylinderreihe eingefahren, usw. In Abb. 3.18 ist das STS im Zuge der Überwindung einer Stufe abgebildet. Das linke Bild der Abbildung zeigt den Hub über einen kleineren Höhenunterschied. Im rechten

Teil der Abbildung ist das Schild des SLS zu sehen, welches über eine große Stufe gehoben wird. Es ist ein ständiger Kontakt von mindestens 5 Pressenpaaren mit dem Untergrund gewährleistet. Diese Abfolge wiederholt sich, bis sich das letzte Pressenpaar auf der Stufe befindet. Der Transfer der restlichen Station erfolgt mit dem selben Prinzip, jedoch in umgekehrter Reihenfolge.¹⁰⁰



Abb. 3.18: Hub des STS über eine Stufe (Quelle: [28] Friedemann et al.)

Aufgrund der beengten Platzverhältnisse der Baustelle war eine Lagerung des STS nicht möglich. Es war erforderlich, dass die sechs Halbschalen des Drucktopfes samt der restlichen Konstruktion zum benötigten Zeitpunkt geliefert wurden. Beim Zusammenbau galt es besondere Sorgfalt zu wahren, da selbst kleine Ungenauigkeiten zu einer Undichtigkeit des Gesamtsystems führen können. Solche Undichtigkeiten können selbst durch den Einbau zusätzlicher Fugenbänder oder dem Verkleben der Fugen nicht behoben werden. Die Montage des STS bis zur Einsatzbereitschaft dauert etwa acht Wochen, bei einer Arbeitszeit von fünf Tagen pro Woche zu je zwölf Stunden. Der Transfer durch die Station benötigt etwa 35 Tage, bei einer durchgängigen Arbeitszeit. Dabei ist die benötigte Zeit für das Ab- und anschließende Ankoppeln des Nachläufers, die Errichtung und folgende Demontage der Rückstifkonstruktion bereits enthalten. Die Überwindung der Stufe nimmt mit etwa vier Stunden je Stufe eine verhältnismäßig geringe Zeitdauer in Anspruch.¹⁰⁰

Weitere Methoden des Schildtransfers

Erfolgt die Ausfahrt einer TVM in eine Haltestelle, so ist ein Transfer der Maschine zur entgegengesetzten Schachtwand erforderlich, um von dort aus den erneuten Anfahrprozess zu starten. Dies kann mittels des zuvor beschriebenen innovativen STS erfolgen, alternativ dazu werden im kommenden einige herkömmliche Verfahren beschrieben. Eine Möglichkeit stellt die Herstellung eines Rutschschlittens dar, mittels welchen die TVM über den Boden gezogen werden kann. Die benötigte Stahlkonstruktion wird meist in einer Länge von zwei Maschinenlängen ausgeführt und regelmäßig umgesetzt. In Abhängigkeit der Maschinengröße werden Zugstangen oder Hohlkolbenpressen eingesetzt, um die Maschine zu ziehen. Die Kräfte werden über Litzenanker in den Untergrund eingeleitet. Die TVM wird über Flachstahlgleitschienen, welche an der Oberfläche des Fundaments befestigt sind, gezogen. Zur Verminderung der Reibungskräfte können die Komponenten mit Fett geschmiert werden. Auf diesen Vorschubfundamenten sind Bontübbinge verlegt, welche miteinander verschraubt werden. Die Tübbinge dienen der Aufnahme der Vorschubkräfte der Maschine und werden als Fahrbahn für den Nachläufer verwendet. Die verwendete Konstruktion kann nach Schildtransfer im nächsten Haltepunkt erneut zum Einsatz kommen.¹⁰¹

¹⁰¹Vgl. [29] Girmscheid, S. 559 ff.

Bei kleineren TVM kann ein druckluftgestütztes Verfahren, ähnlich zu jenem des STS, zum Einsatz kommen. Die Maschine wird dabei auf einer Schlittenkonstruktion gelagert. Über Ventile wird die parallel geschaltete Druckluftversorgung gesteuert. Ist der aerodynamische Staudruck größer als die lokale Flächenpressung unterhalb der Stahlplatte des Schlittens, entsteht ein Auftrieb. Dieser ermöglicht ein nahezu schwereloses Gleiten. Die beste Funktionalität ist bei einem glatten, reibungsarmen und ebenen Untergrund gegeben. Die Zugkräfte werden ebenfalls mittels Zugstangen oder Hohlkolbenpressen initiiert und in Litzentanker in die Schachtwand geleitet. Bei der Herstellung des Litzentankers ist auf einen ausreichenden Abstand zum Tunnelprofil zu achten.¹⁰¹

Muss die TVM zu einem anderen Baulos transportiert werden, so kann dies mittels eines Schwertransportes erfolgen. Dabei wird das Schild in der Regel per Tieflader auf einer stählernen Schildwiege zum nächsten Einsatzort manövriert. Ein solcher Transfer ist im Vorhinein genau zu planen, um Kenntnis über etwaige Beschränkungen der Transportwege zu erlangen. Ein solcher Schildtransfer in Abb. 3.19 ersichtlich.



Abb. 3.19: Schildtransfer der TBM-S der Tunnelkette Perschling (Quelle: [69] Strabag AG)

3.3 Ausfahrvorgänge bei nicht drückendem GW

Verhältnismäßig einfach gestaltet sich der Ausfahrvorgang, wenn der Tunnelvortrieb außerhalb des GW erfolgt. Nach dem Durchbruch einer Schachtwand wird eine Schildwiege so positioniert, dass die Maschine auf dieser zu liegen kommen kann. Nach dem Einbau des letzten verbleibenden Tübbingrings kann die Maschine aus dem Schacht auf diese Schildwiege gezogen werden. Von dort wird sie nun entweder abtransportiert, oder zu einer erneuten Anfahrposition transferiert.

Eine solche Ausfahrt ist in Abb. 3.20 ersichtlich. Diese zeigt die TBM-S der Tunnelkette Perschling nach erfolgtem Durchbruch. Vor dem Bohrkopf befindet sich eine Schildwiege aus Stahlbeton. Im Anschluss an diese kann eine stählerne Schildwiege positioniert werden, mit Hilfe welcher ein Schildtransfer ermöglicht wird.

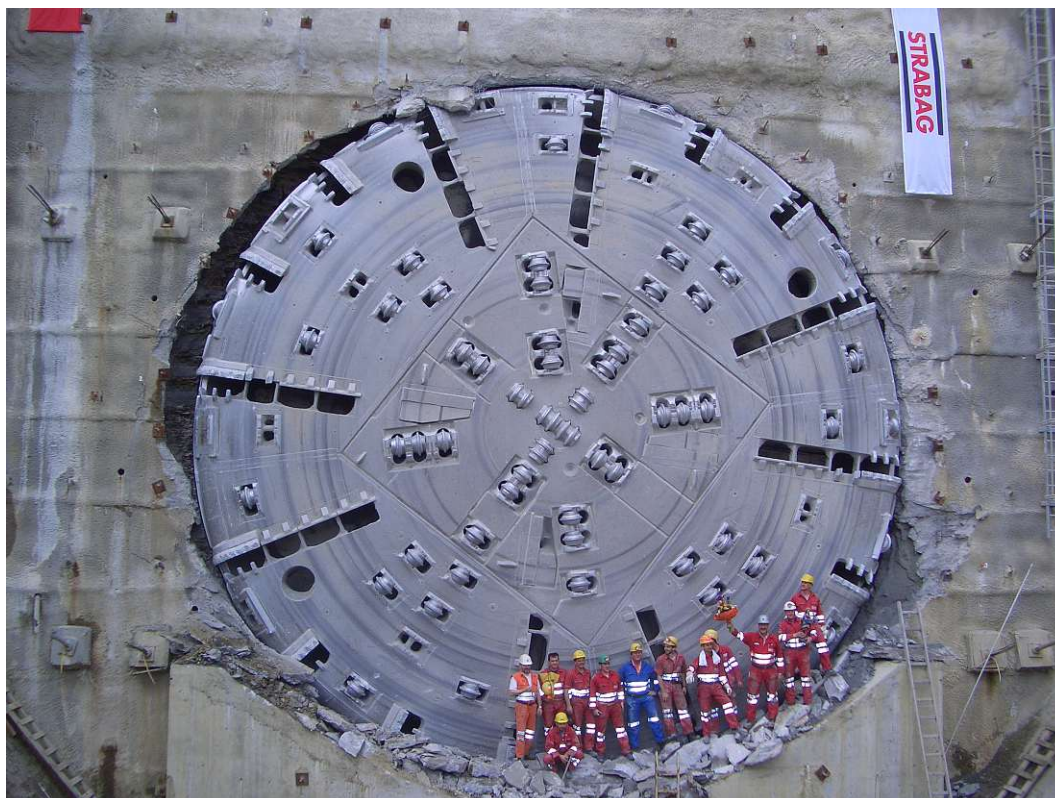


Abb. 3.20: Ausfahrt der TBM-S der Tunnelkette Perschling (Quelle: [69] Strabag AG)

3.4 Ausfahrvorgänge bei drückendem GW

Komplizierter gestaltet sich der Ausfahrvorgang bei drückendem GW, da dafür zu sorgen ist, dass kein Grundwassereinbruch ins Schachtinnere erfolgt. Dieses Kapitel behandelt zunächst die Zielbrille und deren wesentliche Unterschiede zur Startbrille. Anschließend werden die Gegensätze des Dichtblocks der Ausfahrtsituation mit jenem des Anfahrvorganges aufgezeigt. Die bei der Tunnelausfahrt zum Einsatz kommenden Verfahren unterscheiden sich meist nur unwesentlich von jenen, welche beim Anfahrvorgang verwendet werden. Aus diesem Grund sollen abschließend die verschiedenen Verfahren der Anfahrvorgänge bei drückendem GW erneut aufgegriffen werden und auf die wesentlichen Änderungen und Ergänzungen der Ausfahrvorgänge hingewiesen werden. Zusätzlich wird ein weiteres Ausfahrverfahren vorgestellt, welches kein Pendant als Anfahrvorgang besitzt.

3.4.1 Brillendichtungssysteme der Zielbrille

Die Einfahrt in einen Zielschacht stellt andere Anforderungen an das Dichtungssystem als die Ausfahrt. Die Zielbrille unterscheidet sich von der Startbrille, da sich Lippendichtungen für die Zielsituation nicht eignen. Das Funktionsprinzip einer Lippendichtung basiert darauf, dass sie

sich in Vortriebsrichtung umklappt und die herrschenden Drücke eine Anpresskraft gegen den Schildmantel erzeugen. In der Zielsituation würden vorherrschende Drücke die Lippendichtung jedoch von dem Schildmantel weg drücken, anstatt einen Anpressdruck zu erzeugen. Aus diesem Grund wurde eine eigens aktivierbare Elastomerabdichtung entwickelt, welche in der Ausfahr-situation zum Einsatz kommen kann. Eine solche Abdichtung ist in Abb. 3.21 zu sehen. Fährt der Schildmantel in die Zielbrille ein, wird das Dichtungsprofil mechanisch gegen den Schildmantel gepresst, wodurch eine Abdichtung erfolgt. Diese Dichtung muss neben den geometrischen Toleranzen auch etwaige Fahrtoleranzen kompensieren. Die Funktionstüchtigkeit ist durch einen ausreichend hohen Anpressdruck sicherzustellen. Eine Prüfung der Dichtwirkung im Zuge einer Bewegung ist nicht möglich. Es gilt jedoch, die großen Horizontalkräfte zu beachten, welche aufgrund des hohen Anpressdrucks bei großen Wasserdrücken erforderlich sind.¹⁰²

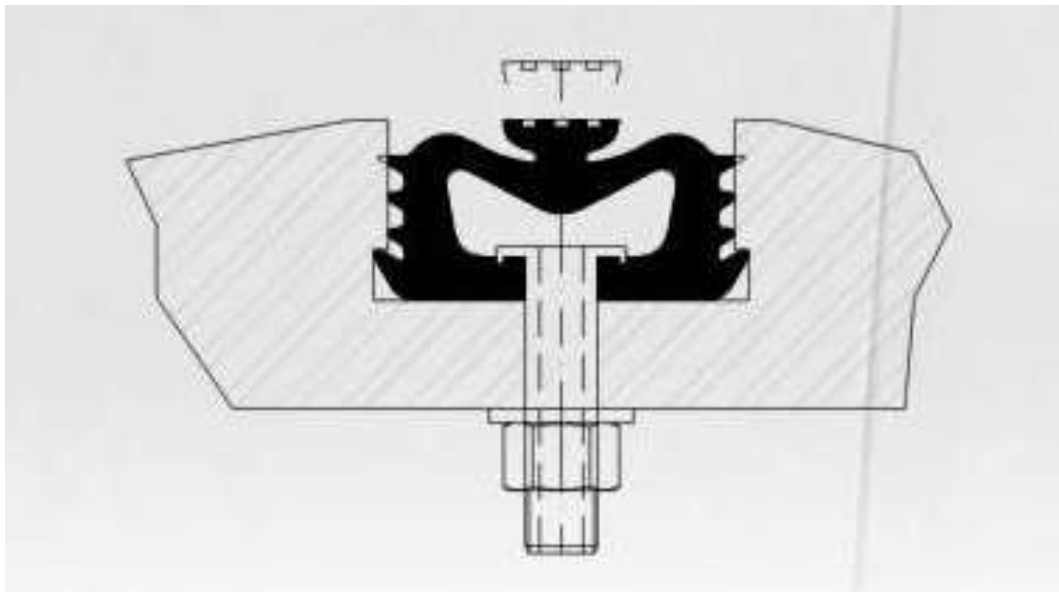


Abb. 3.21: Aktivierbare Elastomerdichtung (Quelle: [73] Theodor Cordes GmbH & Co. KG)

Die Schlauchdichtung der Zielbrille übernimmt nach Aufblasen lediglich die Toleranzen des Schildmantels.¹⁰² In Abb. 3.22 ist der Ausfahrvorgang eines Rohrvortriebs abgebildet. Dabei ist klar die Schlauchabdichtung in weiß zu erkennen, welche den Spalt zwischen der Zielbrille und dem Schildmantel abdichtet.

3.4.2 Dichtblock

Die Vorbereitungen für eine reibungslose Zieleinfahrt werden im Zuge des Vortriebs der TVM getroffen, sodass alle relevanten Vorkehrungen erbracht sind, wenn die Maschine ihr Ziel erreicht. Einen wesentlichen Vorbereitungsschritt stellt die Prüfung des, der Ausfahr-situation vorgelagerten, Dichtblocks auf Dichtigkeit dar. Dieser unterscheidet sich weder in der Herstellung, noch in seiner Funktion von jenem des Anfahrvorganges.¹⁰³ Um einen Grundwassereinbruch im Zuge des Einfahrens der SM in den Zielschacht zu verhindern, wird der Ringspalt bereits im Zuge der Einfahrt in den Dichtblock injiziert.¹⁰⁴

¹⁰²Vgl. [67] Schwarz et al.

¹⁰³Vgl. [67] Schwarz et al.

¹⁰⁴Vgl. [29] Girmscheid, S. 559



Abb. 3.22: Zielschachtabdichtung eines Rohrvortriebs mittels Schlauchabdichtung (Quelle: [8] BuM Beton- und Monierbau GmbH)

3.4.3 Ausfahrt in einen Dichttopf

Eine Ausfahrt in einen Dichttopf kann als Gegenstück zu dem Anfahrvorgang mittels Rücksteifkonstruktion gesehen werden. Dabei durchfährt die SM zunächst den Dichtblock. Kann die Schachtwand aufgrund der Verwendung von Stahlbewehrung nicht mit der TVM durchfahren werden, ist diese im Zuge der Vorbereitungsarbeiten abzubrechen. Dieser Arbeitsschritt kann bei Verwendung eines glasfaserbewehrten Betons, bei der Errichtung der Schachtwand, entfallen. Nach Durchdringung der Schachtwand fährt die SM in die zuvor errichtete Zielbrille ein. Um eine zusätzliche Sicherheit vor Wassereintritt in den Zielschacht zu gewährleisten, kann die Zielbrille mit einem Dichttopf abgedichtet sein. Ein solcher Dichttopf wird meist als stählerne Konstruktion ausgeführt, welcher die Zielbrille umschließt und die Tunnelquerschnittsfläche vollständig abdeckt. Das Innere des Dichttopfes wird nach der Montage, beispielsweise mit Kies, verfüllt. Der Dichttopf ermöglicht es die durchörterte Schachtwand auf Dichtheit zu überprüfen, ohne das Risiko, dass Undichtigkeiten direkt zu einem Wassereintritt in den Zielschacht führen würden. Er bietet demnach eine zusätzliche Sicherheit. Die Kräfte, welche bei der Einfahrt in den Dichttopf entstehen, müssen mit einer Rücksteifkonstruktion in den Untergrund abgeleitet werden. Dabei kann ein A-Bock zum Einsatz kommen. Alternativ ist auch eine Verspreizung gegen die gegenüberliegende Schachtwand möglich. In Abb. 3.23 ist der Dichttopf des City-Tunnel Leipzig dargestellt. Im linken Teil der Abbildung wird der Topf gerade geöffnet, nachdem die Dichtheit des Tunnels sichergestellt wurde. Der rechte Teil der Abbildung zeigt die TVM, wie sie aus dem Dichttopf auf eine Schildwiege gezogen wird. Die Länge des Dichttopfes und des Dichtblocks zusammen müssen der Länge des Schildes entsprechen. Dadurch kann die Dichtheit des Systems gewährleistet werden. Bevor die TVM in den Dichtkörper einfahren kann, muss der Dichttopf bereits montiert sein.¹⁰⁵

¹⁰⁵Vgl. [66] Schwarz und Mörchen, S. 6



Abb. 3.23: Dichttopf des City-Tunnel Leipzig (Quelle: [20] Erritt und [19] Erritt)

Muss die Schachtwand vor dem Durchfahren der TVM abgebrochen werden, dann bilden der Dichtblock und ein eventueller Zieltopf die wirksamen Dichtungsebenen. Kann die Schachtwand durchbohrt werden, so hat dies nach Möglichkeit zu erfolgen, um möglichst viele Dichtungsebenen zu erhalten. In solchen Fällen beinhaltet das System vorerst drei verschiedene wirkungsvolle Dichtsysteme, den Dichtblock, den Zieltopf und die Schachtwand. Bei Durchörterung der Schachtwand ist durch den Dichtblock und den Zieltopf ein redundantes Dichtungssystem sichergestellt. In der Zielbrille sind die Dichtungen angeordnet. Diese dichten sie gegen den Schildmantel ab und bilden eine bewegliche Dichtungsebene. Der Dichtblock verliert vorerst seine Wirkung, wenn die TVM ihn durchfahren hat. Erst durch die Verpressung des Ringspalt zwischen den Tübbing und dem Dichtblock entsteht ein wirksames Dichtungssystem. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass der Zieltopf und der Dichtblock so lange sind, dass der Ringspalt im Bereich des Dichtblockes in einer ausreichenden Länge verpresst werden kann. Ist die Wirkung dieser Dichtungsebene gegeben, kann der Zieltopf geöffnet werden, ohne einen Wassereintritt in den Zielschacht befürchten zu müssen. Der Ringspalt zwischen der Tübbingaußenschale und der Schachtwand wird verpresst und kontrolliert, wenn sich der Schildmantel der TVM im Inneren des Dichttopfes befindet, jedoch noch im Arbeitsbereich der Zieldichtung. Wird die Dichtigkeit im Zuge der Kontrolle bestätigt, kann die Maschine vollständig aus dem Dichttopf ausfahren. Der verpresste Ringspalt stellt ab diesem Zeitpunkt die einzige Dichtungsebene dar.¹⁰⁶

Abb. 3.24 zeigt schematisch den beschriebenen Ausfahrvorgang einer TVM in einen Dichttopf. Im Zuge der Einfahrt in den, meist stählernen, Dichttopf durchfährt die Maschine den Dichtblock. Die dabei auftretenden Kräfte werden über die Rücksteifkonstruktion in den Untergrund geleitet. Ist die TVM vollkommen in den Dichttopf eingefahren, wird die Dichtigkeit des Tunnels kontrolliert. Anschließend folgt der Abbau der Rücksteifkonstruktion. Abschließend wird die SM auf eine zuvor platzierte Schildwiege gezogen.

3.4.4 Ausfahrt in einen nachgelagerten Betontopf

Der Zielvorgang des City-Tunnel in Leipzig wurde analog zu dem Startvorgang geplant, da man die selben Herausforderungen zu bewältigen hatte. Es wurden mehrere Ausfahrten realisiert, wobei sowohl ein Dichttopf, als auch ein Betontopf zum Einsatz gekommen ist. Der eingesetzte Betontopf hatte eine Länge von etwa 13 m. Diese Länge ergab sich aus der Länge der SM und der Forderung eines redundanten Dichtungssystems. Um den Abbau der Schachtwand zu ermöglichen, wurde ebenfalls eine Abbaukammer in den Betontopf des Ausfahrvorganges integriert. Diese

¹⁰⁶Vgl. [67] Schwarz et al.

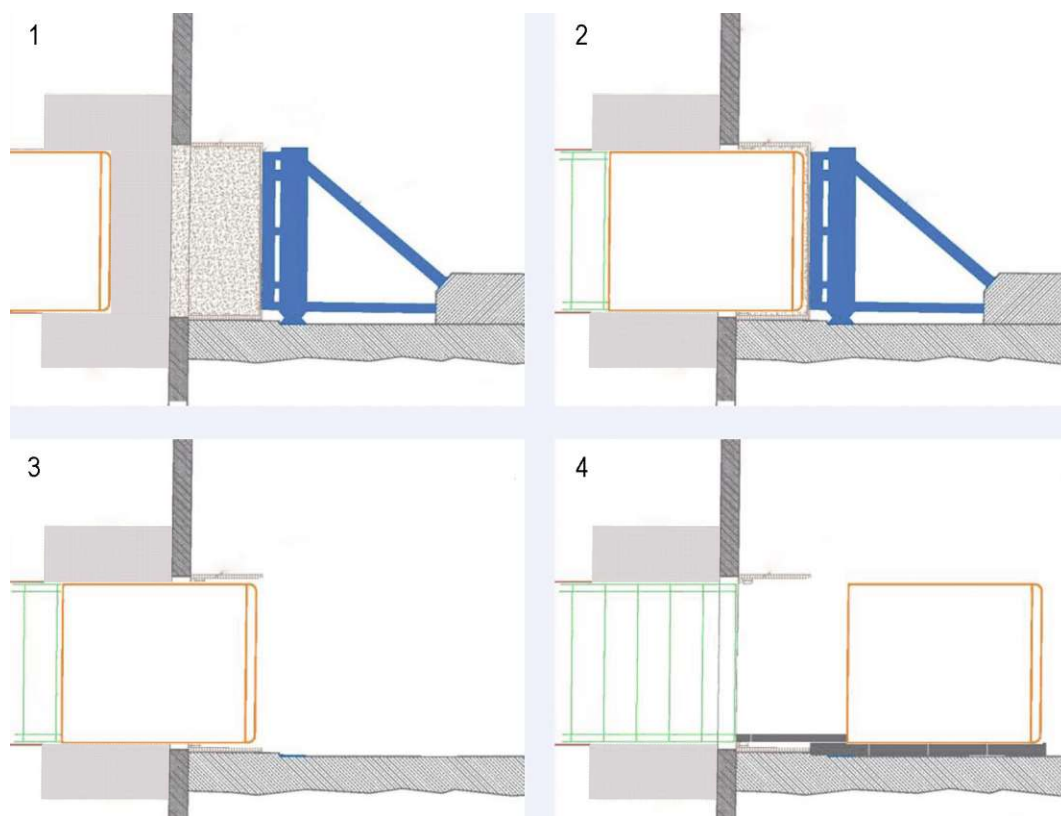


Abb. 3.24: Ablaufschema des Ausfahrvorganges mittels Dichttopf (Quelle: modifiziert nach [24] Eritt)

unterscheidet sich weder durch ihre Ausführung noch durch ihre Wirkungsweise von jener des Startvorganges. Da es sich bei dem Betontopf um einen Schweregewichtsblock handelt, muss eine ausreichende Standsicherheit nachgewiesen werden. Dazu wird sowohl ein Nachweis der inneren, als auch der äußeren Standsicherheit geführt. Der Nachweis der äußeren Standsicherheit beinhaltet eine Überprüfung der Gleitsicherheit und der Kippsicherheit. Der Nachweis der inneren Standsicherheit beinhaltet gängige Nachweise zur Begrenzung der Spannungen und Rissbreiten. Die Berechnungen sind auch für den Startvorgang durchzuführen. Im Zuge des Nachweises ist zwischen den folgenden Lastfällen zu unterscheiden:¹⁰⁷

- Druckluftbelastung
- Betonierdruck
- Stützdruck
- Eigengewicht der TVM
- Schneidradanpressdruck
- Ringbaukraft
- Reibung des Schildmantels

¹⁰⁷Vgl. [66] Schwarz und Mörchen, S. 7 ff.

Im Zuge des Nachweises ist zwischen dem Belastungszustand der Druckluftbeanspruchung und jenem der Einwirkungen aus Vortriebskräften zu unterscheiden. Durch die Einfahrt in den Betontopf entstehen eine Druck- und eine Zugkraftkomponente. Das Eigengewicht des Betons überdrückt die vertikal wirkende Zugkomponente, weshalb keine weiteren konstruktiven Maßnahmen erforderlich sind. Die horizontal gerichtete Druckkomponente wird über eine Schubverzahnung der Grundfläche in den Untergrund abgeleitet. Es ist jedoch darauf zu achten, dass kein Wasser durch den Spalt zwischen der Schachtwand und dem Betontopf in den Zielschacht eintritt. Dies kann mittels Verpressschläuchen oder Nachinjektionen erfolgen. Alternativ kann die Fuge mit Verpressankern überdrückt werden, wodurch diese abgedichtet wird. Die Bemessung der Dicke der Betontopfrückwand erfolgt unter Berücksichtigung sämtlicher Vortriebslasten. Erst nachdem die Dichtigkeit des Tunnels nachgewiesen wurde, kann die unbewehrte Betontopfrückwand mit der TVM durchfahren werden. Insbesondere die Schnittstelle des Tübbingrings mit der Schachtwand stellt eine kritische Stelle der Dichtigkeit dar. Der Betontopf ermöglicht ein redundantes Dichtungssystem. Darüber hinaus kann die stählerne Abstützkonstruktion, wie bei der Ausfahrt in einen Dichttopf, entfallen.¹⁰⁷

Der systematische Ablauf des Ausfahrvorganges des City-Tunnel Leipzig in einen Betontopf ist in Abb. 3.25 dargestellt. Die Errichtung des Betontopfes muss zeitlich lange genug vor dem eigentlichen Ausfahrvorgang erfolgen, damit der Beton seine benötigte Festigkeit entwickeln kann. Dem Ausfahrvorgang ist der Abbau der Schlitzwand, aus der Abbaukammer unter Druckluftbeaufschlagung heraus, vorgeschaltet. Dieser Arbeitsschritt kann durch die Verwendung von glasfaserbewehrtem Beton bei der Schachtwand entfallen. Der druckluftbeaufschlagte Arbeitsbereich wird anschließend wieder mit Magerbeton verfüllt. Die Einfahrt der TVM in den Betontopf erfolgt mit vollem Stützdruck, da dem Dichtblock keine Dichtwirkung zugeschrieben werden kann. Erst wenn das Schild von Beton umschlossen ist, kann der Stützdruck reduziert werden. Davor erfolgt der Einbau, die Verpressung und die Prüfung des Tübbingrings in der Schachtwand. Der Vortrieb durch die Betontopfrückwand erfolgt lediglich unter reduziertem Stützdruck. Dieser dient zu diesem Zeitpunkt einzig der Förderung des Ausbruchmaterials.¹⁰⁷

3.4.5 Schild Transfer System

Der Ausfahrvorgang des STS unterscheidet sich kaum von jenem des Anfahrvorganges. Allerdings wird auf den Druckring verzichtet und dieser durch einen Druckdeckel, ähnlich dem Dichttopf, ersetzt. Ein solcher Druckdeckel wurde in Amsterdam zweigeteilt ausgeführt und mittels Stahlträgern verstärkt. Um eine kraftschlüssige Verbindung des Druckdeckels mit der Rücksteifkonstruktion zu gewährleisten, sind hydraulische Pressen zwischen diesen Konstruktionselementen angeordnet.¹⁰⁸ Eine solche Zielkonstruktion ist in Abb. 3.26 dargestellt. Die linke Seite der Abbildung zeigt den geschlossenen Druckdeckel samt der Rücksteifkonstruktion. Im rechten Teil ist das Widerlager bereits zurückgebaut und das obere Element des Druckdeckels abmontiert.

3.4.6 Wassergefüllter Zielschacht

Die bisher beschriebenen Ausfahrvorgänge besitzen allesamt ein Pendant, welches den Startvorgang ermöglicht. Dies ist bei der nun folgenden Methode des wassergefüllten Zielschachtes nicht der Fall. Dieses Verfahren wird auch als Druckausgleichsmethode bezeichnet. Hier wird der im Vorhinein errichtete Zielschacht planmäßig geflutet. Dadurch erfolgt ein Ausgleich des hydraulischen Gradienten, zwischen dem GW außerhalb des Schachtes und dem Zielschacht. Dies ermöglicht die Einfahrt in den Schacht und verhindert GW- und Bodeneinbrüche. Eine erhöhte

¹⁰⁸Vgl. [28] Friedemann et al.

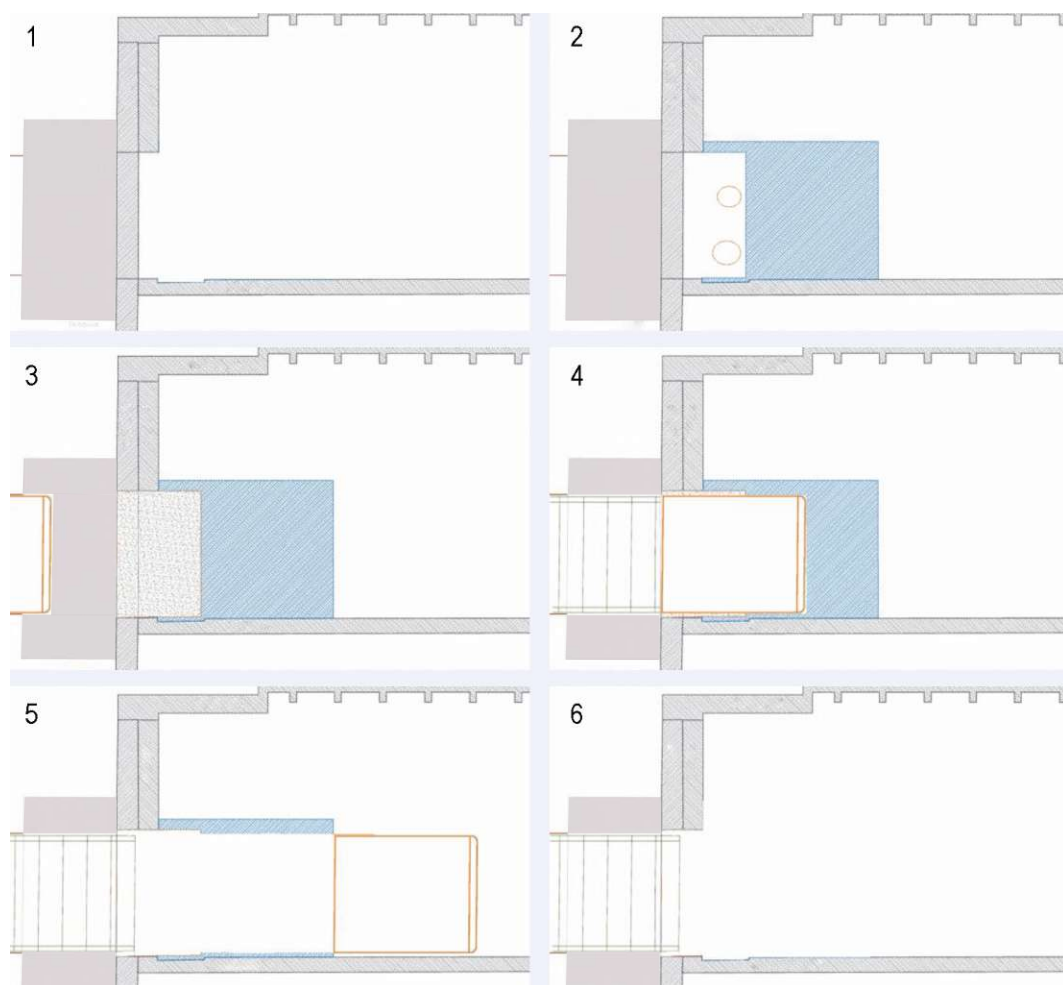


Abb. 3.25: Ablaufschema des Ausfahrvorganges mittels Betontopf (Quelle: modifiziert nach [25] Eritt)

Sicherheit gegen eintretendes Erdmaterial kann durch einen höheren Wasserstand in der Zielbaugrube, als der umgebende Grundwasserstand, erreicht werden. Dadurch entsteht ein hydraulischer Gradient, welcher vom Inneren der Baugrube nach außen gerichtet ist. Einem wassergefüllten Zielschacht ist meist ein Dichtblock vorgeschaltet.¹⁰⁹ In Abb. 3.27 ist ein gefluteter Zielschacht eines Kanalvortriebs zu sehen. Wie man an der überschnittenen Bohrpfahlwand sehen kann, wurde bereits mit dem Abpumpen des Wassers begonnen. Somit sind die Abdichtungsarbeiten an der Durchörterung der Schachtwand bereits abgeschlossen. Dies erfolgt durch einen Taucher, welcher die Dichtungsmanschetten an der vorgesehenen Stelle montiert.

Im Zuge der Durchfahrt der TVM durch die Schachtwand entsteht eine Undichtigkeit. Diese wird erst durch den Einbau des Tübbingrings und das Verpressen des Ringspaltes abgedichtet. Bei auftreten etwaiger Leckagen können zusätzliche abdichtende Injektionen angeordnet werden. Die Schildwiege kann, alternativ zu einer stählernen Konstruktion, aus einem Magerbetonblock ausgeführt werden. Dabei schneidet das Schneidrad in den Beton und erzeugt so das benötigte Auflager für die Demontage. Etwaige Toleranzen können durch das selbstständige Erzeugen der Schildwiege ausgeglichen werden. Der frontal auf die SM wirkende Wasserdruck erzeugt in Kombination mit dem abgebauten Material des Magerbetonblocks einen ausreichenden Widerstand

¹⁰⁹Vgl. [27] Flath



Abb. 3.26: Zielkonstruktion des STS (Quelle: [28] Friedemann et al.)



Abb. 3.27: Wassergefluteter Zielschacht (Quelle: [50] Oberhäuser)

an der Ortsbrust, um einen Einbau der Tunnelauskleidung zu ermöglichen. Dadurch werden die Dichtungsprofile der Tübbinge gegeneinandergedrückt und die Wasserdichtigkeit gewährleistet.¹⁰⁹

Der bedeutendste Vorteil dieses Verfahrens ist die verkürzte Bauzeit. Diese ist aufgrund der kontinuierlichen Einfahrt erreichbar. Außerdem können Auffahrtoleranzen berücksichtigt werden und es entfallen Arbeiten zum Ausräumen eines Dichttopfes unter Druckluftbeaufschlagung. Ein wesentlicher Nachteil ist die Flutung des Zielschachtes und den damit einhergehenden zusätzlichen Arbeiten. Eine solche erforderliche vorbereitende Aufgabe ist die Abschottung etwaiger Öffnungen im Zielschacht. Außerdem müssen sämtliche Arbeiten im Zuge der Wasserhaltung im Schacht unterbrochen werden. Im Anschluss an die Flutung des Zielschachtes ist eine umfangreiche

Reinigung erforderlich. Je größer der Durchmesser der TVM, desto größer die Gefahr von lokalen Undichtigkeiten, besonders im Sohlbereich.¹⁰⁹

Der Ablauf einer Ausfahrt in einen wassergefüllten Zielschacht ist in Abb. 3.28 dargestellt. Der Ausfahrvorgang beginnt mit der Errichtung des Dichtblockes und der Schildwiege. Kann die Schachtwand mit der TVM durchfahren werden, ist keine weitere Maßnahme zu setzen und die Baugrube kann geflutet werden. Ansonsten ist die Schachtwand im Bereich der Durchfahröffnung im Vorhinein aufzubrechen. Der Vortrieb der SM führt durch den Dichtblock in den Zielschacht. Durch den Einbau des letzten Tübbingringes und anschließender Verpressung des Ringspaltes ist die Dichtheit hergestellt. Im Anschluss daran kann der Schacht leer gepumpt werden und mit der Demontage oder des Transfers des Schildes begonnen werden. Abschließend besteht die Möglichkeit der Anbringung einer weiteren Dichtungsstruktur im Bereich der Schachtwandöffnung.¹⁰⁹

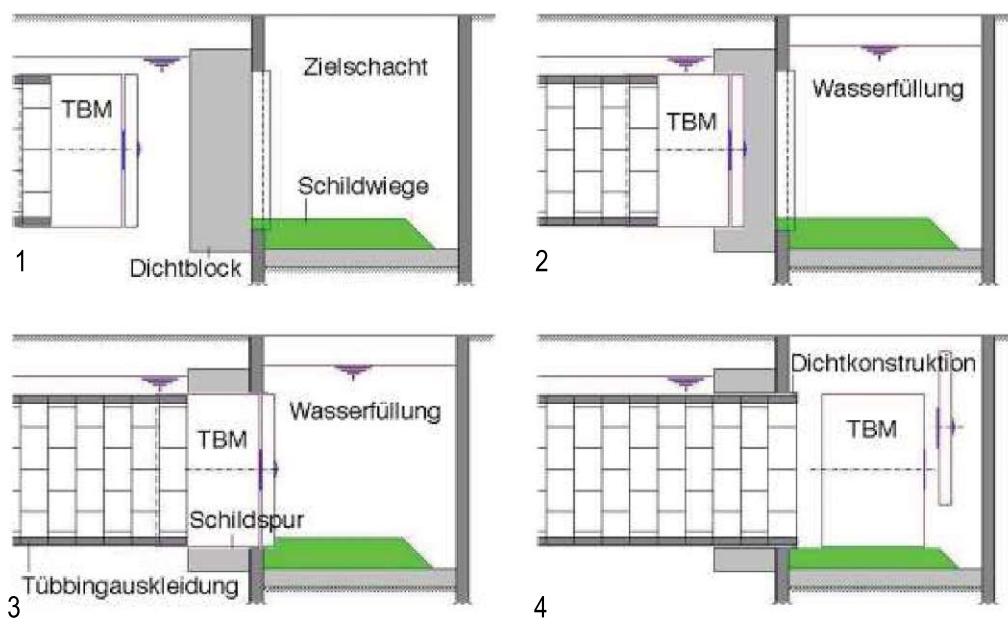


Abb. 3.28: Ablaufschema des Ausfahrvorganges in einen wassergefüllten Zielschacht (Quelle: modifiziert nach [27] Flath)

3.5 Zusammenfassung der Anfahr- und Ausfahrvorgänge

Zuletzt soll eine Zusammenfassung der vorgestellten Anfahr- und Ausfahrverfahren erfolgen. Dies ist in Tab. 3.2 ersichtlich. Dabei sind die Kapitel, in welchen die unterschiedlichen Anfahr- und Ausfahrverfahren näher beschrieben wurden, sowie die wesentlichen Konstruktionselemente angegeben. Darüber hinaus wird aufgezeigt, ob sich die Verfahren für einen Einsatz in drückendem GW eignen und welche zusätzlichen Konstruktionselemente dafür benötigt werden. Sämtliche aufgelistete Verfahren eignen sich für den Einsatz bei einem Tunnelportal oder in einem Schacht.

Die Tunnelanfahrt mittels einem verankerten Tübbingring eignet sich als einzig vorgestelltes Verfahren nicht für den Einsatz bei drückendem GW. Die Vorteile liegen in der geringen Anzahl an benötigter Konstruktionen und des minimalen Platzbedarfs. Eine Wiederverwendung der Konsolen bei einem folgenden Anfahrvorgang ist möglich. Die Anfahrt mittels A-Bock besteht durch die Flexibilität dieses Verfahrens. Es wird jedoch eine Vielzahl an Konstruktionen erforderlich, welche einen erheblichen Platzbedarf stellen. Aufgrund der hohen Kosten der Stahlkonstruktionen ist

	Kapitel	benötigte Konstruktions- elemente	GW geeignet	dafür zusätzliche Konstruktions- elemente
Anfahrvorgänge				
Verankerter Tübbingring	3.1.1	Schildwiege, Konsole, 1 Blindring	nein	
Rücksteifkonstruktion	3.1.2	Schildwiege, Rücksteifkonstruktion, Druckring, mehrere Blindringe, Stützkonstruktion der Blindringe	ja	Startbrille, Dichtblock
Fliegende Schildanfahrt	3.2.3	Schildwiege, Druckring samt Kolbenpressen, 1-2 Blindringe	ja	Startbrille, Dichtblock
Betontopf	3.2.4	Betontopf, Konsole oder Druckring, mehrere Blindringe	ja	-
Schild Transfer System	3.2.5	Schild Transfer System, Druckring oder Rücksteifkonstruktion, Blindringe	ja	-
Ausfahrvorgänge				
Ausfahrt auf Schildwiege	3.3 / 3.4.3	Schildwiege	ja	Dichtblock, Zielbrille, ev. Dichttopf mit Rücksteifkonstruktion
Ausfahrt in einen Betontopf	3.4.4	Betontopf	ja	-
Schild Transfer System	3.4.5	Schild Transfer System, Rücksteifkonstruktion	ja	Druckdeckel
Wassergefüllter Zielschacht	3.4.6	Schildwiege	ja	-

Tab. 3.2: Zusammenfassung der Anfahr- und Ausfahrverfahren

eine Wiederverwendung bei anderen Anfahrvorgängen empfehlenswert. Durch die Anordnung einer Startbrille und eines Dichtblockes wird ein Vortrieb unterhalb des Grundwasserspiegels ermöglicht. Der Dichtblock sollte nach Möglichkeit bei sämtlichen Verfahren mit drückendem GW angeordnet werden. Dieser stellt eine zusätzliche Dichtebene dar und bietet Sicherheit vor Wassereintritt in die Anfahrssituation. Außerdem kann durch die Anordnung eines Dichtblockes die Rücksteifkonstruktion und der Druckring in reduzierter Form ausgeführt werden, da mit einem verringerten Stützdruck angefahren wird und somit geringere Kräfte abzuleiten sind. Die Fliegende Schildanfahrt stellt ein patentiertes Verfahren dar und wird meist nur bei drückendem GW eingesetzt. Ein Einsatz außerhalb des Grundwassers ist jedoch möglich. Ein wesentlicher Vorteil liegt in der kontinuierlichen Anfahrt, welche mit vergleichsweise hoher Geschwindigkeit erfolgen kann. Die wesentlichen Konstruktionen dieses Verfahrens können bei einem erneuten Anfahrvorgang wiederverwendet werden. Die Anfahrt aus einem Betontopf ermöglicht eine sichere Tunnelanfahrt unterhalb des Grundwasserspiegels ohne einen vorgeschalteten Dichtblock. Dies ist insbesondere in städtischer Umgebung von großer Bedeutung, da sich zahlreiche Einbauten im Erdreich befinden und die Oberfläche stark bebaut ist. Dies würde die Herstellung eines

Dichtblocks maßgeblich erschweren. Aufgrund der großen Betonkubaturen eines Betontopfes ist dieser allerdings mit einem erheblichen Herstellungsaufwand verbunden. Eine Wiederverwendung des Betontopfes ist nicht möglich. Das vorgestellte Schild Transfer System ermöglicht neben der Anfahrt auch den Transfer einer TVM, beispielsweise durch eine Haltestelle. Dabei ist sogar die Überwindung vertikaler Stufen möglich. Die Anordnung eines Dichtblocks ist nicht zwingend erforderlich. Eine Herausforderung stellt jedoch der hohe Anspruch nach Passgenauigkeit der einzelnen Stahlsegmente dar, um diese miteinander verbinden zu können. Dieses Verfahren kann im Zuge eines Tunnelbauprojekts mehrmals eingesetzt werden.

Bei Tunnelvortrieben außerhalb des GW erfolgt meist eine Ausfahrt auf eine Schildwiege. Durch die Installation einer Zielbrille kann dieses Ausfahrverfahren auch bei vorherrschenden Wasserdrücken eingesetzt werden. Das zusätzliche Vorsehen eines Dichttopfes, samt einer Abstützkonstruktion, erhöht die Sicherheit dieses Verfahrens. Die benötigten Konstruktionselemente eignen sich großteils für eine Wiederverwendung. Lediglich der einbetonierte Teil der Zielbrille, welche aus zwei Teilen besteht, kann nicht wiederverwendet werden. Die Ausfahrt in einen Betontopf bietet die selben Vor- und Nachteile wie der Anfahrvorgang aus einem solchen. Das STS muss um einen zusätzlichen Druckdeckel samt Rücksteifkonstruktion ergänzt werden, um eine Ausfahrt bei drückendem GW zu ermöglichen. Dann kann dieses System jedoch mehrmals bei Anfahr- und Ausfahrverfahren wiederverwendet werden. Der Ausfahrvorgang in einen zuvor mit Wasser gefluteten Zielschacht stellt ein, mit geringem Aufwand realisierbares, Verfahren dar. Es ist jedoch dafür Sorge zu tragen, dass sämtliche Öffnungen des Zielschachts abgedichtet sind und sich nichts im Schacht befindet, dem ein Kontakt mit Wasser schadet. Nach der erfolgten Einfahrt in den Zielschacht, wird das Wasser abgepumpt. Eine Reinigung des Schachtes kann anschließend erforderlich sein.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kapitel 4

Verfahrensvergleich auf Basis baubetrieblicher Kriterien

In diesem Kapitel soll zunächst ein Vergleich der bereits vorgestellten Anfahr- und Ausfahrverfahren erfolgen. Dabei werden die Maschinentypen definiert, welche mit den einzelnen Verfahren kompatibel sind. Außerdem werden die Anfahr- und Ausfahrverfahren nach unterschiedlichen Gesichtspunkten qualitativ und quantitativ bewertet.

Im weiteren Verlauf werden anhand eines Beispielprojekts vier verschiedene Anfahrverfahren in Hinblick auf unterschiedliche Kennwerte miteinander verglichen. Dabei stehen die bedeutenden verfahrensspezifischen Baukosten, die Errichtungsdauer der wesentlichen Konstruktionen und die Dauer bis zum Beginn des Tunnelregelvortriebs im Fokus. Es folgt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse dieser Kalkulation, gefolgt von einer Diskussion der erlangten Erkenntnisse.

4.1 Detaillierter Vergleich der verschiedenen Anfahr- und Ausfahrverfahren

Im Folgenden werden die in *Kapitel 3 – Anfahr- und Ausfahrvorgänge von Schildmaschinen* vorgestellten Verfahren im Detail miteinander verglichen. Dabei wird aufgezeigt, mit welchen TVM die Vorgänge realisierbar sind. Die verschiedenen Varianten werden anhand der folgenden Gesichtspunkte bewertet:

- Gesteinsart
 - Lockergestein
 - Festgestein
- Toleranzen
- Platzbedarf
- Schachtgröße
- Risiko
- Bau- & Montagezeit
- Herstellungskosten

Dabei soll die Gesteinsart abbilden, wie gut sich die Verfahren bei Locker- oder Festgestein eignen. Unter dem Punkt der Toleranzen, werden die tolerierbaren Abweichungen der Planlage der einzelnen Verfahren bewertet. Der Platzbedarf bezieht sich auf jene Kubatur, welche die einzelnen Verfahren samt benötigter Konstruktionen einnehmen. Die Schachtgröße bewertet die benötigte

Größe des Schachtes, um die Anfahr- und Ausfahrverfahren in einem solchen zu ermöglichen. Das Risiko deckt im Zuge des bewertenden Vergleiches die zu akzeptierenden Risiken ab, welche bei den Verfahren nicht ausgeschlossen werden können. Die Bau- & Montagezeit berücksichtigt sämtliche Vorgänge, welche verfahrensspezifisch bis zur eigentlichen An- bzw. Ausfahrt zu erledigen sind. Die Herstellungskosten werden inklusive der benötigten Konstruktionen bewertet. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass sich einige Verfahren zur mehrmaligen Anwendung eignen. Dadurch können hohe Investitionskosten, je nach weiterem Projektverlauf, im Vergleich zu anderen Verfahren ausgeglichen werden. Die Bewertung erfolgt mit +, ~ und -. Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Verfahren zu gewährleisten, wird im Zuge des Vergleiches nach dem Vorkommen von GW unterschieden.

4.1.1 Verfahrensvergleich außerhalb des GW

Der bewertete Vergleich der verschiedenen Anfahr- und Ausfahrverfahren außerhalb drückenden GW ist in Tab. 4.1 dargestellt. Üblicherweise kommt bei Tunnelbauprojekten außerhalb des Grundwassers eine TBM-S oder TBM-DS zum Einsatz. Allerdings ist es auch möglich einen Tunnel ohne herrschende Wasserdrücke mit einem EPB aufzufahren. Dafür erfolgt der Vortrieb im offenen Betriebsmodus (*Open Mode*). Dies ermöglicht beispielsweise die Anfahrt oder Ausfahrt eines Tunnels, welcher erst im Verlauf der Tunneltrasse auf drückendes GW trifft. Ein Vortrieb mittels SLS oder HYS ist hingegen nicht möglich, da diesen Maschinenvarianten der Gegendruck des GW fehlt.

	Maschinenvariante					Gesteinsart		Toleranzen	Platzbedarf	Schachtgröße	Risiko	Bau- & Montagezeit	Herstellungskosten
	TBM-S	TBM-DS	SLS	EPB (Open Mode)	HYS	Lockergestein	Festgestein						
Anfahrvorgänge													
verankerter Tübbingring	✓	✓	x	✓	x	~	+	+	+	~	+	~	~
Rücksteifkonstruktion	✓	✓	x	✓	x	~	+	+	-	+	+	+	+
Fliegende Schildanfahrt	✓	✓	x	✓	x	~	+	+	-	-	+	-	-
Betontopf	✓	✓	x	✓	x	~	+	+	-	-	+	-	-
Schild Transfer System	✓	✓	x	✓	x	~	+	+	-	-	+	-	-
Ausfahrvorgänge													
Ausfahrt auf Schildwiege	✓	✓	x	✓	x	~	+	+	+	+	+	+	+
Ausfahrt in einen Betontopf	✓	✓	x	✓	x	~	+	~	-	-	+	-	-
Schild Transfer System	✓	✓	x	✓	x	~	+	~	-	-	+	-	-

Tab. 4.1: Detaillierter Vergleich der Anfahr- und Ausfahrverfahren außerhalb des GW

Außerhalb des Grundwassers sind die Anfahr- und Ausfahrvorgänge in Lockergestein kaum relevant. Sie sind technisch realisierbar, kommen in der Praxis jedoch bei solchen Bedingungen kaum zum Einsatz. Alle betrachteten Anfahr- und Ausfahrvorgänge sind für den Vortrieb im Festgestein gut geeignet. Die Anfahrvorgänge außerhalb des drückenden GW stellen, verfahrensunabhängig, keine besonderen Anforderungen in Hinsicht der einzuhaltenden Toleranzen. Bei der Ausfahrt auf eine zuvor positionierte Schildwiege können verhältnismäßig große Positionsabweichungen toleriert werden. Bei der Ausfahrt in einen Betontopf und in ein STS ist eine zielgenaue Maschinenposition erforderlich. Eine Anfahrt mittels verankertem Tübbingring besteht durch

den geringen Platzbedarf der benötigten Konstruktion. Im Gegensatz dazu erfordern die anderen Anfahrverfahren der Tab. 4.1 deutlich mehr Platz im Anfahrbereich. Die Ausfahrt auf eine Schildwiege benötigt am wenigsten Platz im Ausfahrbereich, wohingegen die Ausfahrt in einen Betontopf und in ein STS einen größeren Platzbedarf hat. Zwar kann der eigentliche Startschacht bei einer Anfahrt mit verankertem Tübbingring klein ausgeführt werden, jedoch wird ein zyklisch aufgefahrener Startschacht benötigt, welcher die Schachtgröße erhöht. Eine Anfahrt mittels Rücksteifkonstruktion ermöglicht einen kleinstmöglichen Startschacht. Wird für die Tunnelanfahrt eine Fliegende Schildanfahrt, eine Ausfahrt in einen Betontopf oder ein STS gewählt, muss der Startschacht größer ausgeführt werden, als bei der Anfahrt mittels A-Bock. Der kleinstmögliche Zielschacht kann bei einer Ausfahrt auf eine Schildwiege realisiert werden. Durch den Einsatz eines Betontopfs oder eines STS muss der Zielschacht größer ausgeführt werden. Aufgrund des fehlenden Wasserdrucks besteht bei sämtlichen Anfahr- und Ausfahrverfahren ein lediglich geringes Risiko. Die Bau- und Montagezeit der Anfahrt mit verankertem Tübbingring dauert länger als bei Verwendung eines A-Bocks, da der Startschacht zyklisch aufgefahren werden muss. Die Baumaßnahmen der Fliegenden Schildanfahrt, der Anfahrt aus einem Betontopf oder einem STS benötigen am längsten. Ebenso verhält es sich bei den beiden letztgenannten Ausfahrvorgängen. Die Ausfahrt auf eine Schildwiege benötigt die kürzeste Bau- und Montagezeit. Kostentechnisch stellt eine Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion die beste Lösung dar. Kommt ein verankerter Tübbingring zum Einsatz, so ist ein Startschacht zyklisch herzustellen. Zwar muss diese Strecke bei anderen Anfahrverfahren ebenfalls im Laufe des Tunnelvortriebs aufgefahren werden, jedoch erfolgt dies sonst mit der TVM. Das zyklische Auffahren der Startstrecke schlägt dabei finanziell ungünstiger zu Buche. Eine Fliegende Schildanfahrt, eine Anfahrt aus einem Betontopf oder einem STS stellen einen hohen finanziellen Aufwand dar. Die Ausfahrt auf eine Schildwiege ist aus kostentechnischer Hinsicht die optimale Lösung. Durch die benötigte Konstruktion sind die Ausfahrt in einen Betontopf und in ein STS die weitaus teurere Variante.

Zusammenfassend kann die Anfahrt mittels Rücksteifkonstruktion sowohl aus kostentechnischer Sicht, als auch in Hinblick auf die Bauzeit als optimaler Anfahrvorgang gesehen werden. Die Konstruktionselemente dieses Verfahrens können bei mehreren Anfahrvorgängen zum Einsatz kommen. Die Anfahrt mit verankertem Tübbingring stellt aufgrund des benötigten Startschachtes eine teurere und zeitaufwendigere Variante dar, jedoch erfordert sie den geringsten Platzbedarf. Auch die Wahl dieses Verfahrens ist bei den gegebenen Bedingungen legitim. Die übrigen Anfahrverfahren stellen bei Tunnelprojekten ohne drückendem GW eine sehr teure und zeitaufwendige Lösung dar, weshalb diese in der Praxis nicht bei solchen Bedingungen zum Einsatz kommen.

Ähnlich stellt sich der Sachverhalt bei den Ausfahrvorgängen dar. Die Ausfahrt auf eine Schildwiege ist bei sämtlichen betrachteten Gesichtspunkten die optimale Lösung und kann mehrfach wiederverwendet werden. Daher wird in der Praxis bei Tunnelvortrieben ohne vorherrschende Wasserdrücke primär dieses Verfahren ausgeführt. Die Ausfahrt in einen Betontopf oder ein STS stellen zwar technisch eine mögliche Lösung dar, jedoch kommen diese außerhalb des GW nicht zum Einsatz.

4.1.2 Verfahrensvergleich innerhalb des GW

Die verschiedenen Anfahr- und Ausfahrvorgänge bei drückendem GW sind in Tab. 4.2 zusammengefasst und anhand der definierten Gesichtspunkte bewertet. Durch vorherrschende Wasserdrücke stellen lediglich das SLS, EPB und HYS eine Möglichkeit zum Auffahren des Tunnels dar. Diese Maschinenvarianten sind mit sämtlichen Anfahr- und Ausfahrverfahren kompatibel. Besonders gut eignen sich die verschiedenen Verfahren bei dem Einsatz in Lockergestein. Eine Verwendung bei Festgestein ist theoretisch möglich, wobei dafür allerdings der Materialabtransport mittels Schnecke erfolgen muss. Dies trifft auf ein EPB zu. Für die Verwendung eines SLS oder HYS müsste

das abgebrochene Material zu stark zerkleinert werden, um in den Förderkreislauf aufgenommen zu werden. Etwaige größere Gesteinsstücke könnten zu Beschädigungen der Fördereinrichtung führen.

	Maschinenvariante			Gesteinsart		Toleranzen	Platzbedarf	Schachtgröße	Risiko	Bau- & Montagezeit	Herstellungskosten
	SLS	EPB	HYS	Lockergestein	Festgestein						
Anfahrvorgänge											
Rücksteifkonstruktion	✓	✓	✓	+	~	~	-	~	~	+	+
Fliegende Schildanfahrt	✓	✓	✓	+	~	~	+	+	~	+	+
Betontopf	✓	✓	✓	+	~	+	-	-	+	-	-
Schild Transfer System	✓	✓	✓	+	~	~	~	~	+	~	~
Ausfahrvorgänge											
Ausfahrt in einen Dichttopf	✓	✓	✓	+	~	~	~	+	~	+	+
Ausfahrt in einen Betontopf	✓	✓	✓	+	~	+	-	-	+	-	-
Schild Transfer System	✓	✓	✓	+	~	~	~	~	+	~	~
wassergefüllter Zielschacht	✓	✓	✓	+	~	+	-	+	+	+	+

Tab. 4.2: Detaillierter Vergleich der Anfahr- und Ausfahrverfahren bei drückendem GW

Die Anforderung an die einzuhaltenen Toleranzen stellt sich bei Anfahr- und Ausfahrvorgängen bei drückendem GW als wesentlich herausfordernder dar, als bei jenen ohne vorherrschende Grundwasserdrücke. Dies liegt vor allem an der Start- bzw. Zielbrille. Die Anfahrt aus einem Betontopf ist weniger kritisch als bei anderen Verfahren, da dabei keine Startbrille mit entsprechender Dichtung zum Einsatz kommt. Dies setzt sich auch bei den Ausfahrvorgängen fort. Jene Methoden ohne Zielbrille erlauben größere Toleranzen als bei Verwendung einer solchen. Dies betrifft die Ausfahrt in einen Betontopf und in einen wassergefüllten Zielschacht. Die Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion hat erheblichen Platzbedarf. Bei der Fliegenden Schildanfahrt entfallen einige benötigte Konstruktionen, weshalb der beanspruchte Platz im Vergleich deutlich geringer ausfällt. Eine Anfahrt aus einem Betontopf benötigt ebenfalls große Teile des Anfahrbereiches. Dieser Platzanspruch fällt bei einem STS wiederum etwas geringer aus. Die Ausfahrt in einen Dichttopf und jener in ein STS beanspruchen den wenigsten Platz des Zielbereichs. Ein Betontopf benötigt hingegen eine vergleichsweise große Kubatur. Da bei der Ausfahrt in einen wassergefüllten Zielschacht der gesamte Schacht mit Wasser gefüllt ist und somit für keinerlei Arbeiten genutzt werden kann, stellt diese Variante hinsichtlich der Platzbeanspruchung den schlechtesten Fall dar. Der Startschacht kann bei einer Fliegenden Schildanfahrt am kleinsten ausgeführt werden. Eine Anfahrt mit A-Bock oder STS benötigt einen verhältnismäßig kleineren Schacht als eine Anfahrt aus einem Betontopf. Die Ausfahrt in einen Betontopf erfordert die größte Schachtgröße. Einen etwas geringeren Anspruch an die Größe des Zielschachtes stellt das STS. Bei der Ausfahrt in einen Dichttopf oder in einen wassergefüllten Zielschacht kann die Schachtgröße auf ein Minimum reduziert werden. Durch vorhandene Wasserdrücke besteht von Haus aus ein höheres Risiko als bei Tunnelvortrieben, bei denen nicht mit einem Wassereinbruch gerechnet werden muss. Das größte Risiko liegt dabei bei den verwendeten Dichtungen, welche in der Start- und Zielbrille angeordnet sind. Demnach besteht bei jenen Anfahr- und Ausfahrvorgängen mit einer solchen Dichtungsbrille ein höheres Risiko, als bei jenen Verfahren ohne. Die Bauzeit einer Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion und einer Fliegenden Schildanfahrt dauert verhältnismäßig

kurz. Der Startvorgang aus einem STS nimmt etwas mehr Zeit in Anspruch. Die Anfahrt aus einem Betontopf benötigt die längste Bau- und Montagezeit der Anfahrvorgänge bei drückendem GW. Die vorbereitenden Arbeiten für eine Ausfahrt in einen Dichttopf und einen wassergefüllten Zielschacht nehmen die geringste Zeitdauer der Ausfahrverfahren in Anspruch. Kommt ein STS zum Einsatz verlängert sich diese Bauzeit. Der verhältnismäßig längsten Bau- und Montagezeit bedarf die Ausfahrt in einen Betontopf. Aus kostentechnischer Sicht stellt eine Anfahrt mittels Rücksteifkonstruktion oder eine Fliegende Schildanfahrt das Optimum dar. Die Herstellungskosten des STS gestalten sich als vergleichsweise teurer. Die Kosten einer Anfahrt aus einem Betontopf sind am höchsten. Dabei sind die Aufwendungen für die längere Errichtungsdauer und die daraus resultierende verzögerte Anfahrt berücksichtigt. Die Ausfahrten in einen Dichttopf oder einen wassergefüllten Zielschacht stellen die günstigsten Ausfahrmöglichkeiten dar. Die Kosten nehmen bei dem Einsatz eines STS zu. Ihr Maximum erreichen die Kosten bei der Ausfahrt in einen Betontopf, unter Berücksichtigung der selben Aspekte wie bei dem entsprechenden Anfahrverfahren.

Abschließend kann festgehalten werden, dass eine Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion oder der patentierten Fliegenden Schildanfahrt die, in Hinblick auf die Bauzeit und die Herstellungskosten, optimale Lösung darstellt. Die Konstruktionselemente können mehrfach zur Anwendung kommen, wodurch sich der Kostenanteil an den einzelnen Anfahrvorgängen reduziert. Sind projektspezifische Einschränkungen gegeben, wodurch diese Verfahren nicht eingesetzt werden können, ist eine Anfahrt aus einem Betontopf oder STS ebenfalls legitim. Da der Betontopf bei der Anfahrt zerstört wird und für einen Transport zu schwer ist, kann dieses Verfahren nicht mehrfach verwendet werden. Das STS wird erst durch mehrmalige Anwendung aus kostentechnischer Sicht rentabel.

Die am universellsten einzusetzenden Ausfahrverfahren stellen die Ausfahrt in einen Dichttopf und jene in einen wassergefüllten Zielschacht dar. Die Konstruktionselemente des Dichttopfes können mehrfach verwendet werden. Die Ausfahrt in einen Betontopf oder ein STS sind teurer und benötigen eine längere Errichtungsdauer. Sind zahlreiche An- und Ausfahrsequenzen im Laufe der Tunneltrasse erforderlich, wird das STS jedoch rentabel.

4.2 Auswahl eines Anfahrvorgangs anhand eines Beispielprojekts

In diesem Abschnitt werden mehrere Anfahrvorgänge anhand eines Beispielprojekts kalkuliert. Zunächst sollen die Rahmenbedingungen des Projekts aufgezeigt werden. Daran anschließend wird auf die im Zuge der Kalkulation getroffenen Annahmen eingegangen. Es folgt die Berechnung der ausgewählten Anfahrverfahren. Dabei werden folgende Verfahren betrachtet:

- Anfahrvorgang aus einem Betontopf
- Anfahrvorgang mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille
- Anfahrvorgang mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und vertikalem Dichtblock
- Anfahrvorgang mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und horizontalem Dichtblock

Beim Dichtblock wird dabei laut Herstellverfahren mittels DSV unterschieden, ob die Lanze horizontal oder vertikal eingebracht wird. Die Variante mit vertikal errichtetem Dichtblock stellt aufgrund der Baustellengegebenheiten keine realistische Option dar. Die Kalkulation wurde dennoch durchgeführt, um einen besseren Vergleich der Verfahren zu ermöglichen. Im Zuge der Berechnung wird der benötigte Zeitaufwand abgeschätzt, welcher für die Errichtung und den Abbau, der während des Verfahrens erforderlichen Konstruktionselemente, benötigt wird. Des

Weiteren werden die Kosten, die im Zuge der Anfahrvorgänge anfallen, berechnet. Mittels eines Bauzeitplanes soll aufgezeigt werden, wie viel Zeit zwischen dem Start des Schachtaushubs und dem Erreichen des Regelvortriebs der TVM benötigt wird. Die Ergebnisse dieser Kalkulation werden folgend zusammengefasst und gegenübergestellt. Abschließend folgt eine Diskussion der Kalkulationsergebnisse, was für eine bessere Einordnung sorgen soll.

4.2.1 Allgemeine Projektrandbedingungen

Bei dem Beispielprojekt handelt es sich um ein Tunnelbauprojekt, welches aus einem Schacht aufgeföhren werden soll. Der Vortrieb erfolgt in sandigem Boden ohne nennenswerte Dichtebenen. Die Schachtwand wird aus überschrittenen Bohrpöhlen hergestellt. Der Tunnelvortrieb erfolgt mit einem EPB. Die Tunneltrasse befindet sich 35 m unter der Geländeoberkante (GOK). Da der Vortrieb unterhalb des, sich etwa auf GOK befindlichen, GW-Spiegels erfolgt, herrscht ein Wasserdruck von 3,5 bar auf Höhe der Baugrubensohle. Der Schacht hat eine Länge von 90 m, auf eine Breite von 30 m. Die Tiefe betröhgt 35 m, wobei für das Fundament des Schachtes etwa ein weiterer Meter ausgehoben wird. Das zum Einsatz kommende EPB weist einen Durchmesser von 10,4 m auf. Dieser setzt sich aus dem Durchmesser der Tübblingaußenkante von 10 m und einem Ansatz für den Ringspalt und Toleranzen von 0,4 m zusammen. Die Projektrandbedingungen sind in Tab. 4.3 zusammengefasst.

Projektrandbedingungen	
Untergrund	sandiger Boden
Dichtebenen im Untergrund	kaum vorhanden
Anfahrtsituation	Schachtanfahrt
Umgebung	Gasleitung in 3 m Abstand, daran anschließend 4-spurige Straße neben der Baugrube
Tunnelvortriebsmaschine	Erddruckschild [EPB]
Schachtwand	überschnittene Bohrpöhlfahlwand
Abmessungen des Schachtes	
Breite	30 m
Länge	90 m
Aushubtiefe	35 m
Wasserdruck	3,5 bar
Maschinendurchmesser	10,4 m
Durchmesser Tübblingringaußenkante	10 m
Ringspalt + Toleranzen	0,4 m

Tab. 4.3: Projektrandbedingungen des Beispielprojekts

Einschränkend für die Wahl des Anfahrvorganges kommt hinzu, dass sich in einem Abstand von 3 m zur Bohrpöhlfahlwand eine Gasleitung im Untergrund befindet. Anschließend ist eine vierspurige Straße situiert. Durch das Vorhandensein dieser Elemente ist die Ausführung eines vertikal hergestellten Dichtblockes keine Option. Dieser müsste eine Länge von etwa 14 m aufweisen, was aufgrund der Platzverhältnisse nicht möglich ist. Eine Verschiebung oder Verkleinerung der Baugrube stellt keine Option dar, da es sich um eine zukünftige Haltestelle handelt, welche in ihrer Position und ihren Abmessungen fixiert ist. Im Zuge der Kalkulation wird die Anfahrt mit vertikal ausgeführtem Dichtblock dennoch berechnet. Dies soll eine bessere Einordnung

der verschiedenen Verfahren ermöglichen und einen Vergleich zwischen vertikal und horizontal ausgeführtem Dichtblock erlauben.

4.2.2 Getroffene Kalkulationsannahmen

Eine Zusammenstellung der, im Folgenden festgelegten, Aufwandswerte und Kosten findet sich in Tab. 4.4 wieder. Im Zuge der Kostenkalkulation ist der Mittellohnpreis mit 56 €/Std. festgelegt. Für die Bauausführung wird ein Bohrgerät zum Versetzen der Verpressanker, ein Gerät zur Herstellung von DSV-Säulen, ein Abrissbagger bei der Anfahrt aus einem Betontopf (zum Abriss des Betontopfes) und ein Kran zum Absenken in den Schacht benötigt. Die Kosten des Kranes sind mit 20.000 €/Monat veranschlagt. Dieser Wert ist bereits auf den Durchlaufbetrieb ausgelegt. Die Aufwendungen für den Abrissbagger, das DSV-Gerät und das Bohrgerät werden mit 15.000 €/Monat kalkuliert. Dies ist jedoch auf eine 40-Stunden-Woche ausgelegt, weshalb dieser Wert auf den Durchlaufbetrieb umgelegt werden muss. Für eingebauten Beton sind 100 €/m³ veranschlagt. Sämtliche benötigte Stahlkonstruktionen werden in einem Werk gefertigt und schlagen mit kalkulierten Kosten von 3,5 €/kg zu Buche. Für Bewehrungsstahl ist ein Gegenwert je Kilogramm von 1,25 € angenommen. Die Herstellung eines Verpressankers verursacht kalkulierte Kosten von 3.000 €/Stk. Nach der erfolgreichen Anfahrt des EPB kann die Konstruktion des jeweiligen Anfahrvorganges rückgebaut werden. Für das dadurch gewonnene Alteisen wird ein Verkaufspreis von 200 €/t veranschlagt. Die Herstellungskosten des vertikal hergestellten Dichtblocks sind mit 720 €/m³ kalkuliert. Wird der Dichtblock horizontal hergestellt, ist der selbe Betrag angenommen, da sich die Materialkosten nicht voneinander unterscheiden. Der wesentliche Unterschied dieser zwei Herstellungsvarianten liegt in dem unterschiedlichen Bauablauf und der damit verbundenen Differenz der Herstellungsdauer. Die Dichtung der Startbrille unterscheidet sich, je nachdem ob ein Dichtblock vorangestellt ist oder nicht. Ist ein solcher nicht vorgesehen, so werden an die Dichtung höhere Anforderungen gestellt. Dies ist mit Kosten von 100.000 € angenommen. Wird der Anfahrwand ein Dichtblock vorgeschaltet, so kann die Startdichtung reduziert ausgeführt werden. Dafür ist ein Aufwand von 50.000 € veranschlagt.

Im Zuge der Kalkulation wird ein Wert für die Dauer, welche durch Verwendung der jeweiligen Anfahrverfahren anfällt, veranschlagt. Die Festlegung der Aufwandskalkulationsansätze erfolgte anhand von Erfahrungswerten und mittels [47] Kropik, S. 742 ff.. Dabei wird der Aufwandswert zur Herstellung einer Schalung mit 0,4 Std./m² veranschlagt. Für Bewehrungsarbeiten ist ein Wert von 0,024 Std./kg kalkuliert. Die Betonierarbeiten sind mit einem Aufwandswert von 0,3 Std./m³ angesetzt. Das Gerüst wird im Beispielprojekt in einer kalkulierten Geschwindigkeit von 0,1 Std./m² errichtet. Für die Versetzung, Montage und Demontage der Stahlbauelemente werden 3 Std./t veranschlagt. Dem ist die Fertigung im Werk vorgeschaltet. Die Herstellung eines Verpressankers wird mit einer Dauer von 12 Std./Stk. angenommen. Der Abbruch eines Betontopfes ist mit 0,09 Std./m³ kalkuliert. Der Aufwandswert zur Herstellung eines vertikal errichteten Dichtblocks wird mit 10 min/m angenommen, woraus sich bei einem Säulendurchmesser von 2 m ein Zeitaufwand von 0,053 Std./m³ errechnet. Da der vertikal errichtete Dichtblock jedoch nicht direkt unterhalb der GOK anfängt, muss die Bohrzeit berücksichtigt werden, um die geforderte Tiefe zu erreichen. Diese ist mit 2,5 m/min festgelegt, was einem Zeitaufwand von 0,007 Std./m entspricht. Der Herstellungsaufwand eines horizontal errichteten Dichtblocks wird mit 12 min/m veranschlagt. Dies entspricht, wiederum bei einem Säulendurchmesser von etwa 2 m, einem Zeitaufwand von 0,064 Std./m³. Da sich der Dichtblock jedoch in direktem Anschluss an die Schachtwand befindet, ist dabei keine Bohrzeit ohne DSV-Herstellung zu berücksichtigen. Im Zuge der Erstellung des Bauzeitplans ist des Weiteren der Aufwandswert des Schachtaushubs von Interesse, für welchen 0,007 Std./t veranschlagt sind. Neben diesen Kosten- und Aufwandswertannahmen wird in einem Durchlaufbetrieb gearbeitet, was 727,4 Std./Monat

Kalkulationsannahmen	
Kosten	
Stundenlohn	56 €/Std.
Bohr- & DSV-Gerät	je 15.000 €/Mo
Abrissbagger	15.000 €/Mo
Kran	20.000 €/Mo
Beton (eingebaut)	100 €/m ³
Stahlkonstruktion	3,5 €/kg
Bewehrungsstahl	1,25 €/kg
Verpressanker	3.000 €/Stk.
Alteisen	-200 €/t
Dichtblock	
vertikal	720 €/m ³
horizontal	720 €/m ³
Startdichtungen ohne Dichtblock	100.000 €
Startdichtungen mit Dichtblock	50.000 €
Zeitaufwand	
Schalen	0,4 Std./m ²
Bewehren	0,024 Std./kg
Betonieren	0,3 Std./m ³
Gerüst	0,1 Std./m ²
Stahlbaumontage	3 Std./t
Verpressanker	12 Std./Stk.
Betonabbruch	0,09 Std./m ³
Dichtblock	
vertikal	0,053 Std./m ³
Bohrzeit ohne DSV	0,007 Std./m
horizontal	0,064 Std./m ³
Schachtaushub (in 2 m Abschnitten)	0,007 Std./t
Sonstiges	
Monatliche Arbeitszeit	727,4 Std./Mo
Monatliche Sekundärarbeitszeit	173,2 Std./Mo
Bewehrungsgrad Beton	150 kg/m ³
Anfahrgeschwindigkeit des EPB	
Anfahrt aus einem Betontopf	20 mm/Min
Anfahrt mit A-Bock, Startbrille & Dichtblock	10 mm/Min
Anfahrt mit A-Bock & Startbrille	5 mm/Min

Tab. 4.4: Kalkulationsannahmen (Basierend auf: [47] Kropik, S. 742 ff. und [71] Strabag AG)

entspricht. Um die Kostenumrechnung der Baugeräte von einer 40-Stunden-Woche auf den Durchlaufbetrieb zu ermöglichen, wird diese mit 173,2 Std./Monat als Sekundärarbeitszeit definiert. Der Bewehrungsgrad der Stahlbetonelemente ist mit einem Wert von 150 kg/m³ angenommen. Die Ausfahrgeschwindigkeit der TVM aus dem Startschacht unterscheidet sich je nach betrachtetem Verfahren, bis der Regelvortrieb erreicht wird. Als Annahme wird festgelegt, dass der Regelvortrieb beginnt, sobald das Schild des EPB den Startschacht verlassen hat. Die Ausfahrt der Vortriebsmaschine aus einem Betontopf erfolgt mit einer kalkulierten Geschwindigkeit von 20 mm/min. Fährt die Maschine in einen vorgelagerten Dichtblock aus, so erfolgt dies mit einer

reduziert veranschlagten Geschwindigkeit von 10 mm/min. Am langsamsten erfolgt die Ausfahrt des EPB aus dem Startschacht bei der Anfahrt mit A-Bock und Startbrille. Dies erfolgt mit angenommenen 5 mm/min.

In Tab. 4.5 sind die wesentlichen Konstruktionselemente der einzelnen Verfahren zusammengestellt. Um eine Anfahrt aus einem Betontopf zu ermöglichen, sind ein solcher Betonkubus, ein Druckring, ein stählerner Innenzylinder und Verpressanker erforderlich. Der Betontopf weist eine Länge von 14 m auf, was gewährleistet, dass das EPB hineingeschoben werden kann und noch genügend Material durchfahren wird, um den benötigten Stützdruck aufzubauen. Die Breite und Höhe der Betonkubatur beträgt 11,4 m. Dadurch kann gewährleistet werden, dass die zylindrische Aussparung für das EPB auf jeder Seite von zumindest 0,5 m Stahlbeton überdeckt ist. Es ergibt sich ein Stahlbetonvolumen von etwa 630 m³. Im Zuge der Herstellung ist eine Schalungsfläche von knapp 360 m² zu berücksichtigen. Da in der Ansichtsfläche der zylindrischen Aussparung ein Gerüst erforderlich ist, übersteigt die Gerüstfläche die Schalungsfläche und ergibt sich zu etwa 450 m². Anhand der Betonkubatur und des Bewehrungsgrades kann die benötigte Bewehrung von knapp 95.000 kg errechnet werden. Der eingesetzte Druckring weist eine Masse von 25 t auf. Um die Vorschubkräfte von dem Druckring ableiten zu können, ist dieser mit 72 Stk. Verpressankern im Erdreich hinter der Schachtwand verankert. Diese sind gleichmäßig um den Druckring verteilt. Durch die Anordnung des Stahlinnenzylinders wird gewährleistet, dass die Aussparung für das EPB im Zuge der Betonage nicht verfüllt wird, wodurch auf eine extra anzuordnende Schalung verzichtet werden kann. Es ist jedoch auf eine innere Aussteifung im Zuge des Betonierens zu achten. Der Stahlinnenzylinder wird mit einer Stärke von 10 mm ausgeführt. Dadurch ergibt sich, bei einer Dichte von 7.850 kg/m³, die Masse des Stahlzylinders von etwa 18 t.

Der Anfahrvorgang mit A-Bock und einer Startbrille erfordert nebst diesen Konstruktionen auch einen Druckring, Verpressanker, eine Schildwiege und eine Stützkonstruktion der zu errichtenden Blindringe. Diese Konstruktionen sind ebenfalls in Tab. 4.5 ersichtlich. Der A-Bock wird aus knapp 200 t Stahl gebildet und mittels 24 Verpressankern mit dem Untergrund kraftschlüssig verbunden. Der Kraftschluss der Vortriebspresen erfolgt durch den Druckring, welcher etwa 10 t wiegt. Um das EPB vor ungewollten Bewegungen zu sichern, wird diese auf der Schildwiege abgelegt, welche etwa 130 t wiegt. Die Stützkonstruktion der Blindringe wird aus ungefähr 20 t Stahl errichtet. Die Anfahrtbrille ist zweigeteilt. Ein Element, welches etwa 10 t wiegt, ist in der Brillenwand einzubetonieren. Jenes Element, welches an diesem festgeschraubt wird und in welchem die Dichtung fixiert ist, wiegt knapp 30 t. Die Brillenwand selbst ist wie der Betontopf mit einer Breite und Höhe von 11,4 m auszuführen. Die Länge beträgt allerdings lediglich 0,4 m. Bei einem Durchmesser der Aussparung von 10,4 m ergibt sich das benötigte Betonvolumen zu etwa 20 m³. Unter Berücksichtigung des Bewehrungsgrads ergibt sich daraus die erforderliche Bewehrung zu ungefähr 2.700 kg. Die Schalungsfläche beläuft sich auf knapp 70 m² und es werden 140 m² Gerüstfläche benötigt.

Wird im Zuge des obig beschriebenen Anfahrvorganges zusätzlich ein Dichtblock angeordnet, so kann neben der Dichtung selbst auch der A-Bock in reduzierter Stärke ausgeführt werden. Dieser wird im Beispielprojekt mit 120 t errichtet. Die Verpressanker, der Druckring, die Schildwiege, die Stützkonstruktion der Blindringe, die Brillenwand und die Startbrille, ohne ihrer Dichtung, werden jedoch unverändert ausgeführt. Der Dichtblock wird mit einer Länge von 14 m, einer Breite von 14 m und einer Höhe von ebenfalls 14 m errichtet. Dadurch ergibt sich, unabhängig ob dieser vertikal oder horizontal ausgeführt wird, ein Volumen von etwa 2.700 m³. Dies ist ebenfalls in Tab. 4.5 zusammengefasst. Der Dichtblock wird aus überschrittenen DSV-Pfählen gebildet. Diese einzelnen Säulen weisen einen Durchmesser von jeweils 2 m auf. Insgesamt werden 64 Stk. dieser Säulen hergestellt, was bei den festgelegten Abmessungen des Dichtblocks insgesamt etwa 900 m Säulenlänge entspricht. Die Bohrungen des vertikalen Dichtblocks, um die geforderte Tiefe zu erreichen, machen insgesamt rund 1.280 m aus.

Verfahren und Konstruktionselemente	
Anfahrvorgang aus einem Betontopf	
Betontopf	630 m ³
Länge	14 m
Breite	11,4 m
Höhe	11,4 m
Durchmesser der Aussparung	10,4 m
Druckring	25 t
Stahlinnenzylinder	18 t
Verpressanker	72 Stk.
Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille	
A-Bock	200 t
Druckring	10 t
Verpressanker	24 Stk.
Schildwiege	130 t
Stützkonstruktion der Blindringe	20 t
Anfahrbrille	
Teil der Brillenwand	10 t
Dichtungsträger	30 t
Anfahrvorgang mit A-Bock, Startbrille und Dichtblock	
A-Bock	120 t
Druckring	10 t
Verpressanker	24 Stk.
Schildwiege	130 t
Stützkonstruktion der Blindringe	20 t
Anfahrbrille	
Teil der Brillenwand	10 t
Dichtungsträger	30 t
Dichtblock	
Länge	14 m
Breite	14 m
Höhe	14 m
vertikal	2.700 m ³
Bohrung ohne DSV	1.280 m
horizontal	2.700 m ³

Tab. 4.5: Wesentliche Konstruktionselemente der Verfahren (Basierend auf: [71] Strabag AG)

4.2.3 Kalkulation Anfahrvorgang aus einem Betontopf

Tab. 4.6 zeigt eine Zusammenstellung der zur Kalkulation des Anfahrvorganges aus einem Betontopf herangezogenen Daten und die benötigten Massen. Dabei sind im oberen Abschnitt nochmals die in *Kapitel 4.2.2 – Getroffene Kalkulationsannahmen*, definierten Konstruktionselemente, samt der zugehörigen Massenermittlung, zusammengefasst. Im Zuge der Berechnung des Zeitaufwandes des Verfahrens werden lediglich jene Vorgänge berücksichtigt, welche bei anderen Anfahrverfahren nicht in dem selben Ausmaß anfallen. Dabei sind in der ersten Spalte die jeweiligen Vorgänge aufgelistet. Daran angrenzend sind die bereits erwähnten zugehörigen Aufwandswerte des vorherigen Unterkapitels angeführt. Unter Berücksichtigung dieser Werte und der zugehörigen Mengen und Massen, kann der Stundenaufwand der dritten Spalte berechnet werden. Aufsummiert ergibt dies den Gesamtstundenaufwand. Dieser bildet die Grundlage der, im Zuge der Kostenkalkulation, berechneten Kosten der Arbeitszeit. In der vorletzten Spalte der Zeitaufwandskalkulation wird die eingesetzte Partiestärke berücksichtigt. Die letzte Tabellenspalte besagt, wie lange die einzelnen Vorgänge dauern, wenn sie in der definierten Partiestärke ausgeführt werden. Aus der daraus summierten Personenstundenanzahl kann unter Berücksichtigung der monatlichen Arbeitszeit die Gesamtbauzeit berechnet werden. Dies ist im untersten Teil der Tab. 4.6 ersichtlich. Die Bauzeit des Anfahrvorganges aus einem Betontopf ergibt sich zu etwa 51 Tagen im Durchlaufbetrieb.

In Anschluss an die Kalkulation des Zeitaufwandes kann der Tab. 4.6 die Kostenkalkulation entnommen werden. In der ersten Spalte sind die wesentlichen Kostenträger aufgelistet. Daran angrenzend sind die, bereits im vorherigen Unterkapitel, definierten Kostenkennwerte dieser Kostenträger aufgelistet. Aus diesen Kennwerten errechnen sich nun die Kosten, welche in der dritten Spalte aufgelistet sind. Die größten Kostenträger sind bei diesem Verfahren die Arbeitszeit, die Verpressanker und die Bewehrung des Betontopfes. In Summe fallen für die Anfahrt aus einem Betontopf Kosten in Höhe von etwa 793.000 € an.

Neben dem benötigten Zeitaufwand, den das Verfahren verursacht und den entstandenen Kosten, stellt die Dauer vom Beginn der Schachtherstellung bis zum Erreichen des Regelvortriebs des EPB einen entscheidenden Kennwert dar. Da Tunnelbauprojekte einen großen finanziellen Aufwand darstellen, ist darauf zu achten, dass der Vortrieb so schnell wie möglich erfolgt. Der Bauablauf des Anfahrvorganges aus einem Betontopf ist im Bauzeitplan in Abb. 4.1 dargestellt. Als Beginn der Schachtherstellung wird Montag der 02.01.2023 gewählt. Im Falle der Anfahrt aus einem Betontopf kann der Schacht nicht in einem Zuge erstellt werden. Da der Druckring mit Verpressankern im Erdreich hinter der Schachtwand verspannt ist, müssen diese Bohrungen bereits im Zuge des Schachtaushubs erfolgen. In den später erstellten Betontopf werden Hüllrohre eingelegt, durch welche die Anker versetzt werden. Der Großteil der Ankerversetzarbeiten entfällt auf die Bohrarbeiten im Zuge des Aushubs. Dabei ist veranschlagt, dass dies mit einem Anteil von 10 Std./Stk. zu Buche fällt. Der Aushub des Schachtes erfolgt in 2 m Abschnitten. Ab dem Zeitpunkt, ab dem eine Tiefe von 25 m erreicht ist, wird mit dem Versetzen der Anker begonnen. Von da an werden nach jeder Aushubsschicht die benötigten Bohrungen für die Anker gesetzt, bis die Endtiefe erreicht ist. Diese Einzelvorgänge sind in Abb. 4.1 aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt, sondern zum Sammelvorgang der Schachtherstellung zusammengefasst. Im Anschluss an den Schachtaushub wird eine Sauberkeitsschicht erstellt. Dies erfolgt mithilfe der getroffenen Kalkulationsannahmen des vorherigen Unterkapitels. Dafür ergibt sich ein Zeitbedarf von 16 Stunden. Daran anschließend kann mit der Bewehrung des Sohlenfundaments begonnen werden. Dafür ist eine Dauer von 1.944 Stunden kalkuliert. Für die Betonierarbeiten des Fundaments wird ein Aufwand von 162 Stunden ermittelt. Die Einzelvorgänge der Herstellung der Schachtsohle sind wiederum zusammengefasst. Die Dauer der Sauberkeitsschicht- und Schachtsohlenherstellung sind verfahrensunabhängig und werden stets mit der gleichen Dauer angenommen.

Anfahrvorgang aus einem Betontopf				
Konstruktionselemente				
Betonblock				630 m ³
Stahlinnenzylinder				18 t
Druckring				25 t
Verpressanker				72 Stk.
Mengenermittlung				
Schalungsfläche				360 m ²
Gerüstfläche				450 m ²
Betonkubatur				630 m ³
Bewehrungsstahl				95.000 kg
Zeitaufwand				
Schalung	0,4 Std./m ²	144 Std.	5 Arbeiter	29 Std.
Gerüst	0,1 Std./m ²	45 Std.	5 Arbeiter	9 Std.
Betonieren	0,3 Std./m ²	189 Std.	5 Arbeiter	38 Std.
Bewehren	0,024 Std./kg	2.280 Std.	10 Arbeiter	228 Std.
Montage des Stahlinnenrings	3 Std./Stk.	54 Std.	5 Arbeiter	11 Std.
Montage des Druckrings	3 Std./Stk.	75 Std.	5 Arbeiter	15 Std.
Versetzen der Verpressanker	12 Std./Stk.	864 Std.	1 Maschine	864 Std.
Abriss	0,09 Std./m ³	57 Std.	2 Maschine	28 Std.
	Gesamtstundenaufwand	3.708 Std.	Personenstunden	1.222 Std.
Kosten				
Beton		100 €/m ³	€	63.000
Bewehrung		1,25 €/kg	€	119.000
Stahlinnenzylinder		3,50 €/kg	€	63.000
Alteisen		-200 €/t	-€	28.000
Druckring		3,5 €/kg	€	88.000
Verpressanker		3.000 €/Stk.	€	216.000
Kran		20.000 €/Mo	€	34.000
Bohrgerät		15.000 €/Mo	€	25.000
Abrissbagger		15.000 €/Mo	€	5.000
Arbeitszeit		56 €/Std.	€	208.000
		Gesamtkosten	€	793.000
Bauzeit				
	Monatliche Arbeitszeit	727,4 Std./Mo	Personenstunden	1.222 Std.
			Gesamtbauzeit	51 Tage

Tab. 4.6: Kalkulation des Anfahrvorganges aus einem Betontopf mittels der Annahmen aus Tab. 4.4 und Tab. 4.5

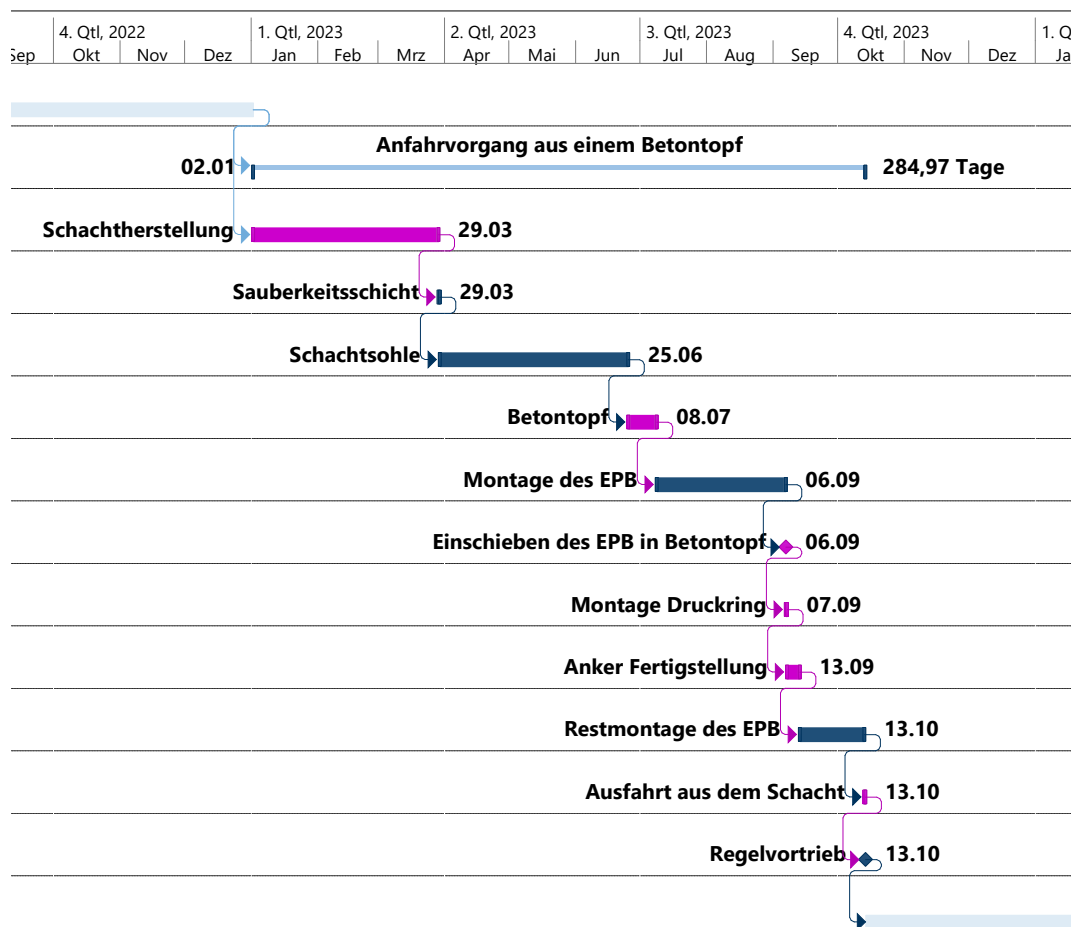


Abb. 4.1: Bauzeitplan der Anfahrt aus einem Betontopf (Verfahrensspezifische Vorgänge sind hervorgehoben)

Jedoch unterscheidet sich das berechnete Fertigstellungsdatum, welches sich in Abb. 4.1 rechts neben den Vorgängen befindet.

Im Anschluss an die Betonierarbeiten der Schachtsohle kann mit den Arbeiten des Betontopfes begonnen werden. Dieser wird in drei Phasen errichtet, um den Stahlzylinder versetzen zu können. Der Vorgang ist in Abb. 4.1 wiederum aus Gründen der Übersicht zusammengefasst. Zunächst erfolgt die Errichtung des Gerüsts. Anschließend folgen die Schalungsarbeiten. Im Anschluss an die Bewehrungsarbeiten kann mit dem Betonieren des ersten Abschnittes begonnen werden. Die Betonierarbeiten sind in mehrere Abschnitte unterteilt, um eine Verformung des Stahlzylinders, aufgrund des hohen Betondruckes, zu verhindern. Nach der Fertigstellung des ersten Betonierabschnittes wird der Stahlzylinder versetzt und es folgt der zweite Abschnitt. Dieser beinhaltet die identen Abläufe. Dabei ist jedoch auf die ausreichende Aussteifung des stählernen Zylinders zu achten, um Verformungen zu verhindern. Der dritte und letzte Betonierabschnitt erfolgt wiederum wie die zwei Vorangegangenen. Im Anschluss an die Errichtung des Betontopfes kann mit der Montage des EPB begonnen werden. Dafür ist verfahrensunabhängig eine Dauer von 3 Monaten angenommen. Im Falle der Anfahrt aus einem Betontopf wird diese Montage jedoch in zwei Abschnitte gegliedert. Dies ist erforderlich, da der Druckring bei einer fertig errichteten TVM nicht montiert werden kann. Für die erste Phase der Montage wird ein Zeitraum von 2 Monaten angesetzt. Danach wird diese in den Betontopf eingeschoben.

Anschließend erfolgt die Montage des Druckrings, samt der Fertigstellung der Verpressanker. Die finalen Montagearbeiten des EPB nehmen rund ein Monat in Anspruch. Nach Fertigstellung der TVM kann die Anfahrt erfolgen. Bis die Vortriebsmaschine den Startschacht verlassen hat und der Regelvortrieb beginnt, ist die Vortriebsgeschwindigkeit jedoch reduziert. Diese Sequenz beansprucht bei der Ausfahrt aus einem Betontopf etwa 12 Stunden. Der Anfahrtvorgang aus einem Betontopf benötigt eine Dauer von etwa 285 Tagen nach dem Beginn der Schachtherstellung, bis das EPB den Regelvortrieb erreicht.

Nachdem die TVM aus dem Startschacht ausgefahren ist, kann der errichtete Betontopf abgerissen und die Anfahrtssituation rückgebaut werden. Dies erfolgt unabhängig von dem Tunnelvortrieb. Von den benötigten Konstruktionen kann der Druckring problemlos bei einem weiteren Anfahrtvorgang wiederverwendet werden. Der Stahlzylinder kann, bei vorsichtigem Abbruch des ihn umgebenden Betons, ebenfalls wiederverwendet werden. Jedoch ist darauf zu achten, dass dieser keine Verformungen aufweist, was in der Praxis eine große Herausforderung darstellt.

4.2.4 Kalkulation Anfahrtvorgang mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille

Die wesentlichen Schritte der Kalkulation des Anfahrtvorganges mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille sind in Tab. 4.7 zusammengefasst. Dabei sind im oberen Bereich der Tabelle die wesentlichen eingesetzten Konstruktionselemente und die Mengenermittlung zur Herstellung der Anfahrtwand aufgelistet. Die Kalkulation erfolgt unter den gleichen Gesichtspunkten, welche bei dem Anfahrtvorgang aus einem Betontopf zum Einsatz gekommen sind. Anhand der Kalkulation des Zeitaufwandes kann jene Zeit ermittelt werden, welche in direkten Zusammenhang mit Arbeiten des gewählten Anfahrtverfahrens stehen. Als Ergebnis der Kalkulation der Bauzeit des Anfahrtverfahrens mit A-Bock und Startbrille kann eine benötigte Gesamtbauzeit von etwa 33 Tagen ermittelt werden. Dies ist im untersten Abschnitt der Tab. 4.7 ersichtlich.

Die Kostenkalkulation ist in der unteren Hälfte der Tab. 4.7 zusammengefasst. Die Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille verursacht Kosten in Höhe von etwa 1.700.000 €. Dabei entfällt der Großteil auf die benötigten Stahlkonstruktionen, sowie auf die Dichtung. Die Arbeitszeit hat ebenfalls einen großen Anteil an den Gesamtkosten.

Der Bauzeitplan der Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille ist in Abb. 4.2 dargestellt. Der Beginn der Schachtaushubarbeiten ist dabei wieder mit Montag dem 02.01.2023 festgelegt. Im Gegensatz zur Anfahrt aus einem Betonblock kann der Schacht ohne Unterbrechung durch andere Arbeiten ausgehoben werden. Dafür errechnet sich eine Dauer von 1.350 Stunden. Im Anschluss an den Aushub findet die Betonierung der Sauberkeitsschicht statt. Danach kann gewohnt die Schachtohle bewehrt und folgend betoniert werden. Diese Vorgänge entsprechen in der Ausführung jenen der Anfahrt aus einem Betontopf. Im nächsten Bauschritt wird die Anfahrtwand errichtet. Dies ist in Abb. 4.2 als Sammelvorgang zusammengefasst. Diesem ist jedoch die Errichtung eines Gerüsts, die Herstellung einer Schalung, das Einbringen der Bewehrung und das Betonieren zugeordnet. Bevor jedoch mit der Betonage begonnen wird, muss jener Teil der Anfahrtbrille montiert werden, welcher in der Anfahrtwand einzubetonieren ist. Die Anfahrtwand kann in einem Zuge betoniert werden. Für die Errichtung der Anfahrtwand sind 23 Stunden kalkuliert. Im Anschluss daran erfolgt die Montage der restlichen Startbrille, wofür ein weiterer Tag kalkuliert ist. Nachdem diese fertiggestellt ist, kann mit der 78-stündigen Montage der Schildwiege begonnen werden. Nach deren Fertigstellung wird mit der Montage des EPB auf dieser begonnen. Dies ist mit 3 Monaten veranschlagt. Die Montage der Rücksteifkonstruktion dauert 120 Stunden. Für das anschließende Versetzen der Verpressanker sind 288 Stunden veranschlagt. Das fertig errichtete EPB wird danach in die Startbrille eingeschoben. An dem hinteren Ende der Vortriebsmaschine wird der Druckring am A-Bock befestigt. Um die Herstellung der Blindringe im Zuge des Vortriebs zu ermöglichen, muss die Stützkonstruktion

Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille				
Konstruktionselemente				
A-Bock				200 t
Druckring				10 t
Stützkonstruktion der Blindringe				20 t
Startbrille				40 t
Schildwiege				130 t
Verpressanker				24 Stk.
Mengenermittlung				
Schalungsfläche				70 m ²
Gerüstfläche				140 m ²
Betonkubatur				20 m ³
Bewehrungsstahl				2.700 kg
Zeitaufwand				
A-Bock	3 Std./t	600 Std.	5 Arbeiter	120 Std.
Druckring	3 Std./t	30 Std.	5 Arbeiter	6 Std.
Stützkonstruktion	3 Std./t	60 Std.	5 Arbeiter	12 Std.
Startbrille	3 Std./t	120 Std.	5 Arbeiter	24 Std.
Schalung	0,4 Std./m ²	28 Std.	5 Arbeiter	6 Std.
Gerüst	0,1 Std./m ²	14 Std.	5 Arbeiter	3 Std.
Betonieren	0,3 Std./m ²	6 Std.	5 Arbeiter	1 Std.
Bewehren	0,024 Std./kg	65 Std.	5 Arbeiter	13 Std.
Schildwiege	3 Std./t	390 Std.	5 Arbeiter	78 Std.
Verpressanker	12 Std./Stk.	288 Std.	1 Maschine	288 Std.
Demontage	3 Std./t	1.200 Std.	5 Arbeiter	240 Std.
	Gesamtstundenaufwand	2.801 Std.	Personenstunden	791 Std.
Kosten				
A-Bock			3,5 €/kg	€ 700.000
Druckring			3,5 €/kg	€ 35.000
Stützkonstruktion			3,5 €/kg	€ 70.000
Startbrille			3,5 €/kg	€ 140.000
Beton			100 €/m ³	€ 2.000
Bewehrung			1,25 €/kg	€ 3.000
Dichtung				€ 100.000
Schildwiege			3,5 €/kg	€ 455.000
Alteisen			-200 €/t	€- 81.000
Verpressanker			3.000 €/Stk.	€ 72.000
Kran			20.000 €/Mo	€ 22.000
Bohrgerät			15.000 €/Mo	€ 25.000
Arbeitszeit			56 €/Std.	€ 157.000
			Gesamtkosten	€ 1.700.000
Bauzeit				
	Monatliche Arbeitszeit	727,4 Std./Mo	Personenstunden	791 Std.
			Gesamtbauzeit	33 Tage

Tab. 4.7: Kalkulation des Anfahrvorganges mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille mittels der Annahmen aus Tab. 4.4 und Tab. 4.5

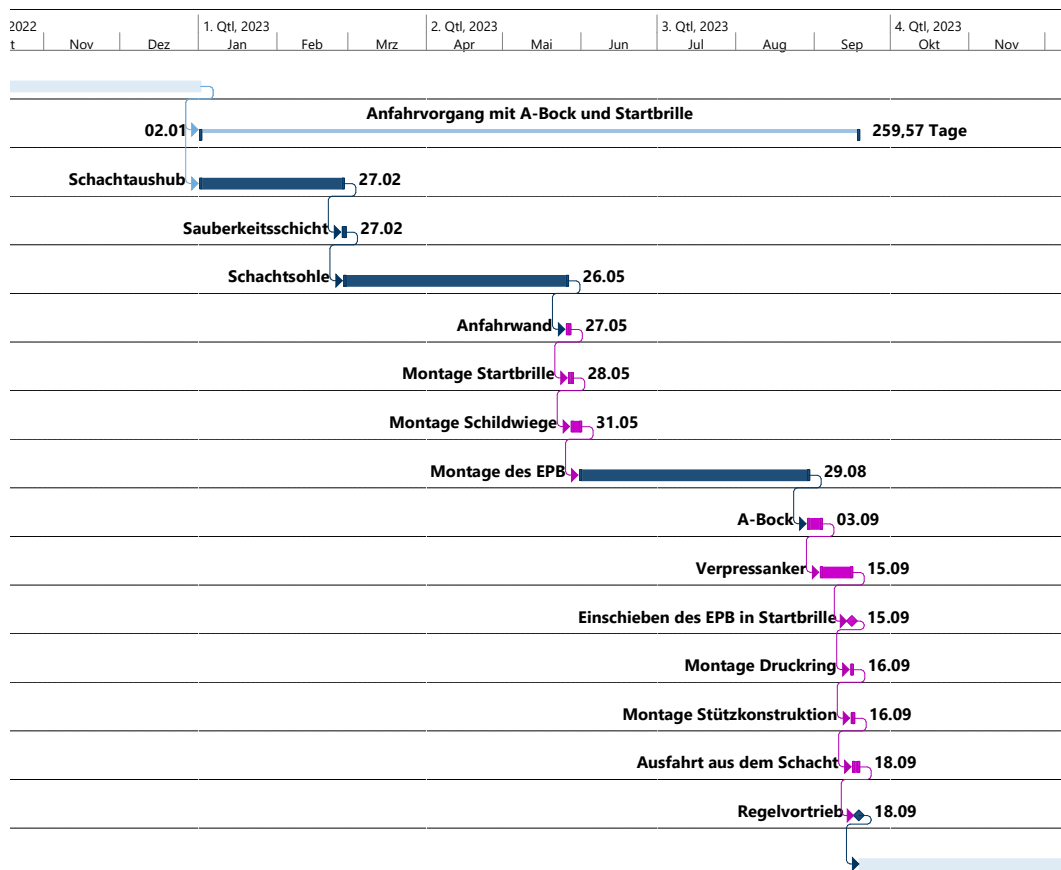


Abb. 4.2: Bauzeitplan der Anfahrt mit Rückstifkonstruktion und Startbrille (Verfahrensspezifische Vorgänge sind hervorgehoben)

hergestellt werden. Dies dauert 12 Stunden. Bevor mit dem Regelvortrieb begonnen wird, muss das EPB aus der Startbrille ausfahren. Dies dauert etwa 47 Stunden. Anschließend an diesen Vorgang kann mit dem Regelvortrieb des Tunnels begonnen werden. Erfolgt der Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille, vergehen etwa 260 Tage zwischen dem Beginn der Schachtherstellung bis zum Erreichen des Regelvortriebs.

Bevor mit dem Vortrieb begonnen wird, muss die Abbaukammer des EPB künstlich gefüllt werden. Dadurch wird der benötigte Stützdruck aufgebaut. Dies kann beispielsweise durch das Befüllen mit Kies oder Bentonit erfolgen. Diese Maßnahme ist notwendig, da die Maschine direkt nach der Durchörterung der Schachtwand auf drückendes GW stößt, was nur mit einem ausreichenden Stützdruck bewältigbar ist. Bei Anfahrvorgängen mit vorgelagertem Dichtblock ist dies nicht erforderlich, da die Maschine den nötigen Stützdruck bei der Durchfahrt durch den Dichtblock aufbaut. Da im Dichtblock kein oder lediglich ein sehr geringer Wasserdruck herrscht, ist bei der Durchfahrt durch diesen noch kein Stützdruck in der Abbaukammer erforderlich. Bei der Anfahrt aus einem Betontopf ist dies ebenfalls nicht nötig. Hierbei wird der Stützdruck im Zuge der Durchfahrt durch den letzten Abschnitt des Betontopfes aufgebaut.

Die errichteten Konstruktionen des Anfahrvorganges mit Rückstifkonstruktion und Startbrille können, nachdem das EPB samt Nachläufer den Startschacht verlassen hat, rückgebaut werden. Diese Rückbaumaßnahmen beeinträchtigen den eigentlichen Tunnelvortrieb jedoch zu diesem Zeitpunkt nicht mehr. Daher sind sie in Abb. 4.2 nicht ersichtlich. Die eingesetzte Stahlkonstruktion kann bei einem weiteren Anfahrvorgang, des selben EPB, wiederverwendet werden. Jener

Teil der Startbrille, welcher in die Anfahrwand einbetoniert ist, eignet sich nicht zur Wiederverwendung. Außerdem sollte die Dichtung erneuert werden, da die Lippendichtung bei der Anfahrt beschädigt worden sein könnte und der BULLFLEX® nach seiner erstmaligen Füllung nicht wiederverwendbar ist. Die Verpressanker verlieren nach erfolgter Tunnelanfahrt ihre Funktion. Daher müssen diese bei einem erneuten Anfahrvorgang wiederum versetzt werden.

4.2.5 Kalkulation Anfahrvorgang mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und Dichtblock

Eine Zusammenstellung der Kalkulation des Anfahrvorganges mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und Dichtblock findet sich in Tab. 4.8 wieder. Im Zuge der Kalkulation wird zwischen einem vertikal und einem horizontal hergestellten Dichtblock unterschieden. Die wichtigsten Konstruktionselemente sind gewohnt im oberen Abschnitt der Tabelle aufgelistet. Dabei fällt auf, dass der Dichtblock, unabhängig von seiner Herstellung, die gleiche Größe aufweist. Außerdem kann der A-Bock im Vergleich zur vorangegangenen Kalkulation reduziert ausgeführt werden, da mit verringertem Stützdruck durch den Dichtblock vorgetrieben wird. Dadurch werden geringere Vortriebskräfte benötigt. Die Dichtung der Startbrille kann durch die Anordnung eines Dichtblocks ebenfalls minimiert werden, was sich auch in den Kosten widerspiegelt.

Die Kalkulation des benötigten Zeitaufwandes des Verfahrens ist im mittleren Abschnitt der Tab. 4.8 zusammengefasst. Die Kalkulation des Aufwandswertes erfolgt unter den gleichen Gesichtspunkten wie bei den zwei Anfahrverfahren der vorangegangenen Unterkapitel. Dabei wird wiederum zwischen den beiden Herstellungsmöglichkeiten des Dichtblocks unterschieden. Die Herstellung eines vertikalen Dichtblocks erfordert dabei 2.473 Stunden. Jene eines horizontalen Dichtblocks unterscheidet sich mit 2.493 Stunden lediglich unwesentlich davon. Die wesentlichen Auswirkungen, die sich aus der Wahl des Herstellungsverfahrens des Dichtblocks ergeben, werden im Zuge des Vergleichs der Bauzeitpläne aufgezeigt. Die benötigte Gesamtbauzeit wird im untersten Abschnitt der Tab. 4.8 angeführt. Der Bauzeitunterschied dieser beiden Verfahren beläuft sich lediglich auf etwa einen Tag. Diese unterschiedliche Bauzeit wird durch die abweichende Herstellung des Dichtblocks hervorgerufen. Im Gegensatz zu dem baubetrieblichen Ablauf ruft die reine Bauzeit lediglich einen geringen Unterschied zwischen den Verfahren hervor. Die Arbeiten an der Anfahrt mit A-Bock, Startbrille und vertikal hergestelltem Dichtblock nehmen rund 35 Tage in Anspruch. Jene mit horizontal errichtetem Dichtblock belaufen sich auf etwa 36 Tage.

Die Kostenkalkulation des Anfahrvorganges mit A-Bock, Startbrille und Dichtblock ist ebenfalls in Tab. 4.8 zusammengefasst. Die größten Kostenträger, nebst des Dichtblocks, sind die Schildwiege und der A-Bock. Die Startbrille samt Dichtung, sowie die Arbeitszeit machen ebenfalls einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten aus. Jedoch entfällt der Großteil der Kosten auf die Dichtblockherstellung. Diese belaufen sich, unabhängig von der Verfahrensart, auf etwa 1.944.000 €. Die Gesamtkosten des Anfahrvorganges mit A-Bock, Startbrille und vertikal hergestelltem Dichtblock ergeben sich zu 3.326.000 €. Wird der Dichtblock im Zuge des Schachtaushubs horizontal hergestellt, ändern sich die Kosten zu 3.328.000 €.

Verfahrensablauf vertikaler Dichtblock

Der Bauzeitplan des Anfahrvorganges mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und vertikal hergestelltem Dichtblock ist in Abb. 4.3 ersichtlich. Das Verfahren unterscheidet sich lediglich in Details von jenem des letzten Unterkapitels. Der Dichtblock kann bereits vor dem Schachtaushub hergestellt werden. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Anfahrverfahren zu ermöglichen, ist die Fertigstellung der Arbeiten am Dichtblock mit 02.01.2023 definiert. Damit beginnen die Tätigkeiten am Schachtaushub bei allen Verfahren zeitgleich. Der Aushub des Startschachtes erfolgt wiederum ohne etwaige Einschränkungen. Dies nimmt die gleiche Zeitdauer,

Anfahrvorgang mit A-Bock, Startbrille und Dichtblock				
Konstruktionselemente				
A-Bock				120 t
Druckring				10 t
Stützkonstruktion der Blindringe				20 t
Startbrille				40 t
Schildwiege				130 t
Verpressanker				24 Stk.
Dichtblock				
vertikal				2.700 m ³
Bohrung ohne DSV				1.280 m
horizontal				2.700 m ³
Mengenermittlung				
Schalungsfläche				70 m ²
Gerüstfläche				140 m ²
Betonkubatur				20 m ³
Bewehrungsstahl				2.700 kg
Zeitaufwand				
A-Bock	3 Std./t	360 Std.	5 Arbeiter	72 Std.
Druckring	3 Std./t	30 Std.	5 Arbeiter	6 Std.
Stützkonstruktion	3 Std./t	60 Std.	5 Arbeiter	12 Std.
Startbrille	3 Std./t	120 Std.	5 Arbeiter	24 Std.
Schalung	0,4 Std./m ²	28 Std.	5 Arbeiter	6 Std.
Gerüst	0,1 Std./m ²	14 Std.	5 Arbeiter	3 Std.
Betonieren	0,3 Std./m ²	6 Std.	5 Arbeiter	1 Std.
Bewehren	0,024 Std./kg	65 Std.	5 Arbeiter	13 Std.
Schildwiege	3 Std./t	390 Std.	5 Arbeiter	78 Std.
Verpressanker	12 Std./Stk.	288 Std.	1 Maschine	288 Std.
Demontage	3 Std./t	960 Std.	5 Arbeiter	192 Std.
Dichtblockherstellung				
vertikal	0,053 Std./m ³	152 Std.	1 Maschine	152 Std.
horizontal	0,064 Std./m ³	172 Std.	1 Maschine	172 Std.
	vertikal: Gesamtstundenaufwand	2.473 Std.	Personenstunden	846 Std.
	horizontal: Gesamtstundenaufwand	2.493 Std.	Personenstunden	866 Std.
Kosten				
A-Bock			3,5 €/kg	€ 420.000
Druckring			3,5 €/kg	€ 35.000
Stützkonstruktion			3,5 €/kg	€ 70.000
Startbrille			3,5 €/kg	€ 140.000
Beton			100 €/m ³	€ 2.000
Bewehrung			1,25 €/kg	€ 3.000
Dichtung				€ 50.000
Schildwiege			3,5 €/kg	€ 455.000
Alteisen			-200 €/t	€ 65.000
Verpressanker			3.000 €/Stk.	€ 72.000
Kran			20.000 €/Mo	€ 24.000
Bohr- & DSV-Gerät			15.000 €/Mo	€ 38.000
Arbeitszeit vertikaler Dichtblock			56 €/Std.	€ 138.000
Arbeitszeit horizontaler Dichtblock			56 €/Std.	€ 140.000
Dichtblockherstellung				
vertikal			720 €/m ³	€ 1.944.000
horizontal			720 €/m ³	€ 1.944.000
	Gesamtkosten (vertikaler Dichtblock)			€ 3.326.000
	Gesamtkosten (horizontaler Dichtblock)			€ 3.328.000
Bauzeit				
Monatliche Arbeitszeit				727,4 Std./Mo
vertikal: Personenstunden	846 Std.	horizontal: Personenstunden		866 Std.
vertikal: Gesamtbauzeit	35 Tage	horizontal: Gesamtbauzeit		36 Tage

Tab. 4.8: Kalkulation des Anfahrvorganges mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und Dichtblock mittels der Annahmen aus Tab. 4.4 und Tab. 4.5

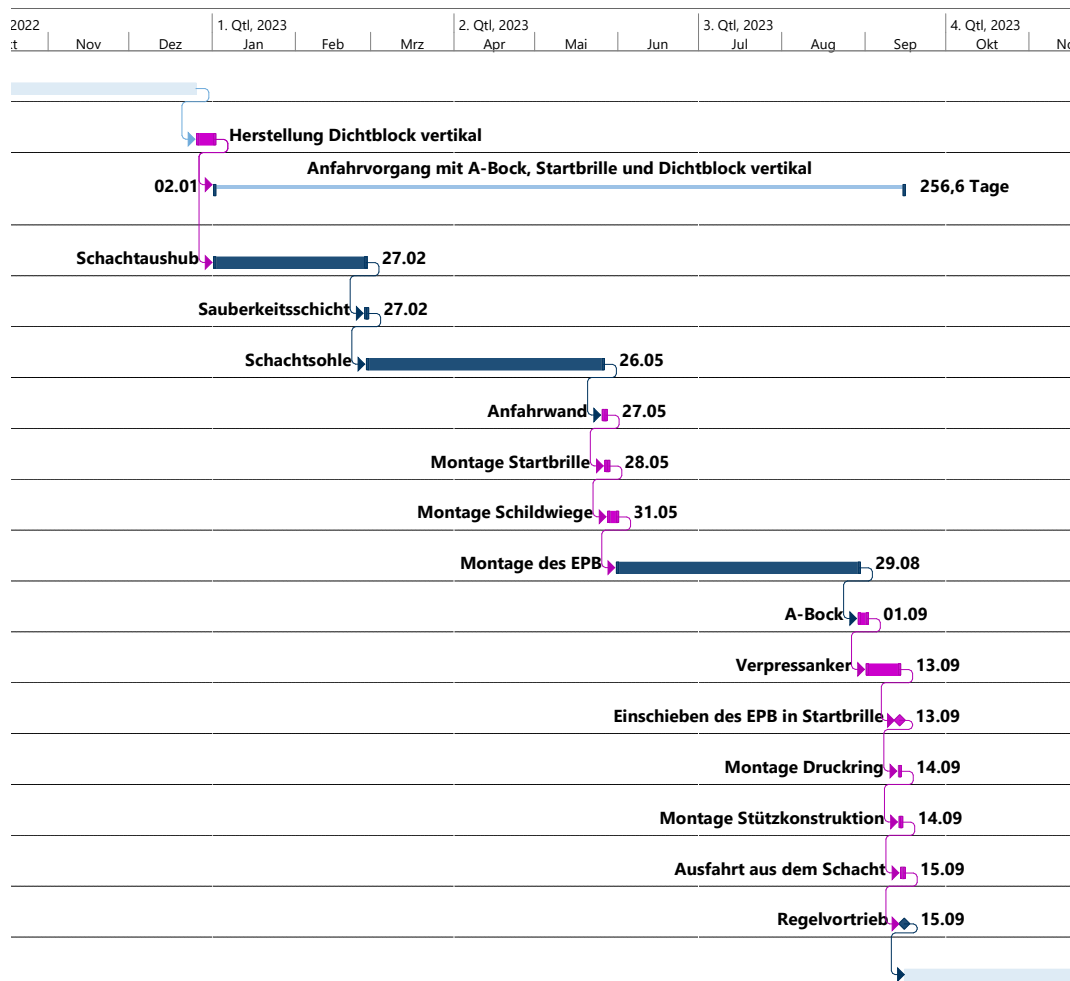


Abb. 4.3: Bauzeitplan der Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und vertikal hergestelltem Dichtblock (Verfahrensspezifische Vorgänge sind hervorgehoben)

wie bei dem Anfahrvorgang des voran gestellten Unterkapitels, in Anspruch. Anschließend an den Schachtaushub folgt gewohnt die Herstellung einer Sauberkeitsschicht. Sobald diese fertig hergestellt ist, wird mit den Arbeiten an der Schachtsohle begonnen. Diese sind in Abb. 4.3 wiederum als Sammelvorgang zusammengefasst. Dabei ist zunächst die Bewehrung des Fundaments zu verlegen, gefolgt vom Betonieren.

Im Anschluss kann mit der Herstellung der Anfahrwand begonnen werden. Diese erfolgt in der, bereits im vorherigen Unterkapitel, beschriebenen Art und Weise. Diese Arbeiten sind in Abb. 4.3 aus Gründen der Übersichtlichkeit ebenfalls als Sammelvorgang zusammengefasst. Dabei ist wiederum ein Teil der Startbrille mit einzubetonieren. Im folgenden Arbeitsschritt wird der Rest der Startbrille montiert. Bevor mit der Montage des EPB begonnen werden kann, ist die Schildwiege im Startschacht herzustellen. Danach kann mit der Montage der TVM begonnen werden, was mit 3 Monaten kalkuliert wird. Im Anschluss daran wird mit den Montagearbeiten des A-Bocks begonnen. Daran anschließend werden die Verpressanker versetzt. Diese ermöglichen die Einleitung der, im Zuge des Vortriebs erzeugten, Zugkräfte in den Untergrund. Die fertiggestellte Maschine wird nun in die Startbrille eingeschoben. Der Druckring wird wiederum an dem A-Bock montiert. Dieser Arbeit folgt die Montage der Stützkonstruktion der Blindringe, welche im Zuge des Vortriebs errichtet werden. Bevor der Regelvortrieb erreicht wird, muss das EPB aus

der Startbrille ausfahren. Dies nimmt bei Vorhandensein eines Dichtblocks etwa 23 Stunden in Anspruch. Der Regelvortrieb wird bei dem Anfahrvorgang mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und vertikalem Dichtblock etwa 257 Tage nach dem Beginn des Schachtaushubs erreicht.

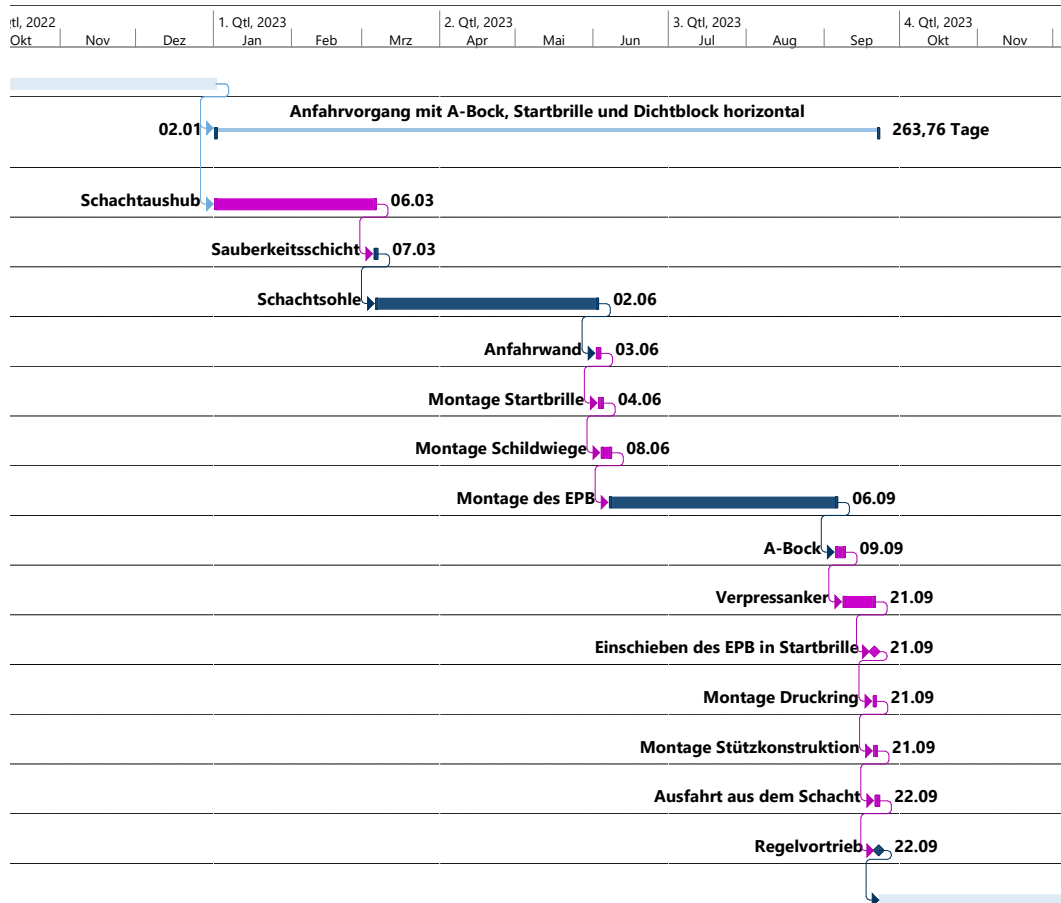


Abb. 4.4: Bauzeitplan der Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und horizontal hergestelltem Dichtblock (Verfahrensspezifische Vorgänge sind hervorgehoben)

Verfahrensablauf horizontaler Dichtblock

Erfolgt die Anfahrt mit einem horizontal hergestellten Dichtblock, anstatt eines vertikalen wie oben beschrieben, hat dies Auswirkungen auf den Bauzeitplan und beeinträchtigt die Zeitspanne zwischen Schachtaushub und Anfahrbeginn. Der Bauzeitplan eines solchen Anfahrvorganges mit horizontalem Dichtblock ist in Abb. 4.4 ersichtlich. Kann der vertikale Dichtblock noch vor Beginn des Schachtaushubs hergestellt werden, so ist dies beim horizontal errichtetem Dichtblock nicht mehr möglich. Dieser muss im Zuge des Schachtaushubs hergestellt werden. Zunächst erfolgt der Aushub von 20 m, in Lagen von jeweils 2 m. Ab dieser Tiefe erfolgt abwechselnd die Herstellung des horizontalen Dichtblocks, gefolgt von dem Aushub einer weiteren 2. Schicht. Diese Vorgänge wechseln einander ab, bis die Endtiefe erreicht ist. In Abb. 4.4 sind diese Vorgänge zu dem Sammelvorgang des Schachtaushubs zusammengefasst. Sind die Aushubarbeiten und jene am Dichtblock abgeschlossen, wird in gewohnter Art und Weise zunächst eine Sauberkeitsschicht hergestellt, gefolgt von den Arbeiten der Schachtsohle. Die Bewehrungs- und Betonierarbeiten der Schachtsohle sind in Abb. 4.4 wiederum zu einem Sammelvorgang zusammengefasst. Selbiges gilt für die Einzelarbeitsschritte der Anfahrwand. Der Bauablauf entspricht dabei jenem der Anfahrt ohne Dichtblock. Nach Montage des zweiten Startbrillenteils kann mit den Arbeiten an

der Schildwiege begonnen werden. Anschließend wird das EPB zusammengefügt. Der A-Bock kann aufgrund des Vorhandenseins des Dichtblocks reduziert ausgeführt werden und nimmt daher weniger Zeit in Anspruch, als bei jenem Anfahrvorgang ohne Dichtblock. Komplettiert wird der A-Bock durch das Versetzen der Verpressanker, welche die Vorschubkräfte in den Untergrund ableiten. Nach den Arbeiten an diesen Ankern kann die Maschine in die Startbrille eingeschoben werden. Im Anschluss daran folgt die Montage des Druckrings. Abgeschlossen wird die Anfahrt mit A-Bock, Startbrille und horizontalem Dichtblock von der Montage der Stützkonstruktion der Blindringe. Daran anschließend folgt die Ausfahrt aus dem Startschacht, welche etwa 23 Stunden dauert. Erst im Anschluss daran kann mit dem Regelvortrieb begonnen werden. Zwischen dem Beginn des Schachtaushubs und dem Erreichen des Regelvortriebs vergehen bei dem Anfahrvorgang mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und horizontalem Dichtblock in etwa 264 Tage.

Im Anschluss an die Ausfahrt des EPB aus dem Startschacht kann mit der Demontage der Anfahrkonstruktion begonnen werden. Dabei ist das Herstellungsverfahren des Dichtblocks unwesentlich. Die entscheidenden Konstruktionen können bei einer etwaigen weiteren Tunnelanfahrt wiederverwendet werden. Davon ausgenommen sind die Verpressanker, der einbetonierte Teil der Startbrille und die eingesetzten Dichtungen. Der Dichtblock selbst muss ebenfalls bei einer erneuten Anfahrt oder einer folgenden Ausfahrt erneut hergestellt werden.

Die Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und Dichtblock unterscheidet sich in den Kalkulationsergebnissen nur unwesentlich in Abhängigkeit der Dichtblockausführung. Weder die Bauzeit, noch die Kosten der Verfahren weisen einen erheblichen Unterschied zueinander auf. Der Bauzeitplan und der daraus resultierende frühestmögliche Regelvortrieb des EPB weisen eine Differenz von etwa einer Woche auf, was sich in den Kosten niederschlagen wird.

4.2.6 Gegenüberstellung der Kalkulationsergebnisse

Im Folgenden sollen die gewonnenen Erkenntnisse der Kalkulation verschiedener Anfahrverfahren zusammengefasst und gegenübergestellt werden. Dabei erfolgt die Betrachtung der Bauzeit, Baukosten und jener Zeitspanne zwischen Schachtaushub und Erreichen des Regelvortriebs der einzelnen Verfahren.

Die Kalkulationsergebnisse sind in Tab. 4.9 zusammengefasst. Die kürzeste Bauzeit wird bei dem Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille realisiert. Die Arbeiten an diesem Verfahren nehmen rund 33 Tage in Anspruch. Die längste Bauzeit benötigt die Anfahrt aus einem Betontopf, was rund 51 Tage dauert. Der Anfahrvorgang mit einem horizontalen Dichtblock verursacht eine Bauzeit von 36 Tage. Die Arbeiten an der Anfahrt mit A-Bock, Startbrille und vertikalem Dichtblock dauern rund 35 Tage.

Ein anderes Bild ergibt sich bei den Baukosten. Dabei wurden die verfahrensspezifischen Kosten kalkuliert. Jene Kostenträger, welche bei allen betrachteten Verfahren in selber Höhe anfallen, wurden nicht berücksichtigt. Dazu zählt beispielsweise die Schachtherstellung, die Montage des EPB oder die benötigten Blindtübblinge. Diesbezüglich ist das Verfahren mit Betontopf die günstigste Option. Dieses verursacht Kosten in Höhe von rund 790.000 €. Der Anfahrvorgang mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille schlägt mit etwa 1.700.000 € zu Buche. Die Anfahrt mit vertikalem bzw. horizontalem Dichtblock verursacht Kosten in der Höhe von etwa 3.330.000 €.

Die Dauer zwischen dem Schachtaushub und dem Beginn des Regelvortriebs ist bei der Anfahrt mit vertikalem Dichtblock am kürzesten. Diese beträgt etwa 257 Tage. Die Anfahrt ohne Dichtblock ist mit zirka 260 Tagen zu rechnen. Wird der Dichtblock horizontal hergestellt, so erfolgt der Tunnelvortrieb im Regelvortrieb etwa 264 Tage nachdem mit dem Schachtaushub begonnen wurde. Beim Anfahrvorgang aus einem Betontopf vergeht mit rund 285 Tagen nach dem Schachtaushub, bis der Regelvortrieb startet die längste Zeitspanne. Ein wesentlicher Anteil

Zusammenfassung der Kalkulationsergebnisse				
	Anfahrvorgang aus einem Betontopf	Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille	Anfahrvorgang mit A-Bock, Startbrille und Dichtblock	
			vertikaler Dichtblock	horizontaler Dichtblock
Bauzeit	51 Tage	33 Tage	35 Tage	36 Tage
Baukosten	€ 790.000	€ 1.700.000	€ 3.330.000	€ 3.330.000
Beginn Schachtherstellung bis Regelvortrieb	285 Tage	260 Tage	257 Tage	264 Tage

Tab. 4.9: Zusammenfassung der wesentlichen Kalkulationsergebnisse der unterschiedlichen Anfahrverfahren

dieser Dauer entfällt auf jene Prozesse, welche verfahrensunabhängig sind. Die Schachtherstellung schlägt mit etwa 56 Tagen zu Buche. Für die Montage des EPB wurden rund 90 Tage veranschlagt. Die Herstellung der Sauberkeitsschicht samt der Schachtsohle beansprucht zirka 88 Tage.

Um diese Werte anschaulicher gegenüberzustellen, dient Abb. 4.5. Darin sind die entscheidenden Parameter der verschiedenen Anfahrverfahren nochmals dargestellt. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, sind diese Werte allerdings prozentual auf das jeweils günstigste Kalkulationsergebnis bezogen. Demnach ist die Bauzeit bei dem Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille am geringsten und wird mit 100% veranschlagt. Die Anfahrt aus einem Betontopf dauert um 55% länger. Die Bauzeit der Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und vertikalem Dichtblock beläuft sich zu 107% des schnellsten Verfahrens. Der Unterschied zwischen einer Anfahrt mit vertikal hergestelltem Dichtblock zu jener mit horizontal errichtetem beträgt lediglich 3%. Die Anfahrt mit horizontalem Dichtblock erfordert rund 110% jener mit A-Bock und Startbrille.

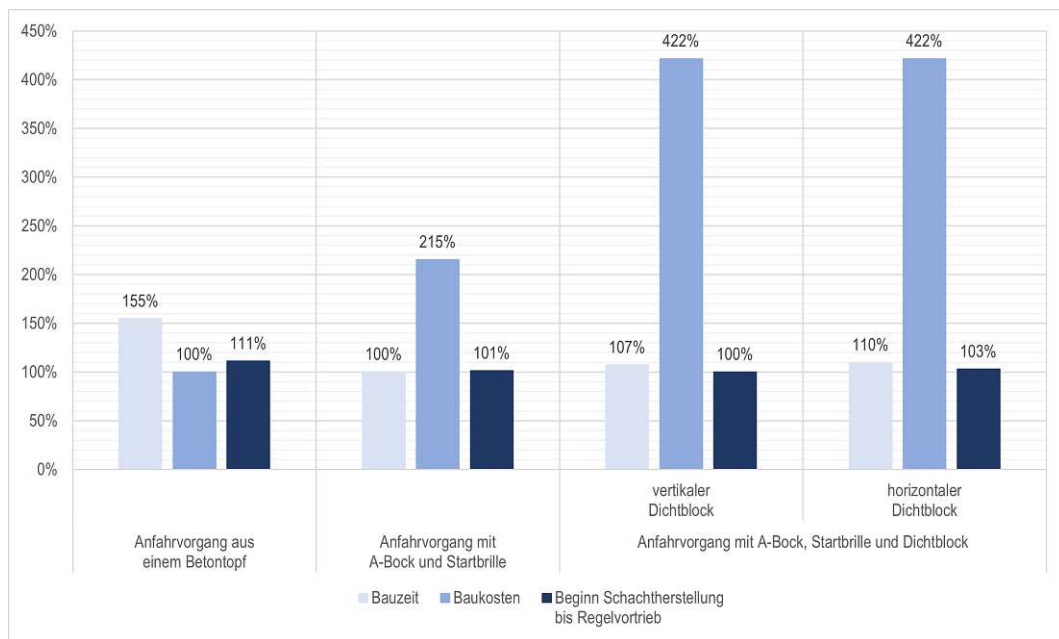


Abb. 4.5: Zusammenfassung der Kalkulationsergebnisse

Die Baukosten der Anfahrt mit Dichtblock sind, unabhängig von seiner Herstellung, am teuersten. Diese überschreiten die Kosten der Anfahrt aus einem Betontopf um 322%. Dabei entfallen mehr als die Hälfte der Kosten auf die Dichtblockherstellung. Der Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille verursacht Kosten in Höhe von 215% der Anfahrkosten aus einem Betontopf.

Die kürzeste Zeitdauer zwischen dem Schachtaushub und dem Regelvortrieb vergeht bei der Anfahrt mit einem vertikal hergestellten Dichtblock. Allerdings benötigt auch die Anfahrt mit A-Bock und Startbrille lediglich um 1% länger. Bei einem horizontal errichteten Dichtblock beträgt der Zeitabschnitt um lediglich 3% länger als bei der Anfahrt mit vertikalem Dichtblock. Der Anfahrvorgang aus einem Betontopf bildet das Schlusslicht mit 111% der geringsten Zeitspanne.

4.2.7 Diskussion der Kalkulationsergebnisse

Die ausgewerteten Kalkulationsergebnisse sollen im Folgenden einer Diskussion unterzogen werden. Dabei wird auf die Hintergründe der entscheidenden Kalkulationsannahmen eingegangen. Außerdem soll die Diskussion einer besseren Einordnung der Ergebnisse dienen.

Im Zuge der Kalkulation mussten zahlreiche Annahmen getroffen werden. Diese sind nach bestem Wissen und Gewissen ausgewählt worden, jedoch sind diese Werte in der Praxis von zahlreichen Faktoren abhängig. Aus diesem Grund ist eine genaue Feststellung erst nach Fertigstellung eines Projektes möglich. Kleinere Anpassungen der gewählten Positionskosten führen meist nur zu einer Änderung der Kalkulationsergebnisse in unbedeutendem Ausmaß, auf den Gesamtbetrag bezogen. So würde eine Anpassung des Mittellohnpreises von 56 €/Std. auf 60 €/Std. zu einer Differenz der Kosten der Anfahrvorgänge im Ausmaß von wenigen zehntausend Euro führen. Eine Adaption der Kosten für Beton von 100 €/m³ auf 120 €/m³, oder eine Erhöhung der Kosten für Bewehrungsstahl um 0,50 €/kg auf 1,75 €/kg, würden zu Mehrkosten von einigen zehntausend Euro führen.

Eine Veränderung der Aufwandswerte bewirkt besonders bei den Versetz- und Montagearbeiten der Stahlbaukonstruktionen eine wesentliche Änderung. Eine Veränderung des Aufwandswertes um ± 2 Std./t, führt bei allen Verfahren, außer bei der Anfahrt aus dem Betontopf, zu einer deutlich veränderten Bauzeit. Diese Bauzeitänderung beträgt mehr als 0,3 Monate bei den Anfahrvorgängen mit Rücksteifkonstruktion.

Die Verdoppelung der Aufwandswerte für Arbeiten an Stahlbetonkonstruktionen betrifft das Schalen, Bewehren, Betonieren und die Herstellung eines Gerüsts. Eine solche Veränderung verlängert die Bauzeit bei der Anfahrt aus einem Betontopf von 51 Tagen auf etwa 64 Tage. Dies entspricht einer verlängerten Errichtungsdauer von knapp 13 Tagen. Bei den restlichen Verfahren verlängert sich die Bauzeit lediglich um zirka einen Tag. Dieser verlängerte Zeitaufwand kann direkt auf den verspäteten Regelvortrieb umgelegt werden.

Die Baukosten des Verfahrens mit Betontopf belaufen sich, bei einer solchen Veränderung der Aufwandswerte, zu knapp 960.000 €. Dies entspricht einer Teuerung von etwa 22%, was einem Wert von zirka 170.000 € entspricht. Sämtliche übrigen Verfahren erfahren eine Preissteigerung von wenigen tausend Euro. Eine solche Verdopplung der entsprechenden Aufwandswerte führt demnach, insbesondere bei der Anfahrt aus einem Betontopf, zu einer wesentlichen Änderung sowohl der Bauzeit als auch der Kosten. Dieses Verfahren bleibt jedoch, rein auf die einmaligen Baukosten bezogen, unverändert das billigste Verfahren. Allerdings verlängert sich die Bauzeit des Betontopfs maßgeblich, wodurch auch der Regelvortrieb zu einem noch späteren Zeitpunkt erreicht werden kann. Auf die – auch wirtschaftliche – Bedeutung eines verspäteten Regelvortriebs wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch eingegangen.

Eine Adaption der Bau- und Montagekosten der Stahlbaukonstruktionen um ± 1 €/kg führt bei den Verfahren mit Rücksteifkonstruktion zu einer deutlichen Veränderung der Ergebnisse.

Das Ausmaß der Kostenänderung beträgt je nach Verfahren zwischen 300.000 € und 400.000 €. Durch die Anordnung eines Dichtblockes und der damit verbundenen reduziert ausgeführten Stahlkonstruktionen ergibt sich die geringere Preissteigerung. Die Kosten der Anfahrt aus einem Betontopf variieren indessen um zirka 50.000 €. Demnach würden sich die Baukosten der Anfahrt aus einem Betontopf, bei einer Steigerung der Kosten für die Montage der Stahlbaukonstruktion auf 4,5 €/kg, zu 840.000 € ergeben. Der Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille würde Kosten in Höhe von 2.100.000 € erzeugen. Die Kosten der Anfahrt mit Dichtblock, unabhängig von seiner Herstellung, würden mit einem Betrag von 3.650.000 € zu Buche schlagen.

Gemäß diesen Überlegungen nehmen die Stahlbauarbeiten eine zentrale Rolle der Kalkulation ein, da sämtliche Verfahren, mit Ausnahme der Anfahrt aus dem Betontopf, eine erhebliche Menge an Stahlbauarbeiten aufweisen. Die oben ausgeführte Variation der Kosten um etwa $\pm 30\%$ verändert die Relation der Verfahren zu jenem mit Betontopf. Die wesentliche Grundaussage bleibt jedoch erhalten, da in einem solchen Fall die Anfahrt aus einem Betontopf ebenfalls das günstigste Verfahren, auf die reinen Baukosten bezogen, darstellen würde. Außerdem entsteht bei einer Preisänderung der Stahlbauarbeiten eine Rückkoppelung über den Anteil an wiederverwendbarem Material. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Kalkulation, obwohl teilweise grobe Annahmen getroffen wurden, die Relation der einzelnen Verfahren zueinander korrekt widerspiegelt und eine reale Entscheidungsgrundlage bietet.

Die durchgeführte Kalkulation bezieht sich lediglich auf einen einzigen Anfahrvorgang. Ein Tunnelbauprojekt ist jedoch stets in der Gesamtheit zu betrachten. Nur eine geringe Anzahl an Tunnelprojekten beginnen mit der Anfahrt und sind nach der ersten Ausfahrt der TVM abgeschlossen. Weitaus öfter erfolgt nach dem Durchbruch zur Zielsituation ein Schildtransfer und eine erneute Anfahrt. Dies ist besonders in Hinblick auf die Kosten der verschiedenen Verfahren zu berücksichtigen. Da der Einsatz an Arbeitszeit und Baugeräten bei einem weiteren Anfahrvorgang unverändert erneut anfällt, ist lediglich eine Betrachtung der Materialkosten sinnvoll. Diese sind in Abb. 4.6 dargestellt. Die Materialkosten der Anfahrt aus einem Betontopf belaufen sich auf etwa 549.000 €. Bei dem Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille fallen die Materialkosten mit einer Höhe von knapp 1.577.000 € an. Dies entspricht fast dem Dreifachen der Anfahrt mit Betontopf. Die Materialkosten des Verfahrens mit vertikal hergestellten Dichtblock unterscheiden sich lediglich unwesentlich von jenem mit horizontaler Herstellung. Diese belaufen sich jeweils auf zirka 3.191.000 €.

Zwar sind die Baukosten des Anfahrvorganges aus einem Betontopf deutlich am geringsten, jedoch kann lediglich eine geringe Anzahl an Konstruktionen bei einer etwaigen weiteren Anfahrt wiederverwendet werden. Dies ist in Abb. 4.7 ersichtlich. Dort sind die Kostenanteile an wiederverwendbarem und nicht wiederverwendbarem Material der verschiedenen Verfahren abgebildet. Das Anfahrverfahren aus einem Betontopf weist lediglich einen Anteil von 28% an wiederverwendbaren Materialkosten auf. Dies ist der geringste Wert der betrachteten Verfahren. Positiv heraus sticht bei dieser Betrachtung die Anfahrt mit A-Bock und Startbrille. Bei diesem Verfahren kann Material in Höhe von rund 87% der Materialkosten wiederverwendet werden. Der Wiederverwendungsanteil beträgt bei den Anfahrten mit Dichtblock jeweils etwa ein Drittel. Dies wird besonders durch den Dichtblock beeinflusst, da dieser sehr große Kosten verursacht, jedoch nicht wiederverwendet werden kann.

Diese Erkenntnisse sind bei der Auswahl des am besten geeigneten Anfahrverfahrens zu berücksichtigen. Demnach stellen die Baukosten der Verfahren zwar eine wichtige Entscheidungsgrundlage dar, jedoch muss das gesamte Tunnelbauprojekt betrachtet werden. Dabei ist die Anzahl der Anfahr- und Ausfahrsequenzen ein entscheidender Faktor. Da, wie aus Abb. 4.7 abgeleitet werden kann, die Materialkosten des Anfahrvorganges aus einem Betontopf bei mehreren Anfahrten jene der Anfahrt mit A-Bock und Startbrille übersteigen. Denn ein solcher Betontopf ist bei jeder Anfahrt und Ausfahrt erforderlich und muss stets neu hergestellt werden.

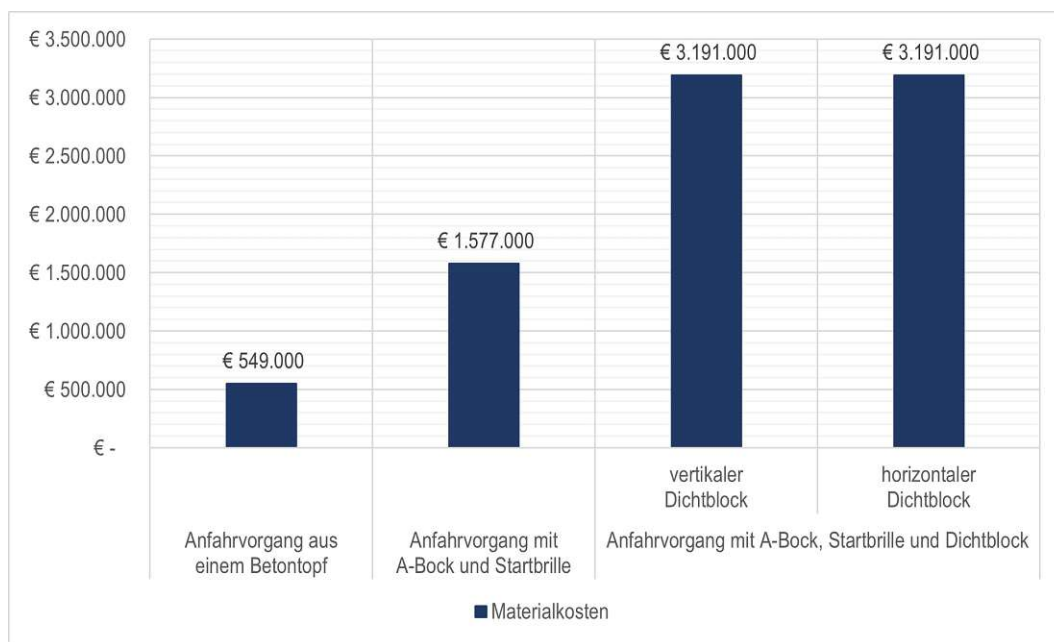


Abb. 4.6: Gegenüberstellung der Materialkosten der Verfahren

Ein etwaiger Dichtblock muss bei jedem weiteren Anfahrvorgang ebenfalls neu gebildet werden. Dies würde die ohnehin schon hohen Kosten bei einer erneuten Anfahrt noch weiter erhöhen. Die Herstellung eines Dichtblocks bietet jedoch andere Vorteile, wie die Reduzierung des Risikos. Dies und der Fakt der verkürzten Zeitdauer zur Tunnelanfahrt können eine Anfahrt mit Dichtblock rechtfertigen.

Eine zusätzliche Anfahrt aus einem Betontopf würde Materialkosten in der Höhe von etwa 395.280 € verursachen. Inklusive der Arbeitszeit und des Gerätebedarfs ergibt sich eine weitere Anfahrt aus einem Betontopf zu Kosten von zirka 636.280 €. Eine erneute Anfahrt mit A-Bock und Startbrille hingegen erzeugt Materialkosten von lediglich etwa 205.010 €. Auf die gesamten Baukosten bezogen würde eine weitere Anfahrt bei diesem Verfahren mit lediglich etwa 328.010 € zu Buche schlagen. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass die Anfahrt mit A-Bock und Startbrille spätestens nach dem vierten Anfahrvorgang die, aus kostentechnischer Sicht, beste Lösung darstellt. Allerdings muss der Beginn des Tunnelvortriebs ebenfalls berücksichtigt werden.

Im Zuge der Kalkulation wurde die Bauzeit in zweierlei Hinblick ermittelt. Die reine Errichtungsdauer der anfahrerspezifischen Konstruktionen und die Zeitspanne von Schachtaushub bis zum Start des Regelvortriebs. Jene Zeitdauer, welche durch Arbeiten an der Konstruktion der Anfahrverfahren hervorgerufen wird, ist dabei in aller Regel von geringerer Bedeutung als jene Zeitspanne, bis mit dem Regelvortrieb begonnen werden kann. Dies liegt vor allem an den hohen Kosten, die ein Tunnelvortrieb erzeugt. Als grober Richtwert kann ein Wert von 100.000 € pro Tag angesehen werden. Dadurch wird die Bedeutung eines früheren Anfahrbeginns verdeutlicht. Somit hat bereits eine geringe Abweichung der benötigten Tage zwischen Schachtaushub und Erreichen des Regelvortriebs eine wesentliche finanzielle Auswirkung. Dabei ist die Differenz der verschiedenen Verfahren untereinander von erheblicher Bedeutung. Die im Zuge der Kalkulation ermittelte Gesamtdauer ist hingegen weniger entscheidend. Diese wird maßgeblich von Vorgängen beeinflusst, welche verfahrensunabhängig sind. Dazu zählen beispielsweise der Schachtaushub, die Herstellung des Sohlenfundaments und die Montage des EPB. Diese Differenz des Regelvortriebs gilt es bei der Wahl des best geeigneten Anfahrvorgangs jedoch ebenfalls zu berücksichtigen.

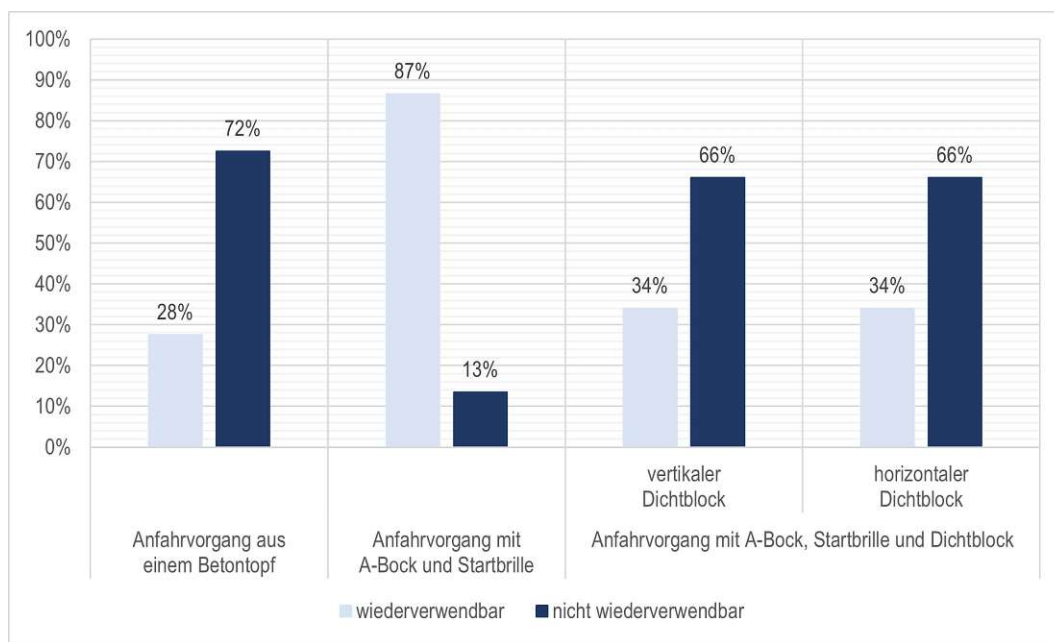


Abb. 4.7: Gegenüberstellung des Wiederverwendbarkeitsanteils der Verfahrensmaterialkosten

Vereint man die in Tab. 4.9 angeführten kalkulierten Verfahrenskosten mit den fiktiven Kostenerhöhungen durch einen späteren Beginn des Regelvortriebs, ergibt sich ein ganzheitlicheres Bild der einzelnen Verfahren. Der frühestmögliche Regelvortrieb ist bei der Anfahrt mit A-Bock, Startbrille und vertikalem Dichtblock nach 257 Tagen möglich. Für jeden Tag Verzögerung werden den anderen Anfahrvorgängen nun fiktive Kosten in Höhe von 100.000 €/Tag in Rechnung gestellt. Im Falle des Anfahrvorganges mit A-Bock und Startbrille (Dauer 260 Tage, demnach 3 Tage länger) ergeben sich fiktive Kosten für den verspäteten Anfahrbeginn von 300.000 €. Die in Tab. 4.9 angeführten Baukosten von 1.700.000 € erhöhen sich mit diesen fiktiven Kosten auf zirka 2.000.000 €, was in Tab. 4.10 ersichtlich ist. Wie erwähnt, bleiben die Kosten des Anfahrvorgang mit A-Bock, Startbrille und vertikalem Dichtblock unverändert bei etwa 3.330.000 €. Der Anfahrvorgang aus einem Betontopf erhöht sich aufgrund der erst 28 Tage späteren Anfahrt um 2.800.000 € von 790.000 € auf fiktive Gesamtkosten von 3.590.000 €. Die Anfahrt mit horizontalem Dichtblock unter Berücksichtigung der fiktiven Kosten schlägt mit 4.030.000 € zu Buche.

Die Anfahrt aus einem Betontopf wurde in Tab. 4.9 als die Methode mit den mit Abstand geringsten Baukosten ausgewiesen. Bei Berücksichtigung der fiktiven Kosten ergibt sich eine deutliche Verschiebung zu Gunsten des Anfahrvorgangs mit A-Bock und Startbrille.

Diese Vorgehensweise kann auf zusätzliche Anfahrvorgänge erweitert werden. Dies ist in der unteren Zeile der Tab. 4.10 ersichtlich. Dabei erfolgt eine Subtraktion des wiederverwendbaren Materialpreisannteils von den kalkulierten Verfahrenskosten und anschließender Berücksichtigung der fiktiven Kosten des verspäteten Anfahrbeginns. Bei der Anfahrt mit A-Bock und Startbrille ist demnach ein Betrag von 87% der Materialkosten, welche eine Höhe von etwa 1.577.000 € aufweisen, von den kalkulierten Verfahrenskosten, mit einem Betrag von knapp 1.700.000 €, zu subtrahieren. Anschließend ist, simultan zu zuvor, der fiktive Kostenanteil einer verspäteten Anfahrt zu addieren. Dies erfolgt wiederum mittels der Dauer der verspäteten Anfahrt, welche etwa 3 Tage beträgt und der Kosten des Tunnelvortriebs mit zirka 100.000 €. Daraus ergeben sich die fiktiven Kosten jeder weiteren Anfahrt mit A-Bock und Startbrille zu zirka 640.000 €. Die fiktiven Kosten jeder weiteren Anfahrt der übrigen Verfahren ergeben sich ebenfalls aus

Vergleich der fiktiven Kosten				
	Anfahrvorgang aus einem Betontopf	Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille	Anfahrvorgang mit A-Bock, Startbrille und Dichtblock	
			vertikaler Dichtblock	horizontaler Dichtblock
Verfahrenskosten erste Anfahrt + fiktive Kosten verspäteter Regelvortrieb	€ 3.590.000	€ 2.000.000	€ 3.330.000	€ 4.030.000
Verfahrenskosten jede weitere Anfahrt + fiktive Kosten verspäteter Regelvortrieb	€ 3.440.000	€ 640.000	€ 2.250.000	€ 2.950.000

Tab. 4.10: Vergleich der fiktiven Kosten unter Berücksichtigung der verspäteten Anfahrt

der Anwendung dieser Überlegungen auf die entsprechenden Verfahrenskennwerte aus Tab. 4.9, Abb. 4.6 und Abb. 4.7. Bei der Anfahrt mit vertikalem Dichtblock fallen wiederum lediglich die nicht wiederverwendbaren Materialkosten an, da dieses Verfahren die schnellstmögliche Anfahrt ermöglicht. Diese Kosten ergeben sich zu etwa 2.250.000 €. Die fiktiven Kosten jeder weiteren Anfahrt aus einem Betontopf fallen mit einem Betrag von etwa 3.440.000 € zu Buche. Jede weitere Anfahrt mit horizontalem Dichtblock verursacht fiktive Kosten in einer Höhe von knapp 2.950.000 €. Die Ergebnisse der Tab. 4.10 sind stets ganzheitlich zu betrachten, da die fiktiven Kosten allesamt auf die selbe Basis bezogen sind. Ein Vergleich der fiktiven Kosten der Anfahrt aus einem Betontopf mit jener mit A-Bock und Startbrille weist einen Fehlbetrag auf. Sämtliche Verfahren sind auf die frühestmögliche Anfahrt des Anfahrverfahrens mit vertikalem Dichtblock bezogen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Als Abschluss der Diplomarbeit werden die Erkenntnisse rekapituliert. Zunächst erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Im Anschluss werden die einleitenden Forschungsfragen wieder aufgegriffen und um Antworten ergänzt die aus der Arbeit abzuleiten sind. Darüber hinaus soll ein Ausblick in die Zukunft erfolgen.

Die Funktionsprinzipien zahlreicher gebräuchlicher Vortriebsmaschinen entsprechen jenen ihrer geschichtlichen Vorläufer. Aufgrund unterschiedlicher Abkürzungen können Diskussionen über gängige Tunnelvortriebsmaschinen zu Verwirrung führen. So definieren sowohl die ÖNORM B 2203-2 [54], als auch die „Empfehlung zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen“ des DAUB [14] jeweils verschiedene Abkürzungen für diverse Tunnelvortriebsmaschinen. Die mittlerweile zurückgezogene „Empfehlung zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen“ des DAUB [15] weist wiederum andere Abkürzungen auf, welche in der Praxis teilweise noch gebräuchlich sind.

Die gängigsten Tunnelvortriebsmaschinen ähneln sich auf den ersten Blick in optischer Hinsicht, jedoch basieren sie auf unterschiedlichen Funktionsprinzipien. Der Einsatzbereich dieser Maschinen wird maßgeblich von den Eigenschaften des prognostizierten Gesteins bestimmt. Die wesentlichste Einschränkung der Maschinenauswahl erfolgt aufgrund der Unterscheidung von Bohrungen im Festgestein und Lockergestein. Die Prognose des, im Laufe des Vortriebs, anzutreffenden Gesteins entscheidet nicht nur über die zum Einsatz kommende Tunnelvortriebsmaschine, sondern auch über die Ausführung wesentlicher Konstruktionselemente. So werden beispielsweise das Abbauwerkzeug, die Schildschwanzdichtung und Ringspaltverfüllung, sowie etwaige Gebirgsinjektionseinrichtungen maßgeblich durch das anzutreffende Gebirge bestimmt. Die Tübbinge nehmen bei dem Vortrieb geschildeter Tunnelvortriebsmaschinen eine zentrale Rolle ein. Diese sind sowohl für den Vortrieb der Maschine unerlässlich, können allerdings durch Anordnung eines Abdichtungsprofils auch die einzig wirksame Dichtungsebene darstellen. Bei der Herstellung der Tübbinge sind, unabhängig von deren Fertigung, sehr geringe Toleranzen einzuhalten.

Die Wahl des best geeigneten Anfahr- oder Ausfahrvorgangs wird maßgeblich durch etwaig vorhandenes Grundwasser bestimmt. Eine mögliche Anfahrvariante ohne vorherrschende Wasserdrücke stellt die Anfahrt mit verankertem Tübbingring dar. Dazu ist jedoch ein Pilotstollen erforderlich. Eine alternative Anfahrvariante außerhalb des Grundwassers bietet die Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion, auch A-Bock genannt. Komplizierter gestaltet sich der Anfahrvorgang unterhalb des Grundwasserspiegels. In solchen Fällen ist eine Startbrille vorzusehen, welche den Schild der Tunnelvortriebsmaschine abdichtet. Dabei kommen Lippen- und Schlauchdichtungen zum Einsatz. In den meisten Fällen wird darüber hinaus ein Dichtblock hergestellt, welcher eine zusätzliche Sicherheit gegen einen Wassereintritt in die Anfahrsituation bietet.

Die beschriebene Anfahrt mit A-Bock kann durch die Anordnung einer Startbrille und eines Dichtblocks auch bei vorherrschenden Wasserdrücken verwendet werden. Für Anfahrten bei drückendem Grundwasser stehen weitere Anfahrvorgänge zur Verfügung. Diese können theoretisch auch außerhalb des Grundwassers eingesetzt werden, jedoch wird dies in der Praxis aufgrund von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen nicht gemacht. Die Fliegende Schildanfahrt ist ein patentiertes

Verfahren, welches sich dadurch auszeichnet, dass die Tunnelvortriebsmaschine mittels eines Druckrings, Zugseilen und Hohlkolbenpressen gegen die Ortsbrust verschoben wird. Ein Verfahren, welches ursprünglich als Sonderlösung entwickelt wurde, ist die Anfahrt aus einem vorgelagertem Betontopf. Dabei wird ein Betonkubus vor der Ortsbrust errichtet, aus welchem die Anfahrt der Tunnelvortriebsmaschine erfolgt. Das Schild Transfer System wurde ebenfalls zunächst als Sonderlösung konzipiert. Dieses System ermöglicht, über den Anfahrvorgang hinaus, auch die Ausfahrt und den Transfer der Vortriebsmaschine. Die wesentlichen Bestandteile dieses Systems sind die Schildwiege, die Hydraulikzylinder und der Drucktopf.

Die Ausfahrt einer Tunnelvortriebsmaschine ohne vorherrschende Wasserdrücke erfolgt auf eine zuvor positionierte Schildwiege. Diese Ausfahrt kann durch die Anordnung einer Zielbrille und eines Dichtblocks auch unterhalb des Grundwasserspiegels zum Einsatz kommen. Die eingesetzten Dichtungen der Zielbrille unterscheiden sich von jenen der Startbrille. Lippendichtungen können aufgrund ihrer Wirkungsweise nicht bei Ausfahrvorgängen eingesetzt werden. Daher kommen meist aktivierbare Elastomerdichtungen, in Ergänzung zu Schlauchdichtungen, zum Einsatz. Der vorgelagerte Dichtblock unterscheidet sich nicht von jenem des Anfahrvorgangs.

Als weitere Sicherheit kann ein Dichttopf angeordnet werden, welcher es ermöglicht die Ausfahrtsituation auf Dichtheit zu überprüfen, bevor eine direkte Verbindung der Tunnelröhre zur Zielsituation geschaffen wird. Die Ausfahrt in einen nachgelagerten Betontopf oder ein Schild Transfer System basiert auf dem Funktionsprinzip des jeweiligen Anfahrvorgangs. Das Schild Transfer System muss lediglich um einen Druckdeckel samt Rücksteifkonstruktion ergänzt werden. Ein Ausfahrverfahren, welches kein Pendant als Anfahrverfahren besitzt, ist jenes der Ausfahrt in einen wassergefüllten Zielschacht. Dabei werden sämtliche Öffnungen des Zielschachtes abgedichtet und dieser anschließend mit Wasser gefüllt. Dadurch entsteht ein hydraulischer Gradient, welcher einen Bodeneinbruch in den Zielschacht verhindert.

Nach Betrachtung der Anfahr- und Ausfahrverfahren außerhalb von drückendem Grundwasser in Hinblick auf verschiedene Gesichtspunkte, zeichnet sich die Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion als bestes Verfahren ab. Dieses ist sowohl aus kostentechnischer, als auch aus bauzeittechnischer Sicht die ideale Lösung. Die wesentlichen Konstruktionselemente können bei mehreren Anfahrvorgängen wiederverwendet werden, was ebenfalls einen positiven Aspekt darstellt. Lediglich der beanspruchte Platzbedarf im Startschacht ist negativ anzumerken. Die Anfahrt mit verankertem Tübbingring ist aufgrund des erforderlichen Startschachts eine teurere und zeitaufwendigere Anfahrvariante. Positiv zu erwähnen ist jedoch die erforderliche Schachtgröße, welche auf ein Minimum reduziert werden kann. Die anderen Anfahrverfahren stellen ohne herrschende Wasserdrücke keine sinnvolle Lösung dar. Das optimale Ausfahrverfahren außerhalb von drückendem Grundwasser, in Bezug auf sämtliche betrachtete Gesichtspunkte, ist die Ausfahrt auf eine Schildwiege.

Die Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion und die Fliegende Schildanfahrt stellen bei drückendem Grundwasser die aus kostentechnischer und zeittechnischer Hinsicht beste Lösung dar. Die wesentlichen Konstruktionselemente können dabei mehrmals verwendet werden. Die Anfahrt aus einem Betontopf oder mittels Schild Transfer System sind allerdings unter gewissen Umständen, beispielsweise projektspezifischen Einschränkungen, ebenfalls legitim. Der Betontopf wird im Zuge der Anfahrt zerstört und kann daher nicht erneut zum Einsatz kommen. Das Schild Transfer System wird aufgrund der hohen Investitionskosten erst durch mehrere Anfahr- und Ausfahrsequenzen rentabel. Die Ausfahrt in einen Dichttopf oder in einen wassergefüllten Zielschacht stellen die am universellsten einzusetzenden Ausfahrverfahren unterhalb des Grundwasserspiegels dar. Die Ausfahrt in einen Betontopf kann wiederum unter gewissen Randbedingungen legitim sein.

Die Wahl des optimalen Anfahrverfahrens hat aufgrund mehrerer Gesichtspunkte zu erfolgen. Die Kosten der jeweiligen Verfahren bieten die Grundlage. Eine reine Betrachtung der Verfahrens-

kosten wäre allerdings zu kurz gegriffen. So ist beispielsweise ein Vergleich potenzieller Verfahren aufzustellen und der ehestmögliche Regelvortrieb der Tunnelvortriebsmaschine in Betracht zu ziehen. Höhere Verfahrenskosten können durch eine verfrühte Anfahrt unter Berücksichtigung der hohen Tunnelvortriebskosten gerechtfertigt werden. Darüber hinaus ist auch der weitere Trassenverlauf in die Überlegungen miteinzubeziehen. Dieser gibt die Anzahl der Anfahr- und Ausfahrvorgänge der Tunnelvortriebsmaschine vor. Jedes Verfahren weist einen unterschiedlichen Anteil an wiederverwendbarem Material auf. Teurere Prozesse, welche einen höheren Anteil an wiederverwendbaren Konstruktionselementen aufweisen, können ihren Einsatz bei mehreren Anfahr- oder Ausfahrsequenzen rechtfertigen, da die Kosten jeder weiteren Anfahrt oder Ausfahrt deutlich reduziert ausfallen.

Anhand eines Beispielprojekts wird die Kalkulation von vier Anfahrverfahren durchgeführt, um einen Vergleich der Verfahren zu ermöglichen. Im Zuge des Projekts soll die Anfahrt aus einem Startschacht, welcher eine Länge von 90 m und eine Breite von 30 m aufweist, erfolgen. Der Vortrieb findet mit einem Erddruckschild, welches einen Maschinendurchmesser von 10,4 m aufweist, in einer Tiefe von 35 m unter der Geländeoberkante, bei einem Wasserdruck von 3,5 bar, statt. Die Kalkulation hat gezeigt, dass die Anfahrt aus einem Betontopf, auf die reinen Baukosten des Verfahrens bezogen, die kostengünstigste Anfahrt darstellt. Allerdings erfordert sie die längste Bauzeit und gewährt aufgrund der Verfahrensabläufe der Errichtung den spätesten Regelvortrieb der Tunnelvortriebsmaschine. Der Anfahrvorgang mit A-Bock und Startbrille verursacht Baukosten in etwa doppelter Höhe. Allerdings benötigt dieses Anfahrverfahren die geringste Bauzeit und ermöglicht einen nur unwesentlich späteren Regelvortrieb als das schnellste betrachtete Verfahren, die Anfahrt mit A-Bock, Startbrille und vertikalem Dichtblock. Die Baukosten der Anfahrt mit vertikalem Dichtblock sind im Gegensatz zu dem Verfahren ohne Dichtblock wiederum etwa doppelt so hoch, wobei der Großteil der Kosten auf den Dichtblock entfällt. Die Bauzeit des Verfahrens benötigt etwas länger. Die Anfahrt mit vertikalem Dichtblock ermöglicht den ehestmöglichen Regelvortrieb. Wird der Dichtblock horizontal im Zuge des Schachtaushubs errichtet verlängert sich die Bauzeit, wobei die Baukosten zirka unverändert bleiben. Der größte Unterschied bei den Anfahrverfahren mit Dichtblock ist der Startzeitpunkt des Regelvortriebs. Dieser ist bei horizontalem Dichtblock verspätet, jedoch noch deutlich vor jenem der Anfahrt aus dem Betontopf.

Vereint man diese Kalkulation mit den Überlegungen der fiktiven Kosten eines verspäteten Regelvortriebs, ergibt sich der höchste Betrag für die erste Anfahrt mit horizontalem Dichtblock. Es folgt die Anfahrt aus einem Betontopf. Die Anfahrt mit vertikalem Dichtblock platziert sich an zweiter Stelle. Das Anfahrverfahren mit A-Bock und Startbrille weist gemäß dieser Überlegungen die – mit großem Abstand – geringsten fiktiven Kosten auf. Neben einer solchen ersten Anfahrt sind auch die fiktiven Kosten jeder weiteren Anfahrt von großem Interesse. Der Anteil an wiederverwendbaren Materialkosten ist bei der Anfahrt mit A-Bock und Startbrille bei weitem am größten. Mit großem Abstand folgen die Anfahrten mit Dichtblock und zu guter Letzt die Anfahrt aus einem Betontopf. Aus den reinen Baukosten jeder weiteren Anfahrt, unter Berücksichtigung des wiederverwendbaren Materialanteils und der fiktiven Kosten des verspäteten Regelvortriebs ergeben sich die fiktiven Kosten jedes weiteren Anfahrvorgangs. Diese sind bei der Anfahrt mit A-Bock und Startbrille deutlich am geringsten. Auf dem zweiten Platz folgt abgeschlagen das Anfahrverfahren mit vertikalem Dichtblock. Es folgt das Verfahren mit horizontal hergestelltem Dichtblock. Am teuersten gestaltet sich jede weitere Anfahrt aus einem Betontopf. Nebst diesen fiktiven Kosten ist allerdings das reduzierte Risiko eines angeordneten Dichtblocks ebenfalls zu berücksichtigen.

5.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Der folgende Abschnitt soll sich der Beantwortung der Forschungsfragen widmen. Dabei werden zunächst die Forschungsfragen wieder aufgegriffen und anschließend anhand der Erkenntnisse der Diplomarbeit beantwortet.

FORSCHUNGSFRAGE 1:

Welche Möglichkeiten zur Charakterisierung von Tunnelvortriebsmaschinen gibt es? Worin unterscheiden sich diese voneinander?

In Österreich gibt die ÖNORM B 2203-2 [54] die wesentliche Charakterisierung von Tunnelvortriebsmaschinen vor. Darin werden die Maschinen in Tunnelbohrmaschinen und Schildmaschinen untergliedert. Die beim Vortrieb im Festgestein zum Einsatz kommenden Tunnelbohrmaschinen sind wiederum in die offene Tunnelbohrmaschine, Tunnelbohrmaschine mit Schild, Doppelschildmaschine und Erweiterungstunnelbohrmaschine unterteilt. Schildmaschinen werden im Lockergestein eingesetzt und sind nach der Art ihrer Ortsbruststützung untergliedert. Die ÖNORM B 2203-2 teilt die mechanische Ortsbruststützung, die Druckluftstützung, die Flüssigkeitsstützung und die Erddruckstützung als mögliche Stützungssysteme ein. In der Praxis sind die Flüssigkeitsstützung und die Erddruckstützung am relevantesten aller Schildmaschinentypen. Teilschnittmaschinen sind in der ÖNORM dem zyklischen Vortrieb zugeordnet.

Eine weitere Möglichkeit der Charakterisierung von Tunnelvortriebsmaschinen bietet die *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen* [15] des Deutschen Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V (DAUB) aus dem Jahr 2010. Dort findet sich eine feine Untergliederung der Schildmaschinen wieder, auch von Maschinenvarianten, welche in der Praxis kaum Bedeutung haben. Diese Empfehlung wurde jedoch im Jahr 2021 zurückgezogen und von der *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen* [14] durch den DAUB ersetzt. Dabei ist großer Wert auf die Annäherung der Charakterisierung an die international gebräuchliche Nomenklatur gelegt worden. Des Weiteren fand eine Beschränkung auf jene Maschinen statt, welche am internationalen Markt von Bedeutung sind.

Es bestehen somit drei verschieden relevante Charakterisierungen der gängigsten Tunnelvortriebsmaschinen. Diese weisen unterschiedliche Abkürzungen für die einzelnen Maschinenvarianten auf. Eine Zusammenstellung dieser abgekürzten Bezeichnungen ist jeweils in Tab. 5.1 ersichtlich.

TVM Maschinentypen	Abkürzung		
	gemäß ÖNORM B-2203-2:2022	gemäß DAUB Empfehlung 2021	gemäß DAUB Empfehlung 2010
Vollschnittmaschinentypen			
Offene TBM	TBM-O	GRT	Gripper-TBM
Einfachschild	TBM-S	OPS	TBM-S
Doppelschild	TBM-DS	DOS	DSM
Flüssigkeitsschild	-	SLS	SM-V4
Erddruckschild	EPB	EPB	SM-V5
Variable-Density-Schild	-	VDS	
Hybrid-/Multimodeschild	-	HYS	KSM
Erweiterungs-TBM	TBM-A	XTS	ETBM
Teilschnittmaschinentypen			
TS-Schild mit Bagger	-	EXS	-
TS-Schilde mit Schräme	-	RHS	-

Tab. 5.1: Gegenüberstellung verschiedener gängiger Abkürzungen von Tunnelvortriebsmaschinen

FORSCHUNGSFRAGE 2:

Welche Verfahren stehen als Anfahr- und Ausfahrvorgang im Zuge des Tunnelvortriebs mittels Tunnelvortriebsmaschinen zur Verfügung? Unter welchen Rahmenbedingungen können die einzelnen Verfahren jeweils zur Anwendung kommen?

	benötige Konstruktionselemente	GW geeignet	dafür zusätzliche Konstruktionselemente
Anfahrvorgänge			
Verankerter Tübbingring	Schildwiege, Konsole, 1 Blindring	nein	
Rücksteifkonstruktion	Schildwiege, Rücksteifkonstruktion, Druckring, mehrere Blindringe, Stützkonstruktion der Blindringe	ja	Startbrille, Dichtblock
Fliegende Schildanfahrt	Schildwiege, Druckring samt Kolbenpressen, 1-2 Blindringe	ja	Startbrille, Dichtblock
Betontopf	Betontopf, Konsole oder Druckring, mehrere Blingringe	ja	-
Schild Transfer System	Schild Transfer System, Druckring oder Rücksteifkonstruktion, Blindringe	ja	-
Ausfahrvorgänge			
Ausfahrt auf Schildwiege	Schildwiege	ja	Dichtblock, Zielbrille, ev. Dichttopf mit Rücksteifkonstruktion
Ausfahrt in einen Betontopf	Betontopf	ja	-
Schild Transfer System	Schild Transfer System, Rücksteifkonstruktion	ja	Druckdeckel
Wassergefüllter Zielschacht	Schildwiege	ja	-

Tab. 5.2: Auflistung der bedeutendsten Anfahr- und Ausfahrverfahren für Tunnelvortriebsmaschinen

Die bedeutendsten Anfahr- und Ausfahrverfahren von geschichteten Tunnelvortriebsmaschinen sind in Tab. 5.2 zusammengefasst. Die Anfahrt mittels eines verankerten Tübbingrings eignet sich als einziges Verfahren nicht für einen Einsatz im Grundwasser. Für diesen Prozess ist ein Startschacht erforderlich, welcher in zyklischer Tunnelbauweise zu errichten ist. Die wesentlichen Konstruktionselemente sind eine Schildwiege, ein Blindring und Konsolen, welche im Gebirge verankert werden. Die Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion, auch A-Bock genannt, erfordert zahlreiche Konstruktionselemente. Dazu zählen eine Schildwiege, der A-Bock, ein Druckring, mehrere Blindringe und eine Stützkonstruktion der Blindringe. Durch die Anordnung einer Startbrille an der Ortsbrust eignet sich dieses Verfahren auch für den Vortrieb unterhalb des

Grundwasserspiegels. Als zusätzliche Sicherheit kann auch ein Dichtblock vorgesehen werden. Die Fliegende Schildanfahrt ist ein patentiertes Verfahren. Im Gegensatz zur Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion werden weniger Konstruktionselemente benötigt. Es sind lediglich eine Schildwiege, ein Druckring samt Kolbenpressen und Zugseilen, sowie ein bis zwei Blindringe erforderlich. Durch die Anordnung einer Startbrille und eines eventuellen Dichtblocks kann auch dieses Verfahren bei drückendem Grundwasser eingesetzt werden. Für die Anfahrt aus einem Betontopf sind ein solcher Betonkubus, ein Druckring oder ein verankerter Tübbingring und mehrere Blindringe erforderlich. Dieses System kann ohne weitere Vorkehrungen unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzt werden. Das Schild Transfer System besteht aus einem Drucktopf, einer Schildwiege und den Hydraulikzylindern. Um eine Anfahrt aus einem solchen zu ermöglichen, werden zusätzlich ein Druckring oder ein A-Bock und mehrere Blindringe benötigt. Bei dieser Anfahrt werden keine zusätzlichen Konstruktionen erforderlich, um bei drückendem Grundwasser vorzutreiben.

Die bedeutendste Ausfahrvariante ist jene auf eine Schildwiege. Dies stellt bei Tunnel außerhalb des Grundwassers den Regelfall dar. Durch Anordnung einer Zielbrille und eines Dichtblocks kann eine Ausfahrt bei drückendem Grundwasser erfolgen. Eine erhöhte Sicherheit erfolgt durch zusätzliche Anbringung eines Dichttopfs. Dieser wird mittels eines A-Bocks gegen die Zielbrille gedrückt. Ein solcher Dichttopf ermöglicht es, die erfolgte Tunnelausfahrt auf Dichtheit zu überprüfen, bevor eine direkte Einbindung der Tunnelröhre in den Zielbereich erfolgt. Die Ausfahrt in einen Betontopf erfordert keine zusätzlichen Konstruktionselemente außer den Betonkubus selbst und ist auch ohne weitere Vorkehrungen für den Einsatz bei drückendem Grundwasser geeignet. Eine Ausfahrt in ein Schild Transfer System wird durch die Anordnung einer Rücksteifkonstruktion ermöglicht. Diese verhindert ein unbeabsichtigtes Verrutschen des Systems. Durch Ausstattung eines Druckdeckels kann dieses Verfahren auch bei vorherrschenden Wasserdrücken eingesetzt werden. Ein Verfahren welches kein Pendant als Anfahrverfahren hat ist die Ausfahrt in einen wassergefüllten Zielschacht. Dabei wird ein Schacht mit Wasser geflutet, in welchen die TVM später einfährt. Dieses Verfahren ist lediglich unterhalb des Grundwasserspiegels sinnvoll einsetzbar. Sämtliche betrachteten Anfahr- und Ausfahrverfahren eignen sich sowohl für den Einsatz bei einem Tunnelportal, als auch bei einem Schacht.

FORSCHUNGSFRAGE 3:

Welche Dichtungssysteme gibt es, um Anfahr- und Ausfahrvorgänge vor drückendem Grundwasser zu schützen? Welche Unterschiede in ihrer Wirkungsweise und ihrem Einsatzgebiet weisen diese auf?

Zur Abdichtung von Anfahr- und Ausfahrvorgängen kommen drei wesentliche Dichtungssysteme in der Start- bzw. Zielbrille zum Einsatz. Ein BULLFLEX[®] ist eine patentierte Schlauchdichtung, welche mittels Injektionsmörtel verpresst wird. Eine solche Dichtung kann bei Anfahr- und Ausfahrvorgängen eingesetzt werden. Im Zuge der Einfahrt der Schildmaschine in die Start- bzw. Zielbrille ist die Schlauchdichtung, meist zusammengefallen, in dieser montiert. Erst nachdem das Schild die Brille passiert hat, wird dieser mit Mörtel gefüllt. Die Schlauchdichtung dient somit beim Anfahrvorgang zur Abdichtung des Ringspalts gegen die Tübbingaußenschale. Beim Ausfahrvorgang kommt sie meist als Abdichtung gegen den Schildmantel zum Einsatz. Die Dimensionierung einer solchen Schlauchdichtung erfolgt anhand des prognostizierten Wasserdrucks und der zu überbrückenden Spaltenweite.

Neben der universell einsetzbaren Schlauchdichtung kommt bei Anfahrvorgängen meist auch eine Lippendichtung zum Einsatz. Diese kann als Einfachlippendichtung oder Zweifachlippendichtung ausgeführt werden. Die Doppellippendichtung bietet eine erhöhte Sicherheit auf Kosten eines geringeren Arbeitsbereiches. Einfachlippendichtungen weisen in der Regel größere Arbeitsbereiche auf, welche jedoch in Abhängigkeit zum aufzunehmenden Wasserdruck stehen. Ein größerer Arbeitsbereich einer Einfachlippendichtung hat demnach einen geringeren bewältigbaren Was-

serdruck zur Folge. Lippendichtungen basieren auf dem Funktionsprinzip, dass der herrschende Wasserdruck in entgegengesetzter Richtung zur Vortriebsrichtung wirkt. Dadurch erzeugt der vorherrschende Druck eine zusätzliche Anpresskraft der Dichtung gegen den Schildmantel.

Ein solcher Anpressdruck wäre im Zuge des Ausfahrtvorganges nicht möglich, weshalb die Dichtwirkung nicht gewährleistet werden kann. Aus diesem Grund kommen Lippendichtungen in der Zielbrille nicht zum Einsatz. Stattdessen werden meist eigens aktivierbare Elastomerdichtungen in Ergänzung zur Schlauchdichtung vorgesehen. Diese sind an der Zielbrille verteilt angebracht und werden nach erfolgter Einfahrt aktiviert, wodurch sie ihre Dichtfunktion gegen den Schildmantel erfüllen.

FORSCHUNGSFRAGE 4:

Kann ein bewertender Vergleich der gefundenen Verfahren nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen? Wie gestalten sich die Kosten der Verfahren in Relation zur Bauzeit?

Um die verschiedenen Anfahr- und Ausfahrtvorgänge miteinander bewertend zu vergleichen, muss zunächst für Vergleichbarkeit gesorgt werden. Dazu ist der Verfahrensvergleich in jene Verfahren ohne und mit beherrschbarem Wasserdruck zu unterteilen. Von wesentlichem Interesse sind die Maschinenvarianten, welche sich bei den jeweiligen Prozessen zum Einsatz eignen. Damit in engem Zusammenhang steht die Einsatzfähigkeit bei den verschiedenen Gesteinsarten. Darüber hinaus ist aus baubetrieblicher Hinsicht eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der folgenden Punkte wünschenswert:

- Toleranzen
- Platzbedarf
- Schachtgröße
- Risiko
- Bau- & Montagezeit
- Herstellungskosten

Die einzuhaltenden Toleranzen der Anfahrverfahren außerhalb des Grundwassers sind bei sämtlichen Verfahren gut zu handhaben. Kritischer gestaltet sich der Blick auf die Ausfahrtverfahren. Dabei stellt die Ausfahrt auf eine Schildwiege die geringsten Anforderungen an die einzuhaltenden Toleranzen. Die Anfahrt mittels verankertem Tübbingring stellt den geringsten Platzbedarf der benötigten Konstruktionen. Der geringste Platzanspruch der Ausfahrtverfahren wird an die Ausfahrt auf eine Schildwiege gestellt. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei Betrachtung der erforderlichen Schachtgröße. Allerdings kann diese bei der Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion auf ein Minimum reduziert werden, wohingegen die Anfahrt mit verankertem Tübbingring durch den benötigten Startschacht größer ausfallen muss. Die Ausfahrt auf eine Schildwiege erfordert die geringste Schachtgröße der Ausfahrtverfahren. Ohne herrschende Wasserdrücke ist das Risiko bei allen Anfahr- und Ausfahrtvorgängen gering. Die Anfahrt mittels Rücksteifkonstruktion ist das Anfahrverfahren, welches die geringste Bau- und Montagezeit benötigt. Eine längere Dauer ist hingegen bei der Anfahrt mit verankertem Tübbingring erforderlich, da der Startschacht zyklisch aufgefahren werden muss. Die Ausfahrt auf eine Schildwiege erfordert die kürzeste Bau- und Montagezeit. Aus kostentechnischer Sicht sind die Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion und die Ausfahrt auf eine Schildwiege die besten Verfahren. Zusammenfassend ergibt sich die Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion als ideales Anfahrverfahren ohne herrschende Grundwasserdrücke. Ist jedoch der Platzanspruch im Startschacht von besonderer Relevanz, kann eine Anfahrt mit

verankertem Tübbingring legitim sein. Als Optimum der Ausfahrverfahren präsentiert sich die Ausfahrt auf eine Schildwiege.

Müssen im Zuge der Anfahr- und Ausfahrverfahren vorherrschende Wasserdrücke bewältigt werden, so ergibt sich ein anderes Bild. Die geringsten Anforderungen an die einzuhaltenden Toleranzen werden bei der Anfahrt aus einem Betontopf gestellt. Auch bei der Ausfahrt in einen solchen oder einen wassergefüllten Zielschacht werden keine hohen Toleranzforderungen gestellt. Den geringsten Platzbedarf im Startschacht hat die Fliegende Schildanfahrt. Sämtliche Ausfahrverfahren weisen einen hohen Platzbedarf auf. Dieser ist bei der Ausfahrt in einen Dichttopf und der Ausfahrt in ein Schild Transfer System am geringsten. Der Startschacht kann bei der Fliegenden Schildanfahrt auf ein Minimum reduziert werden. Selbiges gilt für die Ausfahrt in einen Dichttopf und in einen wassergefüllten Zielschacht. Durch die herrschenden Wasserdrücke besteht ein generelles Risiko für etwaige Wassereinbrüche. Dieses kann bei der Anfahrt aus einem Betontopf oder einem Schild Transfer System jedoch minimiert werden. Die Ausfahrt in diese Elemente, sowie in einen gefluteten Zielschacht, weisen das geringste Risiko der Ausfahrverfahren auf. Die Bau- und Montagezeit bei der Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion und der Fliegenden Schildanfahrt sind am geringsten. Selbiges gilt für die Ausfahrt in einen Dichttopf und einen wassergefüllten Zielschacht. Die Anfahrt mittels Rücksteifkonstruktion und die Fliegende Schildanfahrt verursachen die geringsten Kosten der Anfahrverfahren bei drückendem Grundwasser. Die Ausfahrt in einen Dichttopf und in einen wassergefüllten Zielschacht stellen aus kostentechnischer Sicht das ideale Ausfahrverfahren dar.

Zusammenfassend kann die Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion und die Fliegende Schildanfahrt aus Sicht der wesentlichen betrachteten Punkte als Optimum gesehen werden. Die Ausfahrt in einen Dichttopf und einen wassergefüllten Zielschacht stellen hinsichtlich der meisten betrachteten Gesichtspunkte die idealen Ausfahrverfahren dar.

Aufgrund der hohen Kosten, die mit dem Tunnelvortrieb einhergehen, ist eine frühzeitige Anfahrt der Tunnelvortriebsmaschine erwünscht. Die Kosteneinsparung kann im Zuge der Auswahl des Anfahrvorganges berücksichtigt werden. Dadurch legitimieren sich höhere Kosten eines Anfahrverfahrens, welches einen früheren Tunnelvortrieb ermöglicht. Die Anzahl an Anfahr- und Ausfahrvorgängen sollte bei den Überlegungen des best geeigneten Verfahrens ebenfalls berücksichtigt werden. Manche Verfahren weisen einen höheren Anteil an wiederverwendbarem Material auf. Dadurch relativieren sich höhere Kosten im Zuge der mehrmaligen Verwendung. Dies trifft besonders auf Stahlbaukonstruktionen zu, welche in der Regel mehrmals im Zuge eines Tunnelbauprojekts verwendet werden können.

5.2 Ausblick

Die Analyse der verschiedenen Anfahr- und Ausfahrverfahren hat jene Punkte offenbart, in denen Verbesserungspotenzial für die Zukunft besteht. Ein solcher wesentlicher Punkt sind die Start- und Zieldichtung. Diese werden aktuell meist anhand von Erfahrungswerten aus früheren Projekten und unter Zuhilfenahme ebener statischer FEM-Berechnungen dimensioniert. Diese Vorgehensweise ist allerdings derzeit nicht einheitlich geregelt. Eine solche deckungsgleiche Regelung aller eingesetzten Dichtungen wäre in Zukunft jedoch wünschenswert. Dadurch könnte eine bessere Vergleichbarkeit der Dichtungssysteme gewährleistet werden. Eine einheitliche Prüfung der Dichtungen in einem Praxistest wäre zukünftig ebenfalls wünschenswert.

Zu einem späteren Zeitpunkt anzudenken ist auch die Erstellung eines Merkblatts, als Leitfaden bei der Auswahl des best geeigneten Anfahr- oder Ausfahrvorgangs. Dabei muss die Wahl stets aufgrund projektspezifischer Aspekte erfolgen. So sind wesentliche Parameter wie beispielsweise der herrschende Wasserdruck, die Anzahl der Anfahr- und Ausfahrvorgänge oder das akzeptable

Risiko zu berücksichtigen. Damit sollte ein allgemein besseres Verständnis für die Komplexität dieser Prozesse geschaffen werden und deren Stellenwert auch in frühen Projektphasen, wie etwa im Zuge der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen, hervorgehoben werden.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Literatur

- [1] D. Adam. *Studienunterlagen zur Vorlesung Fels- und Tunnelbau*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, 2016. 424 S.
- [2] D. Adam. *Studienunterlagen zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, 2016. 1035 S.
- [3] S. Assenmacher. „Fliegende Schildanfahrt: Innovatives Anfahrverfahren für Tunnel im Schildvortriebsverfahren“. In: *tunnel-online, Nord-Süd Stadtbahn Köln* (März 2007), S. 55. URL: https://www.nord-sued-stadtbahn.de/downloadRepository/sonderdruck_tunnel_kv.pdf (Zugriff am 15.05.2022).
- [4] BAUER Maschinen GmbH. *HDI Bauer Hochdruckinjektion*. 2021. URL: https://www.bauer.de/export/shared/documents/pdf/bma/datenblatter/HDI_Hochdruck%5C%5Cinjektion_DE-EN_905_760_1_2.pdf (Zugriff am 31.07.2022).
- [5] BuM Beton- und Monierbau GmbH. *BULLFLEX®*. 2022. URL: <https://www.bumherten.de/bullflex-102.html> (Zugriff am 21.08.2022).
- [6] BuM Beton- und Monierbau GmbH. *BULLFLEX®-O-Ring-Abdichtung als Startdichtung (Eisenbahn), Botlekunnel, Rotterdam, Niederlande*. URL: <https://www.bumherten.de/files/bilder-bumherten/7.BULLFLEX®/7.4O-Ring-Abdichtungen/O-Ring5-b.jpg> (Zugriff am 23.05.2022).
- [7] BuM Beton- und Monierbau GmbH. *BULLFLEX®-O-Ring-Abdichtung als Startdichtung im U-Bahn-Bau, Hongkong*. URL: <https://www.bumherten.de/files/bilder-bumherten/7.BULLFLEX®/7.4O-Ring-Abdichtungen/O-Ring1-b.jpg> (Zugriff am 23.05.2022).
- [8] BuM Beton- und Monierbau GmbH. *BULLFLEX®-O-Ring-Abdichtung im Rohrvortrieb, Zielschacht Portland, OR, USA*. URL: <https://www.bumherten.de/files/bilder-bumherten/7.BULLFLEX®/7.4O-Ring-Abdichtungen/O-Ring3-b.jpg> (Zugriff am 29.05.2022).
- [9] China Railway Construction Heavy Industry Corporation Limited – CRCHI. *Single shield TBM*. URL: <https://www.cccme.cn/products/detail-8282286.aspx> (Zugriff am 23.03.2022).
- [10] China Railway Construction Heavy Industry Corporation Limited – CRCHI. *Slurry TBM*. URL: <https://www.cccme.cn/products/detail-8281819.aspx> (Zugriff am 24.03.2022).
- [11] CREG TBM Germany GmbH. *Slurry TBM*. URL: <https://www.creg-germany.com/slurry-tbm> (Zugriff am 24.03.2022).
- [12] CREG TBM Germany GmbH. *TBM Cutter*. URL: <https://www.creg-germany.com/tbm-cutter> (Zugriff am 31.03.2022).
- [13] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V. *Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen*. 2013. URL: <https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec2/gtcrec12d.pdf> (Zugriff am 08.04.2022).

- [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V. *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen*. 2021. URL: https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec1/DAUB_2021-03_Empfehlungen_zur_Auswahl_von_%5C%5CTunnelbohrmaschinen.pdf (Zugriff am 13.03.2022).
- [15] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V. *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen*. 2010. URL: <https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/withdrawn/gtcrec11.pdf> (Zugriff am 13.03.2022).
- [16] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V. *Recommendations for Face Support Pressure Calculations for Shield Tunnelling in Soft Ground*. 2016. URL: <https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec1/gtcrec10.pdf> (Zugriff am 22.03.2022).
- [17] DSI Underground GmbH. *Bullflex - Structural Sealings, Powerful in Action*. 2021. URL: <https://www.dsiunderground.at/fileadmin/downloads/dsi-underground.at/dsi-underground-bullflex-structural-sealings-en.pdf> (Zugriff am 19.05.2022).
- [18] F. Erritt. *Am Markt ist die Betonage des Betontopfes in vollem Gange*. URL: <http://www.citytunnelleipzig.info/jahr2007/oktober/20071011-19.jpg> (Zugriff am 07.06.2022).
- [19] F. Erritt. *Am Wilhelm-Leuschner-Platz schaut die TBM nun aus dem Topf*. URL: <http://www.citytunnelleipzig.info/jahr2007/juli/20070717-11.jpg> (Zugriff am 07.06.2022).
- [20] F. Erritt. *der Deckel wird angehoben*. URL: <http://www.citytunnelleipzig.info/jahr2007/juli/20070712-21.jpg> (Zugriff am 07.06.2022).
- [21] F. Erritt. *Markt Nordseite der Betonblock ist eingeschalt*. URL: <http://www.citytunnelleipzig.info/jahr2007/oktober/20071017-13.jpg> (Zugriff am 07.06.2022).
- [22] F. Erritt. *Startblock*. URL: <http://www.citytunnelleipzig.info/planung/startblock140x.gif> (Zugriff am 07.06.2022).
- [23] F. Erritt. *Startblock*. URL: http://www.citytunnelleipzig.info/planung/startblock_markt1000.gif (Zugriff am 07.06.2022).
- [24] F. Erritt. *Startblock*. URL: <http://www.citytunnelleipzig.info/planung/zielblock1000x.gif> (Zugriff am 07.06.2022).
- [25] F. Erritt. *Zielblock*. URL: http://www.citytunnelleipzig.info/planung/zielblock_markt1000.gif (Zugriff am 07.06.2022).
- [26] T. Flath. „Bodenaustausch als Hilfsmaßnahme beim Schildvortrieb“. In: *Bautechnik* 81, Heft 1 (2004), S. 25–30.
- [27] T. Flath. „Der wassergefüllte Zielschacht“. In: *Bautechnik* 83, Heft 6 (2006), S. 410–415.
- [28] W. Friedemann, J.-R. Fennker, M. Schwitte und F. Otten. „Nord/Süd-Metrolinie Amsterdam – Schild Transfer System (STS)“. In: *Bautechnik* 90, Heft 3 (2013), S. 151–161.
- [29] G. Girmscheid. *Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus*. 3. Auflage. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2013. ISBN: 978-3-433-03047-9.
- [30] G. Goger. *Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 2021. 308 S.

- [31] Herrenknecht AG. *Abbauwerkzeuge*. URL: https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produnkte/04_Peripheral_Equipment/%5C%5C05_Abbauwerkzeuge/02_Content/01_content_abbauwerkzeuge.jpg (Zugriff am 13.04.2022).
- [32] Herrenknecht AG. *Doppelschild TBM*. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/doppelschild-tbm/> (Zugriff am 23.03.2022).
- [33] Herrenknecht AG. *Doppelschild-TBM*. URL: https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produnkte/01_Tunnelling/10_Doppelschild-TBM/03_ImageMap/01_imagemap_doppelschild_1.jpg (Zugriff am 16.03.2022).
- [34] Herrenknecht AG. *Einfachschild*. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/einfachschild-tbm/> (Zugriff am 23.03.2022).
- [35] Herrenknecht AG. *Einfachschild-TBM*. URL: https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produnkte/01_Tunnelling/09_Einfachschild-TBM/03_ImageMap/01_imagemap_einfachschild.jpg (Zugriff am 15.03.2022).
- [36] Herrenknecht AG. *EPB Schild*. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/epb-schild/> (Zugriff am 24.03.2022).
- [37] Herrenknecht AG. *Erddruckschild*. URL: https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produnkte/01_Tunnelling/07_EPB-Schild/03_ImageMap/01_imagemap_epb_1.png (Zugriff am 16.03.2022).
- [38] Herrenknecht AG. *Gripper-TBM*. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/gripper-tbm/> (Zugriff am 23.03.2022).
- [39] Herrenknecht AG. *Gripper-TBM*. URL: https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produnkte/01_Tunnelling/11_Gripper-TBM/03_ImageMap/01_imagemap_gripper.jpg (Zugriff am 14.03.2022).
- [40] Herrenknecht AG. *Mixschild*. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/mixschild/> (Zugriff am 16.03.2022).
- [41] Herrenknecht AG. *Mixschild*. URL: https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produnkte/01_Tunnelling/08_Mixschild/03_ImageMap/01_imagemap_mixschild_1.jpg (Zugriff am 16.03.2022).
- [42] Herrenknecht AG. *Multi Mode TBM*. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/multi-mode-tbm/> (Zugriff am 24.03.2022).
- [43] B. Hoffmann, S. Fleischmann und F. Gössl. „Unterfahrung des Suezkanals in Port Said“. In: *tunnel-online* 05, 2018 (2018).
- [44] Implenia AG. *Tübbingfabrik - Limoges Fourches*. URL: https://implenia.com/fileadmin/_processed_/1/b/csm_Prefa_Limoges_Fourches_-_19-min_9146249dd1.jpg (Zugriff am 13.04.2022).
- [45] U. Kirsten, S. Assenmacher und G. Reimann. *Flying Launch – Ein innovatives Anfahrverfahren für TBM hat sich bewährt*, In: *Maschinen und Verfahren für den Bergbau und Spezialtiefbau*. 1. Auflage. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, 2015. ISBN: 978-3-86012-513-7.
- [46] KREBS+KIEFER Service GmbH. *Der Schildschwanz in der Schildwiege mit Dichttopf und Anfahrkonstruktion*. URL: https://www.kuk.de/fileadmin/user_upload/news/pics/236-org6.jpg (Zugriff am 28.06.2022).
- [47] A. Kropik. *Baukalkulation, Kostenrechnung und ÖNORM B 2061*. 1. Auflage. Wien: Univ.-Prof. DI Dr. Andreas Kropik, 2020. ISBN: 978-3-950-42981-7.

- [48] B. Maidl. *Faszination Tunnelbau – Geschichte und Geschichten, ein Sachbuch*. 1. Auflage. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2018. ISBN: 978-3-433-03113-1.
- [49] B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl und G. Wehrmeyer. *Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb*. 2. Auflage. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2011. ISBN: 978-3-433-02948-0.
- [50] R. Oberhäuser. *Die in die Grube eingefahrene Vortriebsmaschine kam wie ein U-Boot zum Vorschein, als das Wasser rausgepumpt wurde*. URL: <https://blog.eglv.de/wp-content/uploads/2015/06/EGRT20150609D056-800.jpg> (Zugriff am 23.06.2022).
- [51] ÖBV. *Richtlinie Schildvortrieb*. Forschungsber. Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2009. 88 S.
- [52] ÖGG. *Richtlinie für die Geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb*. Forschungsber. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2014. 50 S.
- [53] ÖGG. *Richtlinie für die Geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb*. Forschungsber. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2021. 66 S.
- [54] ÖNORM B 2203-2: 2022-01-15. *ÖNORM B 2203-2: Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm – Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [55] ÖNORM B 4710-1: 2018-01-01. *ÖNORM B 4710-1: Beton – Festlegung, Eigenschaft, Herstellung, Verwendung und Konformität – Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [56] ÖNORM EN 1537: 2015-10-15. *ÖNORM EN 1537: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Verpressanker*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [57] Robbins-Headquarters. *Disc Cutters*. 2014. URL: https://www.robbinstbm.com/wp-content/uploads/2017/04/DiscCutters_SpecSheet_V3.pdf (Zugriff am 31.03.2022).
- [58] Robbins-Headquarters. *Double Shield TBM*. URL: <https://www.robbinstbm.com/products/tunnel-boring-machines/single-shield/> (Zugriff am 23.03.2022).
- [59] Robbins-Headquarters. *Earth Pressure Balance*. URL: <https://www.robbinstbm.com/products/tunnel-boring-machines/earth-pressure-balance/> (Zugriff am 24.03.2022).
- [60] Robbins-Headquarters. *EPB TBMs – Earth Pressure Balance Machines*. 2017. URL: https://www.robbinstbm.com/wp-content/uploads/2017/05/EPB6-7m_March.27.2017.pdf (Zugriff am 24.03.2022).
- [61] Robbins-Headquarters. *Main Beam TBM*. URL: <https://www.robbinstbm.com/products/tunnel-boring-machines/main-beam/> (Zugriff am 23.03.2022).
- [62] Robbins-Headquarters. *Single Shield TBM*. URL: <https://www.robbinstbm.com/products/tunnel-boring-machines/single-shield/> (Zugriff am 23.03.2022).
- [63] F. Schütz. *Schildvortriebsmaschine in Moosach*. URL: https://www.u-bahn-muenchen.de/bild/sehrgross/u3n_mo_16.u-bahn-munchen-schildvortriebsmaschine-in-moosach.jpg (Zugriff am 16.05.2022).
- [64] F. Schütz. *Tunnelbauschild im Bahnhof Moosach*. URL: https://www.u-bahn-muenchen.de/bild/sehrgross/u3n_mo_20.u-bahn-munchen-schildvortriebsmaschine-in-moosach.jpg (Zugriff am 16.05.2022).
- [65] J. Schwarz. „Dichtkörper beim maschinellen Tunnelbau“. In: Geotechniktag: Verfestigungskörper im Boden und Untergrundverbesserung (18. Feb. 2005). Technische Universität München, 2005.

- [66] J. Schwarz und N. Mörchen. *Innovative Lösungen zur Erzielung der Dichtigkeit bei Start- und Zielsituationen beim Schildvortrieb*, In: *Heft 42, Vorträge zum 4. Hans Lorenz Symposium*. 1. Auflage. Berlin: Technische Universität Berlin, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, 2008. 244 S. ISBN: 978-3-8322-7597-6.
- [67] J. Schwarz, N. Mörchen, J. Schmidt und P. Schütz. *Wirksamkeit von Brillendichtungssystemen bei Ein- und Ausfahrtvorgängen unter hohem Wasserdruck – Stand der Technik und neue Entwicklungen*, In: *Vortrag auf der STUVA - Tagung 2007 in Köln*. 2007. URL: https://docplayer.org/storage/71/64069765/1652868536/1ez_YQH8YD78H5FhNx4LnQ/64069765.pdf (Zugriff am 18.05.2022).
- [68] S. P. Silvestre. „Elektrokoagulation zur Trennung von gebrauchten Bentonitsuspensionen im Tunnelbau“. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, 2015.
- [69] Strabag AG. *Baustellenfotos der Tunnelkette Perschling. interne Abbildungen*. Tunnelling Division, 7. Juli 2022.
- [70] Strabag AG. *Konsole zur Verankerung eines Tübbingrings. interne Notiz*. Tunnelling Division, 26. Apr. 2022.
- [71] Strabag AG. *Mündliche Besprechung*. Tunnelling Division, 22. Juni 2022.
- [72] Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V. *Empfehlung für Dichtungsrahmen in Tübbingauskleidungen*. 2019. URL: https://www.stuva.de/downloads/publikationen/pdf/FP54_highRes.pdf (Zugriff am 13.04.2022).
- [73] Theodor Cordes GmbH & Co. KG. *CTS Seals for Tunnel Construction*. 2017. URL: https://www.cordes.de/PDF_2020_dt/CTS_Brochure_2017_Z.pdf (Zugriff am 09.06.2022).
- [74] Theodor Cordes GmbH & Co. KG. *CTS Startdichtungen für den Tunnelbau. Systemskizzen*. 31. Mai 2022.
- [75] ÖBBV Richtlinie: 2009-08. *Tübbingsysteme aus Beton*. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik – ÖVBB. Wien.
- [76] TunnelPro S.r.l. *TBM Launch & Translation*. URL: https://tunnelpro.it/sites/tunnelpro/files/2019-12/img_2138_mod.jpg (Zugriff am 07.06.2022).
- [77] Europäische Patentschrift: 2008-02. *Verfahren und Vorrichtung zur Schildanfahrt für die Herstellung von Tunnelröhren mittels Schildvortrieb*. Europäische Patentorganisation. München.
- [78] Europäische Patentschrift: 2007-05. *Vorrichtung und Verfahren für die Schildanfahrt und die Schildausfahrt*. Europäische Patentorganisation. München.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen (Quelle: modifiziert nach [15] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)	20
Abb. 2.2:	offene Tunnelbohrmaschine (Quelle: [39] Herrenknecht AG)	23
Abb. 2.3:	Tunnelbohrmaschine mit Schild (Quelle: [35] Herrenknecht AG)	24
Abb. 2.4:	Doppelschildmaschine (Quelle: [33] Herrenknecht AG)	26
Abb. 2.5:	Mixschild (Quelle: [41] Herrenknecht AG)	28
Abb. 2.6:	Erddruckschild (Quelle: [37] Herrenknecht AG)	30
Abb. 2.7:	Bohrkopf mit verschiedenen Abbauwerkzeugen (Quelle: [31] Herrenknecht AG)	37
Abb. 2.8:	Aufgeklebtes Abdichtungsprofil (Quelle: [72] Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V.)	51
Abb. 2.9:	Verankertes Abdichtungsprofil (Quelle: [72] Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V.)	52
Abb. 2.10:	Tübbing mit Schalung (Quelle: [44] Implenia AG)	54
Abb. 3.1:	Ausbildungsmöglichkeit eines verankerten Tübbingrings (Quelle: modifiziert nach [70] Strabag AG)	60
Abb. 3.2:	Schildwiege (Quelle: [43] Hoffmann et al.)	62
Abb. 3.3:	Stahlkonstruktion zur Begrenzung der horizontalen Verformung der Blindringe (Quelle: [46] KREBS+KIEFER Service GmbH)	63
Abb. 3.4:	Ablaufschema des Anfahrvorganges mittels Rücksteifkonstruktion (Quelle: modifiziert nach [22] Erritt)	64
Abb. 3.5:	Längsschnitt eines Anfahrvorganges mittels A-Bock (Quelle: modifiziert nach [70] Strabag AG)	64
Abb. 3.6:	Anfahrvorgang mittels Rücksteifkonstruktion (Quelle: [76] TunnelPro S.r.l.)	65
Abb. 3.7:	Durchfahrsequenz durch eine Startbrille (Quelle: modifiziert nach [70] Strabag AG)	68
Abb. 3.8:	Doppellippendichtungen (Quelle: [74] Theodor Cordes GmbH & Co. KG) . .	69
Abb. 3.9:	Einfachlippendichtungen (Quelle: [74] Theodor Cordes GmbH & Co. KG) . .	70
Abb. 3.10:	Maximale Druckbeständigkeit in Abhängigkeit der Spaltweite und des Durchmessers (Quelle: [17] DSI Underground GmbH)	71
Abb. 3.11:	Einbau der Schlauchdichtung in der Startbrille (Quelle: [7] BuM Beton- und Monierbau GmbH und [6] BuM Beton- und Monierbau GmbH)	72
Abb. 3.12:	Anfahrvorgang mit vorgelagertem Dichtblock (Quelle: modifiziert nach [67] Schwarz et al.)	74
Abb. 3.13:	Funktionsprinzip der fliegenden Schildanfahrt (Quelle: [45] Kirsten et al., S. 101)	76
Abb. 3.14:	Fliegende Schildanfahrt (Quelle: [64] Schütz und [63] Schütz)	78
Abb. 3.15:	Betontopf des City-Tunnel Leipzig (Quelle: [18] Erritt und [21] Erritt)	79
Abb. 3.16:	Ablaufschema des Anfahrvorganges mittels Betontopf (Quelle: modifiziert nach [23] Erritt)	80
Abb. 3.17:	Aufbau des STS (Quelle: [28] Friedemann et al.)	82
Abb. 3.18:	Hub des STS über eine Stufe (Quelle: [28] Friedemann et al.)	83
Abb. 3.19:	Schildtransfer der TBM-S der Tunnelkette Perschling (Quelle: [69] Strabag AG)	84

Abb. 3.20:	Ausfahrt der TBM-S der Tunnelkette Perschling (Quelle: [69] Strabag AG)	85
Abb. 3.21:	Aktivierbare Elastomerdichtung (Quelle: [73] Theodor Cordes GmbH & Co. KG)	86
Abb. 3.22:	Zielschachtabdichtung eines Rohrvortriebs mittels Schlauchabdichtung (Quelle: [8] BuM Beton- und Monierbau GmbH)	87
Abb. 3.23:	Dichttopf des City-Tunnel Leipzig (Quelle: [20] Eritt und [19] Eritt)	88
Abb. 3.24:	Ablaufschema des Ausfahrvorganges mittels Dichttopf (Quelle: modifiziert nach [24] Eritt)	89
Abb. 3.25:	Ablaufschema des Ausfahrvorganges mittels Betontopf (Quelle: modifiziert nach [25] Eritt)	91
Abb. 3.26:	Zielkonstruktion des STS (Quelle: [28] Friedemann et al.)	92
Abb. 3.27:	Wassergefluteter Zielschacht (Quelle: [50] Oberhäuser)	92
Abb. 3.28:	Ablaufschema des Ausfahrvorganges in einen wassergefüllten Zielschacht (Quelle: modifiziert nach [27] Flath)	93
Abb. 4.1:	Bauzeitplan der Anfahrt aus einem Betontopf (Verfahrensspezifische Vorgänge sind hervorgehoben)	109
Abb. 4.2:	Bauzeitplan der Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille (Verfahrensspezifische Vorgänge sind hervorgehoben)	112
Abb. 4.3:	Bauzeitplan der Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und vertikal hergestelltem Dichtblock (Verfahrensspezifische Vorgänge sind hervorgehoben)	115
Abb. 4.4:	Bauzeitplan der Anfahrt mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und horizontal hergestelltem Dichtblock (Verfahrensspezifische Vorgänge sind hervorgehoben)	116
Abb. 4.5:	Zusammenfassung der Kalkulationsergebnisse	118
Abb. 4.6:	Gegenüberstellung der Materialkosten der Verfahren	121
Abb. 4.7:	Gegenüberstellung des Wiederverwendbarkeitsanteils der Verfahrensmaterialkosten	122

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Einordnung von Tunnelvortriebsmaschinen (Quelle: modifiziert nach [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)	21
Tab. 2.2:	Vergleich gängiger Abkürzungen von Tunnelvortriebsmaschinen	21
Tab. 2.3:	RMR-Klassifizierung in Abhängigkeit der Standfestigkeit (Quelle: modifiziert nach [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)	32
Tab. 2.4:	Einsatzbereiche der TVM im Lockergestein (Quelle: modifiziert nach [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)	33
Tab. 2.5:	Einsatzbereiche der TVM im Festgestein (Quelle: modifiziert nach [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)	34
Tab. 2.6:	Verpressmörtelrezepturen (Quelle: modifiziert nach [49] Maidl et al., S. 181 f.)	41
Tab. 2.7:	Einsatzbereich verschiedener Injektionsmittel (Quelle: modifiziert nach [49] Maidl et al., S. 186 f.)	44
Tab. 2.8:	Herstellungstoleranzen von Tübbing (Quelle: modifiziert nach [13] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen – DAUB – e. V.)	57
Tab. 3.1:	Technische Daten eines BULLFLEX® Schlauches (Quelle: modifiziert nach [17] DSI Underground GmbH)	72
Tab. 3.2:	Zusammenfassung der Anfahr- und Ausfahrverfahren	94
Tab. 4.1:	Detaillierter Vergleich der Anfahr- und Ausfahrverfahren außerhalb des GW	98
Tab. 4.2:	Detaillierter Vergleich der Anfahr- und Ausfahrverfahren bei drückendem GW	100
Tab. 4.3:	Projektrandbedingungen des Beispielprojekts	102
Tab. 4.4:	Kalkulationsannahmen (Basierend auf: [47] Kropik, S. 742 ff. und [71] Strabag AG)	104
Tab. 4.5:	Wesentliche Konstruktionselemente der Verfahren (Basierend auf: [71] Strabag AG)	106
Tab. 4.6:	Kalkulation des Anfahrvorganges aus einem Betontopf mittels der Annahmen aus Tab. 4.4 und Tab. 4.5	108
Tab. 4.7:	Kalkulation des Anfahrvorganges mit Rücksteifkonstruktion und Startbrille mittels der Annahmen aus Tab. 4.4 und Tab. 4.5	111
Tab. 4.8:	Kalkulation des Anfahrvorganges mit Rücksteifkonstruktion, Startbrille und Dichtblock mittels der Annahmen aus Tab. 4.4 und Tab. 4.5	114
Tab. 4.9:	Zusammenfassung der wesentlichen Kalkulationsergebnisse der unterschiedlichen Anfahrverfahren	118
Tab. 4.10:	Vergleich der fiktiven Kosten unter Berücksichtigung der verspäteten Anfahrt	123
Tab. 5.1:	Gegenüberstellung verschiedener gängiger Abkürzungen von Tunnelvortriebsmaschinen	128
Tab. 5.2:	Auflistung der bedeutendsten Anfahr- und Ausfahrverfahren für Tunnelvortriebsmaschinen	129