

Diploma Thesis

Analysis of performance with project-specific data in mechanized-tunneling

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

Diplomarbeit

Leistungsbetrachtung anhand projektspezifischer Prozessdaten im maschinellen Tunnelbau

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

von

Alexander Bender, BSc

Matr.Nr.: 01228744

unter der Anleitung von

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

Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Tobias Bisenberger, BSc**

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

Wien, im März 2020



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, Projektanalyse, Ausschreibung, Kalkulation, Bauausführung, Vortriebsleistung

Gegenständliche Diplomarbeit ist im Rahmen der Forschungstätigkeit des Instituts für interdisziplinäres Bauprozessmanagement – Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik der TU Wien entstanden. Die Forschung beschäftigt sich mit der Entwicklung eines *innovativen Vertrags- und Vergütungsmodells für den maschinellen Tunnelbau*, welches eine bessere Verknüpfung zwischen Maschinendaten aus dem Tunnelvortrieb und abrechenbaren Leistungen schaffen möchte. Dabei spielt die Digitalisierung im Baubetrieb eine wesentliche Rolle. Über Prozessdaten, welche auf Basis des Vortriebes entweder automatisch oder manuell generiert werden, kann eine Vergütung der Leistungen nach tatsächlichen Aufwendungen erfolgen. Die vorliegende Diplomarbeit vergleicht auf Basis abgewickelter Projekte eine vertraglich vereinbarte Bauzeit und den kalkulierten Leistungen mit der tatsächlichen Bauzeit und den abgerechneten Leistungen. Damit wird einerseits die aktuelle baubetriebliche Vorgehensweise der Abrechnung skizziert, andererseits das Potential der Nutzung von Maschinendaten im Rahmen der Leistungsvergütung dargelegt.

Zu Beginn werden die verschiedenen Typen von Tunnelvortriebsmaschinen aufgezeigt, dabei finden vor allem technische Spezifikationen und die Eignung unter geologischen Rahmenbedingungen Eingang. Die Wahl der *richtigen* Maschine ist essentiell für den gesamten Bauverlauf und die Langlebigkeit des Bauwerkes im Sinne der Sicherheits- und Auskleidungsmaßnahmen. Außerdem folgt eine Erläuterung der *ÖNORM B 2203-2*, in dieser werden Verfahrens- und Vertragsbestimmungen für den maschinellen Tunnelbau in Österreich geregelt.

Anschließend werden die zur Analyse gelangten Tunnelbauprojekte vorgestellt. Neben generellen Projektparametern wie Länge, Durchmesser, Neigung, Verwendungszweck und Ausbau werden die projektspezifischen geologischen Situationen dargelegt. Ebenfalls wird Bezug auf den zum Einsatz kommenden Maschinentyp genommen. Für alle Projekte folgt eine detaillierte Analyse der Ausschreibungen von nationalen bzw. internationalen Auftraggebern und den Kalkulationen des Auftragnehmers. Hier gilt es, angebotene Leistungen darzustellen und allfällige projektspezifische Besonderheiten aufzuzeigen. Im nächsten Schritt gelangt die Ausführung zur genaueren Betrachtung. Dabei wird auf Regelvortriebsleistungen, Vortriebsunterbrechungen, ausgeschriebene und zusätzliche Erschwernisse und sonstige abrechnungstechnische Gegebenheiten näher eingegangen. Parallel dazu erfolgt eine statistische Auswertung der im Vortriebsverlauf aufgezeichneten Maschinendaten. Dadurch können aussagekräftige Erkenntnisse im Rahmen dieser Arbeit gewonnen werden. Anschließend wird ein Vergleich zwischen Soll und Ist erarbeitet. Das Soll entspricht dabei Ausschreibung und Kalkulation, das Ist der Abrechnung und tatsächlichen Leistung in der Bauausführung. Dies basiert auf einer Gegenüberstellung von Vorgangszeiten (z.B. Regelvortrieb, Vortriebsunterbrechung, Erschwernisse, etc.) und der Ermittlung von Durchschnittsleistungen anhand aussagekräftiger Analysestrecken. Des Weiteren sind für jedes Projekt über deren verschiedenen Vortriebs- bzw. Ausbauklassen statistische Kennwerte zur Vortriebsleistung angegeben. Zu guter Letzt wird versucht, auf Grundlage der durchgearbeiteten Vortriebe Leistungswerte in Bezug auf Maschinenvariante, Bohrdurchmesser und Geologie aufzuzeigen. Außerdem erfolgt eine Analyse der Verhältnisse zwischen Regel- und Sondermaßnahmen im Verlauf eines Tunnelvortriebes und eine Bewertung von Abweichungen der Ausschreibung zur Abrechnung hinsichtlich projektspezifischer Vorgangszeiten.



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 tunnel construction, project analysis, tender, calculation, construction, tunneling performance

This diploma thesis is created as part of the research activities of the Institute for Interdisciplinary Building Process Management – Research Unit Building Operations and Building Process Engineering at the TU Wien. Research is concerned with the development of an *innovative contract and remuneration model for mechanical tunnel construction*. In mechanical tunnel construction this model wants to create a better link between machine data from tunneling and billing of services. Digitization plays an important role in construction operations. Process data, which is generated either automatically or manually, can be used to remunerate the services based on actual expenses. The present diploma thesis compares a contractually agreed construction time with the actual construction time and the billing based on actually completed projects. On the one hand, this work outlines the current construction procedure for billing, and on the other hand, the potential of using machine data as part of the performance remuneration is outlined.

At the beginning, the different types of tunnel boring machines used are presented. Above all, technical specifications and suitability in certain geological framework conditions are included. The choice of the *right* machine is essential for the entire construction process and the longevity of the structure in terms of the usability of safety and lining measures. There is also a detailed explanation of the Austrian code *ÖNORM B 2203-2*, which regulates essential procedural and contractual provisions for mechanical tunnel construction in Austria. Geotechnical planning and remuneration in particular are examined in more detail.

This is followed by the presentation of the tunnel construction projects which have been analyzed. First of all, general project parameters such as length, diameter, inclination, intended use and expansion are dealt with. Then, the project-specific geological situations are shown. Finally, reference is made to the machine type used and its requirements defined in advance. For all projects presented, a detailed analysis of the tenders of national and international clients and the calculations of the bidder or subsequent contractor follows. Here, it is important to present the offered services and to show any project-specific features. In the next step, the execution is analyzed. Thereby, regular tunneling services, tunneling interruptions, advertised and additional difficulties, and other billing-related facts are dealt with in more detail. At the same time, the machine data recorded in the course of the tunneling is statistically evaluated along the entire course of the construction. This helps to gain meaningful insights in the context of this work. Then, a comparison is worked out. The target corresponds to the tender and calculation, the actual billing and actual performance in the construction. This is based on a comparison of process times (e.g. regular driving, interruption of driving, difficulties, etc.) and the determination of average performance based on meaningful analysis routes. Furthermore, statistical parameters for the jacking performance are given for each project via their different jacking or expansion classes. Finally, an attempt is made to show performance values in relation to the machine variant, drilling diameter and geology on the basis of the excavations worked through. In addition, there is an analysis of the relationships between standard and special measures during tunneling and an assessment of deviations from the tender for billing with regard to project-specific process times.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 9 |
| 1.1 | Ausgangssituation der Beteiligten und Arbeitsauftrag | 9 |
| 1.2 | Motivation | 10 |
| 1.3 | Forschungsfragen | 10 |
| 1.4 | Forschungsmethodik | 11 |
| 1.5 | Begriffsbestimmungen | 12 |
| 1.6 | Abkürzungsverzeichnis | 16 |
| 2 | Charakteristika des maschinellen Tunnelvortriebes | 17 |
| 2.1 | Tunnelvortriebsmaschinen im Überblick | 17 |
| 2.1.1 | Tunnelbohrmaschinen (TBM) | 18 |
| 2.1.2 | Doppelschildmaschinen (DSM) | 19 |
| 2.1.3 | Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (SM-V) | 19 |
| 2.1.4 | Schildmaschinen mit Teilschnittabbau (SM-T) | 20 |
| 2.1.5 | Kombinationsschildmaschinen (KSM) | 21 |
| 2.2 | Überblick der Maschinenauswahl | 21 |
| 2.3 | Tunnelvortriebsmaschinen für den Datenauswertungsprozess | 22 |
| 2.3.1 | Offene Tunnelbohrmaschine – Gripper-TBM | 23 |
| 2.3.2 | Tunnelbohrmaschine mit Schild – TBM-S | 27 |
| 2.3.3 | Schildmaschine – SM | 29 |
| 2.3.4 | Doppelschildmaschine – DSM | 37 |
| 2.4 | Planung und Vergütung von Untertagebauten mit maschinellem Vortrieb | 39 |
| 2.4.1 | Geotechnische Planung | 40 |
| 2.4.2 | Ermittlung der Vortriebsklassen (relevante TVM-Typen) | 44 |
| 2.4.3 | Vergütung von Tunnelbauvorhaben laut ÖNORM B 2203-2 | 48 |
| 3 | Datengrundlagen von konkreten Tunnelbauprojekten | 54 |
| 3.1 | Projekt A | 54 |
| 3.1.1 | Projektparameter | 55 |
| 3.1.2 | Geotechnisch relevante Parameter | 56 |
| 3.1.3 | Tunnelbohrmaschine | 58 |
| 3.2 | Projekt B | 59 |
| 3.2.1 | Projektparameter | 60 |
| 3.2.2 | Geotechnisch relevante Parameter | 60 |
| 3.2.3 | Tunnelbohrmaschine | 62 |
| 3.3 | Projekt C | 62 |
| 3.3.1 | Projektparameter | 63 |
| 3.3.2 | Geotechnisch relevante Parameter | 63 |
| 3.3.3 | Tunnelbohrmaschine | 64 |
| 3.4 | Projekt D | 65 |
| 3.4.1 | Projektparameter | 65 |
| 3.4.2 | Geotechnisch relevante Parameter | 65 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.4.3 | Tunnelbohrmaschine | 66 |
| 3.5 | Projekt E | 66 |
| 3.5.1 | Projektparameter | 67 |
| 3.5.2 | Geotechnisch relevante Parameter | 68 |
| 3.5.3 | Tunnelbohrmaschine | 69 |
| 3.6 | Projekt F | 69 |
| 3.6.1 | Projektparameter | 69 |
| 3.6.2 | Geotechnisch relevante Parameter | 70 |
| 3.6.3 | Tunnelbohrmaschine | 70 |
| 3.7 | Gegenüberstellung Projektparameter | 71 |
| 4 | Bestimmung projektspezifischer Vortriebsleistungen anhand von Ausschreibungs- und Kalkulationsunterlagen | 73 |
| 4.1 | Vortriebskalkulation – Projekt A | 73 |
| 4.2 | Vortriebskalkulation – Projekt B | 74 |
| 4.2.1 | TVM Süd | 75 |
| 4.2.2 | TVM Nord | 77 |
| 4.3 | Vortriebskalkulation – Projekt C | 79 |
| 4.4 | Vortriebskalkulation – Projekt D | 79 |
| 4.5 | Vortriebskalkulation – Projekt E | 83 |
| 4.6 | Vortriebskalkulation – Projekt F | 89 |
| 4.7 | Gegenüberstellung Ausschreibung/Kalkulation | 92 |
| 5 | Bestimmung projektspezifischer Vortriebsleistungen mittels Datenanalyse der Bauausführung | 93 |
| 5.1 | Benötigte Bauzeit – Projekt A | 93 |
| 5.2 | Benötigte Bauzeit – Projekt B | 94 |
| 5.2.1 | Ausführung TVM Süd | 95 |
| 5.2.2 | Ausführung TVM Nord | 96 |
| 5.3 | Benötigte Bauzeit – Projekt C | 98 |
| 5.4 | Benötigte Bauzeit – Projekt D | 99 |
| 5.5 | Benötigte Bauzeit – Projekt E | 105 |
| 5.6 | Benötigte Bauzeit – Projekt F | 111 |
| 5.7 | Zwischenresümee zur Bauausführung | 119 |
| 6 | Leistungsanalyse und Soll – Ist-Leistungsvergleich | 121 |
| 6.1 | Leistungsanalyse – Projekt A | 121 |
| 6.1.1 | Vortrieb 1 | 122 |
| 6.1.2 | Vortrieb 2 | 123 |
| 6.2 | Leistungsanalyse – Projekt B | 123 |
| 6.2.1 | TVM Süd | 124 |
| 6.2.2 | TVM Nord | 127 |
| 6.3 | Leistungsanalyse – Projekt C | 130 |
| 6.4 | Leistungsanalyse – Projekt D | 131 |
| 6.5 | Leistungsanalyse – Projekt E | 134 |
| 6.6 | Leistungsanalyse – Projekt F | 138 |
| 6.7 | Zwischenresümee zur Leistungsanalyse | 142 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | Fazit | 144 |
| 7.1 | Beantwortung der Forschungsfragen | 144 |
| 7.2 | Kernaussage | 155 |
| 7.3 | Ausblick | 155 |
| A | Arbeitsbereiche verschiedener Tunnelvortriebsmaschinen | 159 |
| A.1 | Bereiche einer TBM-O | 159 |
| A.2 | Bereiche einer DSM bzw. TBM-DS | 160 |
| B | Vortriebscodes der analysierten Tunnelvortriebsmaschinen | 161 |
| B.1 | Projekt D | 161 |
| B.2 | Projekt E | 162 |

Kapitel 1

Einleitung

Die Disziplin des Tunnelbaus ist in Österreich historisch gewachsen und hat dadurch große Tradition. Im Zuge großer Tunnelvortriebe wurden außergewöhnliche Leistungen von Mensch und Maschine vollbracht, um in den Bereichen Infrastruktur, Energie, Ver- und Entsorgung das tägliche Leben der Bevölkerung auf dem Stand der Technik zu halten oder zu verbessern. Tunnelbauprojekte stehen meist im öffentlichen Interesse und deren Verlauf wird in den Medien oft kritisch begutachtet. Dem Bauingenieur¹ fallen dabei technische, terminliche, monetäre und qualitative Verantwortungen solcher Projekte zur Aufgabe, diese sind demnach mit großen Herausforderungen verbunden.

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit Vortrieben des maschinellen (kontinuierlichen) Tunnelbaus, in denen Tunnelvortriebsmaschinen zum Einsatz kommen. Diese Forschungstätigkeit ist am Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement – Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik der TU Wien angesiedelt. Da es oft große zeitliche und monetäre Abweichungen der Tunnelvortriebe zwischen Ausschreibung/Kalkulation und Bauausführung gibt, sollen die Leistungen der Maschinen im Zuge dieser Arbeit genauer betrachtet, und damit verbunden, Leistungswerte ausgegeben werden. Auf Grund dessen, dass diese langgestreckten Linienbauwerke oft durch komplexe geologische Verhältnisse aufgefahren werden, ist jedes Projekt dementsprechend genau zu beleuchten, da oberflächliche Betrachtungen nur zu falschen Durchschnittsleistungen führen, die der Individualität einzelner Vortriebe nicht gerecht werden können.

Um Ergebnisse zu liefern, die dem täglichen Baubetrieb entsprechen basiert diese Arbeit, neben einer einleitenden Literaturrecherche, ausschließlich auf abgewickelten oder in Ausführung befindlichen Projekten. Die Überlegungen zu wissenschaftlichen Auswertungen resultieren aus der Zusammenarbeit zwischen dem Institut, Experten aus der Wirtschaft und dem Verfasser. Die Experten vertreten deren Standpunkte von Seiten der Auftraggeber, Auftragnehmer und Bauaufsicht, Ihnen allen sei an dieser Stelle herzlichst für die sehr gute und fördernde Zusammenarbeit gedankt.

Glück Auf!

1.1 Ausgangssituation der Beteiligten und Arbeitsauftrag

Aus Sicht der TIWAG besteht das Interesse in der Erstellung einer Diplomarbeit, welche sich mit den angenommenen Leistungswerten der Bieter im Zuge der Angebotsabgabe bei einem Tunnelbauprojekt befasst. Konkret soll aus einem aussagekräftigen Querschnitt an abgewickelten Tunnelbauprojekten mit kontinuierlichem Vortrieb (TVM-Einsatz) eine sinnvoll einsetzbare Möglichkeit erarbeitet werden, um die, den Angeboten zu Grunde liegenden Annahmen, der

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

Plausibilität nach kontrollieren zu können. Die Diplomarbeit widmet sich somit der Angebotskontrolle im Sinne des Ausschreibers bzw. der vergebenden Stelle. Um dies gewährleisten zu können, soll entsprechend der abgewickelten Projekte, ein möglichst breiter und hinreichend genauer Bereich an Leistungskennwerten von Tunnelvortriebsmaschinen erstellt werden, in welche folgende Parameter einfließen:

- Geologie/Gebirge
- Maschinentyp
- Ausbruchsdurchmesser
- Hublänge und Hubdauer
- Sicherungsmaßnahmen
- Störung des Regelbetriebes

Mit den Auswertungen der Daten können somit die Angebote, und damit die Kalkulationsannahmen, der Bieter gerechtfertigt, oder gegebenenfalls, bei großen Abweichungen, hinterfragt werden. Des Weiteren soll diese Diplomarbeit bei der Projektentwicklung eines Tunnelvortriebes mit Tunnelvortriebsmaschinen, im Zuge einer Abschätzung des Bauzeitbudgets des Bauherrn, mit ihren Ergebnissen eine Hilfestellung/Kontrollmöglichkeit bei den getroffenen Annahmen sein.

1.2 Motivation

Diese Diplomarbeit bietet die einmalige Chance, anhand von abgewickelten Projekten, Leistungen von Tunnelvortriebsmaschinen zu analysieren. Dabei soll vor allem die Geologie und der Maschinentyp näher betrachtet werden, um erkennbare Muster im Regelvortrieb und im Störfall zu bestimmen. Im Zuge der Planung eines Bauprojektes spielen Kosten und Bauzeit im Hinblick auf den geforderten Output die wahrscheinlich bedeutendste Rolle. Der gegenseitige Einfluss ist untrennbar miteinander verknüpft. Im Zuge eines Tunnelprojektes werden herausragende Ingenieurleistungen gefordert, um anhand der gegebenen Randbedingungen, von denen die Geologie wahrscheinlich die größte Rolle spielt, Zeitpläne aufzustellen und den monetären Gegebenheiten Rechnung zu tragen.

Aus diesem Zweck heraus ist es notwendig, Rückschlüsse aus abgewickelten Baustellen zu ziehen, um vernünftige Ansätze für zukünftige Planungen zu treffen. Im maschinellen Tunnelbau liegt ein Hauptaugenmerk auf der Wahl einer für das Projekt geeigneten Maschinenvariante. Die Tunnelbohrmaschine hat somit unmittelbaren Einfluss auf Termin- und Kostentreue des gesamten Projekts. Anhand der berechneten Regelvortriebsleistungen in Abhängigkeit der Geologie und den nicht berechenbaren störungsbedingten Sondermaßnahmen, ergibt sich eine als ungenau zu bewertende Bauzeit für den maschinellen Tunnelvortrieb. Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Analyse von Vortriebsleistungen im Regelbetrieb und bei Störfällen unter zu Grunde Legung der Bestandsprojekte und soll genauere Aufschlüsse wiedergeben.

1.3 Forschungsfragen

Hiermit werden vier vorläufige Forschungsfragen, nach denen die Diplomarbeit aufgebaut wird, formuliert. Im Zuge der übermittelten Diskussionsgrundlage der Auftraggeber wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Tobias Bisenberger (Betreuer – TU Wien) die folgenden Fragestellungen erarbeitet:

1. Welche Vortriebsleistungen weisen die zur Verfügung gestellten Projekte im Regelvortrieb in Abhängigkeit des verwendeten Maschinentyps auf? Welche Prozesse der Tunnelvortriebsmaschinen können dabei aufgezeigt werden und wie variieren diese im Verlauf des Vortriebes?
2. Welche Vortriebsleistungen können über den gesamten Vortrieb unter Einbeziehung allfälliger Störungen und Erschwernissen aus der Gesamtbauzeit wiedergegeben werden. Wie stehen diese Leistungen im Verhältnis zur Ausschreibung/Kalkulation?
3. Bestimmung der Regel- und Sondervortriebszeiten anhand der ausgewerteten Projekte. Was kann aus gegebener Geologie für den jeweiligen Maschinentyp geschlossen werden?
4. Wie verändert sich der Zeitanteil von verschiedenen Arbeiten einer Tunnelbaustelle zwischen Angebot/Kalkulation und Bauausführung?

1.4 Forschungsmethodik

Um ein generelles Verständnis für den maschinellen Tunnelbau zu schaffen, widmet sich vorderer Teil der Arbeit den verschiedenen Maschinenvarianten und den in Österreich angewandten Ausschreibungsverfahren. Es wird vor allem mit umfassenden Literaturrecherchen gearbeitet, um für den Leser ein Basiswissen der verschiedenen Typen von Tunnelvortriebsmaschinen bereitzustellen. Die unterschiedlichen Varianten sind anschließend mit spezifischen geologischen Situationen verknüpft. Es wird Stellung zur Eignung verschiedener Maschinen im entsprechenden Baugrund genommen. Anschließend ist die in Österreich angewendete geotechnische Planung aufgezeigt. Hier ist der Planungsablauf Schritt für Schritt veranschaulicht, um den anspruchsvollen Weg von ersten Probebohrungen bis zur fertigen Ausschreibung zu skizzieren. Außerdem wird Bedacht auf die Vergütung von Tunnelvortrieben genommen, dabei beschreibt die Arbeit wichtigste Positionen eines Leistungsverzeichnisses für Projekte mit Tunnelvortriebsmaschine (TVM).

In Zusammenarbeit mit Auftraggebern und Auftragnehmern erfolgt die Datensammlung verschiedener Tunnelbauprojekte, welche die Grundlage dieser Arbeit bilden. Die Datenpakete bestehen aus Ausschreibungen, kalkulierten Leistungen, dem tatsächlichen Bauverlauf, abgerechneten Leistungen und Datenaufzeichnungen der TVM, den sogenannten Vortriebscodes. Die Vortriebscodes werden von den Maschinen entweder hubweise oder tageweise über den gesamten Projektverlauf aufgezeichnet. Diese dienen zur Auswertung sämtlicher statistischer Berechnungen dieser Diplomarbeit. Für die Forschungstätigkeit ist es wichtig sämtliche Leistungen der Projekte nachvollziehbar darzulegen, um für künftige Ausschreibungen als Anhaltspunkt zur Seite stehen zu können. Aus Ausschreibungen und Kalkulationen wird in dieser Arbeit für jeden Vortrieb eine Soll-Leistung generiert. Dabei sind die einzelnen Hubzeiten und deren Prozesse genauso analysiert, wie sämtliche weitere Arbeiten eines maschinellen Tunnelvortriebes. Damit soll dem Leser ein ganzheitliches Bild der Möglichkeiten von Ausschreibungsgegenständen vermittelt werden.

Anschließend nimmt die Arbeit Eingang auf die Bauausführung, tatsächliche Leistungen und die Bauabrechnung. Hier gilt es besonders die großen Datenpakete der Vortriebsleistungen (MS Excel-Exporte) zu durchforsten und in die Diplomarbeit zu verpacken. Aus den analysierten Auswertungen kann das aufgetretene Ist an Zeitbedarf wiedergegeben werden.

Im nächsten Schritt werden Soll und Ist gegenübergestellt. Hier gilt es, einerseits jedes Projekt separat zu betrachten, andererseits aus der Gesamtheit der Projekte sinnvolle Rückschlüsse über Abweichungen zwischen Soll und Ist zu ziehen. Es wird versucht Durchschnittsleistungen für die gesamte Bauzeit je Maschinentyp und Geologie abzuleiten. Des Weiteren sind genauere Abschnittsanalysen durchgeführt, diese dienen einer besseren Leistungsdarstellung der Vortriebsmaschinen,

da sie frei von allfälligen Störungen im laufendem Vortrieb sind. Als Schlusswort dieser Diplomarbeit folgt auf Basis der analysierten Vortriebe die Gegenüberstellung aller Projekte und deren Vergleiche. Es wird versucht, die definierten Forschungsfragen mit den Forschungsergebnissen bestmöglich zu beantworten, um Empfehlungen an die Bauherren, Planer und Ausführenden weitergeben zu können.

1.5 Begriffsbestimmungen

Um einen einheitlichen Wortgebrauch betreffend Baubetrieb und maschinellen Tunnelbau sicherzustellen, werden im folgenden Abschnitt wichtige Begrifflichkeiten erläutert. Die Definitionen sind der ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 und den Werken von Girmscheid [24], Maidl et al. [33] und Goger [26] entnommen.

Ausbau Unter dem Begriff Ausbau versteht man die Stützung der Hohlraumlaibung. Im Falle eines einschaligen Ausbaus, muss dieser auch die Funktion der Innenschale übernehmen.² In Kombination mit dem Gebirge übernehmen die Ausbaumaßnahmen eine dauerhafte Stützung des Hohlraumes und bilden den gebrauchstauglichen inneren Abschluss der Tunnelschale.³

Auskleidung Die Auskleidung umfasst die Gesamtheit aus Ausbau und Innenschale.² Bei der Tunnelauskleidung wird zwischen einschaligen- und zweischaligen Varianten entschieden. Bei der einschaligen Tunnelauskleidung ist die temporäre Sicherung aus dem Bauzustand in die permanente Auskleidung integriert. Darunter fallen Spritzbetonschalen, Stahlfaserspritzbeton und die Tübbingauskleidung. Bei der zweischaligen Tunnelauskleidung kommt es zu einer Aufgabentrennung zwischen Außen- und Innenschale. Oft werden beide Abschnitten durch eine Abdichtungsebene getrennt. Hergestellt wird diese Bauweise entweder aus Spritzbetonsicherung, Abdichtung und Ortbetonauskleidung oder mittels Tübbingsicherung, Abdichtung und Ortbetonauskleidung.⁴

Bauzeitmodell Hier finden sich grundlegende Vorgaben in der Ausschreibung zur Ermittlung der vertraglichen Baudauer.²

Blockigkeit Die Blockigkeit beschreibt das Auftreten einer Auslösung großer Gesteinsbrocken aus dem Verband an der Ortsbrust. Diese Erschwernis kommt ausschließlich im Festgestein vor.²

Bohrbarkeit Unter diesem Begriff versteht man die Eigenschaft des Gesteins, dieses mit einer TVM zu lösen.² Die Bohrbarkeit (Drilling Rate Index, DRI) wird aus der einachsigen Gesteinsdruckfestigkeit und der Gesteinsart abgeleitet. Der DRI-Wert dient als Bestimmungsgröße zur Penetrationsermittlung.⁵

Bohrdurchmesser Die einzelnen Durchmesser einer TVM werden wie folgt unterschieden:²

effektiver Bohrdurchmesser (D_E) Der effektive Bohrdurchmesser ist der im laufenden Vortrieb gebohrte Durchmesser, welcher sich durch den Meisselverschleiß kontinuierlich verändert.

²Vgl. [37] ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01, S. 5

³Vgl. [24] Girmscheid, S. 43

⁴Vgl. [24] Girmscheid, S. 397 f.

⁵Vgl. [24] Girmscheid, S. 459 f.

maximaler Bohrdurchmesser (D_{ME}) Unter dem maximalen Bohrdurchmesser versteht man das maximale Außenmaß des Schneidrades (mit unabgenütztem Bohrwerkzeug) der vom Bieter angebotenen Tunnelvortriebsmaschine (TVM).

Nominaler Bohrdurchmesser (D_N) Der nominale Bohrdurchmesser wird vom Auftraggeber (AG) in der Ausschreibung festgelegt und darf unter laufendem Vortrieb nicht unterschritten werden.

Erektor Der Erektor dient zum Versetzen der Tübbinge im Zuge des Vortriebs. Er ist an der Außenkelly situiert und um 360° rotierbar. Das Versetzen der Tübbinge erfolgt mit Vakuumsaugplatten und Zentrierstiften.⁶

Erschwernis Unter einer Erschwernis versteht man anspruchsvollere Bedingungen im Laufe des Vortriebs, welche zu größeren Aufwendungen und einer schlechteren Vortriebsleistung führen. Diese sind im Allgemeinen nicht den Vertragspartnern geschuldet, sondern ergeben sich aus Gegebenheiten wie erhöhter Wasserzutritt, Blockigkeit, Klebrigkeit, Mixed Face-Bedingungen und fehlender Verspannbarkeit.²

Gripper Die Gripper, auch Verspannplatten oder Verspannsystem genannt, sind hydraulisch bewegliche, gekrümmte Platten, welche normal zur Tunnelachse an der TVM installiert sind. Beim Verspannvorgang werden die Gripper radial in die Ausbruchslaibung des anstehenden Gebirges gedrückt. Durch die Verspannung werden die Reaktionskräfte der Maschine aus Anpressdruck, Vorschub, Bohrkopftrieb und Eigengewicht abgeleitet.⁷

Gebirgsverhaltenstyp (GVT) Ein GVT bezeichnet einen Abschnitt im Gebirge, welcher einheitliche Eigenschaften im Bezug auf Ausbruchverhalten, Verformungseigenschaften und Versagensformen, ohne den Einsatz von Stütz- oder Zusatzmaßnahmen, aufweist.²

Innenschale Die Innenschale bezeichnet ein an der Tunnelinnenseite liegendes Konstruktionselement, welches konstruktive und / oder funktionale Ansprüche erfüllt.² Sie wird entweder als Tübbingauskleidung (einschalige Bauweise) oder aus Ortbeton (zweischalige Bauweise) hergestellt.⁸

Nachläufereinrichtung (NLE) Die NLE befindet sich direkt hinter der TVM und kann als Logistikzentrum des TVM-Vortriebs umschrieben werden. In ihr finden sämtliche Prozesse, welche nicht unmittelbar für den Vortrieb an der Ortsbrust verantwortlich sind, statt. Darin enthalten sind eine leistungsfähige Ver- und Entsorgung, der Sicherheitseinbau, Sicherheitseinrichtungen, Entstaubung, Luftzufuhr sowie die Vermessungseinrichtungen. NLE werden projektspezifisch konzipiert, dabei sind vor allem baubetriebliche, wirtschaftliche und sicherungstechnische Gesichtspunkte ausschlaggebend.⁹

Penetration Die Penetration beschreibt die Eindringtiefe des Bohrwerkzeugs während einer Bohrkopfdrehung. Sie wird in der Einheit [mm/U] angegeben.²

Regelvortrieb Im Rahmen dieser Arbeit wird der Regelvortrieb als jener Anteil der Vortriebsarbeiten definiert, welcher auf Basis vertraglich vereinbarter Vortriebsklassen, Ausbauplätze oder Vortriebsabschnitten vergütet werden kann.

⁶Vgl. [24] Girmscheid, S. 438

⁷Vgl. [23] Girmscheid, S. 387 ff.

⁸Vgl. [24] Girmscheid, S. 397 f.

⁹Vgl. [24] Girmscheid, S. 468 f.

Rock Quality Designation (RQD) Der RQD-Index stellt den Durchtrennungsgrad des Gebirges dar. Er berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen $L10/L$ von Bohrkernproben. Dabei ist L die Gesamtlänge der Probe und $L10$ die Länge aller in der Probe enthaltenen Stücke mit einer Einzellänge größer 10 cm.¹⁰

Rock Mass Rating (RMR) Das RMR-System wird zur Gebirgsklassifikation verwendet. Dabei fließen folgende Parameter ein:

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

Daraus ergibt sich eine Bewertung des Baugrundes von *sehr guter Fels* bis *sehr schlechter Fels*.¹¹

Schutterung Die Schutterung erfolgt innerhalb der Tunnelbohrmaschine (TBM) und der NLE. Dabei wird das Material vom Abbauort über Förderbänderanlagen für den Weitertransport an eine Übergabestation gefördert.¹²

Stützmittel Falls das umliegende Gebirge nicht über ausreichende Stehzeit verfügt, werden entsprechende Sicherungskonzepte gewählt. Diese Maßnahmen sind als Bewehrung oder Randeinfassung des anstehenden Gesteins zu verstehen. Realisiert werden sie mit einer breiten Palette an Stützmittel, darunter fallen Spritzbeton (bewehrt / unbewehrt), Stahlbögen, Gitterträger, Anker, Verzugsbleche und Kanaldielen, Spieße, Tübbinge und viele weitere.¹³

Tübbing Tübbinge sind gekrümmte Fertigteilesegmente, welche durch Aneinanderreihung einen Tübbingring ergeben. Dieser Ring wird als Tunnelauskleidung verwendet und weist im Allgemeinen einen hohen Fugenanteil auf.¹⁴

Tunnelvortriebsmaschine (TVM) Unter dem Überbegriff TVM vereinen sich Tunnelbohrmaschinen und Schildmaschinen. Die TVMs sind dadurch charakterisiert, dass sie die Prozesse des Lösens, Ladens, Sicherns und des Materialflusses in sich maschinell ausführen, und den Vortrieb durch das Gebirge hubweise vollziehen.^{15 2}

Überbohrmaß (ü_B) Das ü_B entspricht einer Vergrößerung des Durchmessers über den nominalen Durchmesser hinaus. Es wird vom AG vorgeschrieben.²

Übermaß (ü_m) Das ü_m ist im nominalen Bohrdurchmesser enthalten und soll die Verformungen des Gebirges nach dem Ausbruch kompensieren.²

Überprofil (ü_P) Das ü_P wird im Zuge der Ausschreibung vom AG angegeben. Der Auftragnehmer (AN) hat dieses nach seiner eigenen Einschätzung zu berücksichtigen. Es handelt sich hierbei um einen definierten Mehrausbruch.²

¹⁰Vgl. [24] Girmscheid, S. 426

¹¹Vgl. [26] Goger, S. 18 f.

¹²Vgl. [24] Girmscheid, S. 477

¹³Vgl. [24] Girmscheid, S. 172

¹⁴Vgl. [33] Maidl et al., S. 129

¹⁵Vgl. [26] Goger, S. 113

Überschnitt (üs) Der Überschnitt (üs) entstammt der Sphäre des AN und dient dem Ausgleich von Werkzeugabnutzung, Kurvenfahrt und sonstigen Toleranzen.²

Vortriebsdauer Die Vortriebsdauer ist laut ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 wie folgt zu charakterisieren:²

tatsächliche Vortriebsdauer In der tatsächlichen Vortriebsdauer ist die benötigte Zeit für Vortriebsarbeiten einschließlich Vortriebs-Stillliegezeiten und Vortriebsunterbrechungen enthalten.

prognostizierte Vortriebsdauer Die Prognose wird mit Hilfe der in der Ausschreibung definierten Vortriebsklassenverteilung und der mit dem Bieter vertraglich vereinbarten Vortriebsgeschwindigkeit aufgestellt. Hinzu kommen ausgeschriebene Vortriebs-Stillliegezeiten und Zeitaufwände aus Vortriebsunterbrechungen.

vertragliche (abrechenbare) Vortriebsdauer Die abrechenbare Vortriebsdauer ergibt sich aus der tatsächlichen Vortriebsklassenverteilung und den vereinbarten Vortriebsgeschwindigkeiten. Hinzu kommen vom AG anerkannte Vortriebs-Stillliegezeiten und Vortriebsunterbrechungen.

Vortriebsleistung/mittlere Vortriebsleistung Die Vortriebsleistungen mit der Einheit [Meter pro Tag] werden in dieser Diplomarbeit wie folgt unterteilt:

Soll Die Soll-Vortriebsleistung entstammt den Kalkulationen des Auftragnehmers, diese ist vertraglich mit dem Auftraggeber vereinbart.

Ist Die Ist-Vortriebsleistung ergibt sich im Zuge der Bauausführung aus den tatsächlich aufgefahrenen Tunnelmetern pro Tag.

Die mittlere Vortriebsleistung bezieht sich auf einen im Zuge dieser Diplomarbeit berechneten Durchschnittswert mit der Einheit [Meter pro Tag]. Für die Durchschnittsbildung werden dabei aussagekräftige Abschnitte oder der gesamte Vortrieb herangezogen.

Vortriebsklasse (VKL) Mit Hilfe der Vortriebsklassen kann ein Tunnelvortrieb in verschiedene Abschnitte unterteilt werden. Im kontinuierlichen Vortrieb richtet sich die Einteilung nach Löseverhalten, Gebirgsverhalten und baubetrieblichen Belangen.^{2 16}

Vortriebs-Stillliegezeit In der Stillliegezeit werden keine Vortriebsarbeiten durchgeführt (Ausnahmen sind Beleuchtung, Belüftung und Wasserhaltung).²

Vortriebsunterbrechung Während einer Vortriebsunterbrechung werden Vortriebsarbeiten durchgeführt, welche nicht nach vereinbarten Vortriebsklassen abgerechnet werden können.²

Zyklusdiagramm/digitales Zyklusdiagramm Im Zyklusdiagramm sind die einzelnen Prozesse des Tunnelvortriebs dokumentiert. Dabei werden die verschiedenen Tätigkeiten im Zeitraum eines Hubes oder Arbeitstages chronologisch mit deren Dauer aufgezeichnet. Die Dokumentation erfolgt durch zuständiges Personal wie Schichtführer, Poliere oder Bauleiter. In der Vergangenheit sind dabei einfache Protokolle in Papierform zum Einsatz gelangt. In jüngster Zeit ist man bemüht, diese Eingaben über digitale Hilfsmittel wie Tablets oder Smartphones zu etablieren, um den Arbeitsaufwand zu verringern und die Weiterverarbeitung der Daten zu erleichtern.¹⁷

¹⁶Vgl. [26] Goger, S. 38

¹⁷Vgl. [31] Kvasina, S. 42

1.6 Abkürzungsverzeichnis

- AG** Auftraggeber
- AN** Auftragnehmer
- CAI** Cerchar Abrasivitäts Index
- DSM** Doppelschildmaschine
- ETBM** Erweiterungstunnelbohrmaschine
- GVT** Gebirgsverhaltenstyp
- KSM** Kombinationsschildmaschine
- LV** Leistungsverzeichnis
- NLE** Nachläufereinrichtung
- ÖBA** örtliche Bauaufsicht
- ÖGG** Österreichische Gesellschaft für Geomechanik
- RMR** Rock Mass Rating
- SM** Schildmaschine
- TBM** Tunnelbohrmaschine
- TBM-A** Tunnelbohrmaschine mit Aufweitungsbohrkopf
- TBM-DS** Tunnelbohrmaschine mit Doppelschild
- TBM-O** offene Tunnelbohrmaschine
- TBM-S** Tunnelbohrmaschine mit Einfachschild
- TVM** Tunnelvortriebsmaschine
- ü_B** Überbohrmaß
- ü_m** Übermaß
- ü_P** Überprofil
- ü_S** Überschnitt
- VKL** Vortriebsklasse

Kapitel 2

Charakteristika des maschinellen Tunnelvortriebes

Nach Maidl et al. [33] gewinnt das Realisieren von Untertagbauten in den letzten Jahren in der Baubranche rege an Bedeutung. Gedankt ist dieser Umstand einerseits dem Bau großer Infrastrukturprojekte, mit dem eine Verlagerung des Verkehrs von der Straße auf die Schiene stattfinden soll. Gerade in Mitteleuropa werden zu diesen Zeiten große Eisenbahntunnel vorangetrieben, beziehungsweise fertiggestellt. Außerdem besteht weltweit Aufholbedarf an der Gewinnung von erneuerbaren Energien, speziell im Wasserkraftwerksbau werden Leitungsgänge und Aufnahmebauwerke für die Werksinfrastruktur unterirdisch situiert. Hierbei bietet der mitteleuropäische Alpenraum seit jeher einen breiten Projektspielraum.

Andererseits gewinnt die Urbanisierung global an Bedeutung. Der Platzbedarf in Großstädten steigt zunehmend an und der oberirdisch vorhandene Raum wird primär der Wohnfunktion zugeschrieben. Aus diesem Umstand wird die Infrastruktur zunehmend in bergmännisch erstellte Bauwerke verlagert, wodurch effizientere Verkehrsträger wie U-Bahnen weiter ausgebaut werden können. Des Weiteren fordern der permanente Energiebedarf und die entstehenden Abfallprodukte aus Industrie und Wohnen im städtischen Bereich ebenfalls einen Ausbau von Leitungsbauwerken und Kanalisation. Die Schwierigkeit besteht darin, die oberirdische, dichte Bebauung weitgehend unbeeinträchtigt zu belassen. Besonders Japan hat im Bereich der unterirdischen Raumnutzung in urbanen Gebieten eine Vorreiterrolle eingenommen.

Die Tendenz des Tunnelbaus geht bei der Erstellung von langgestreckten Röhren vom zyklischen Vortrieb in Richtung des Vortriebes mit Tunnelvortriebsmaschinen (TVM's). Diese Maschinen bieten eine erhebliche Verbesserung der Sicherheitsbedingungen untertage und eine teils vollautomatische Prozesskette der einzelnen Arbeitsschritte. Im nachfolgendem Kapitel soll ein genereller Überblick der verschiedenen Maschinentypen gegeben werden.

2.1 Tunnelvortriebsmaschinen im Überblick

Laut Goger [26] unterteilen sich Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) in Tunnelbohrmaschinen (TBM) und Schildmaschinen (SM). Für Tunnelvortriebe im Festgestein bzw. Fels werden meist Tunnelbohrmaschinen eingesetzt, diese trennen die Arbeitsschritte des Lösens und Sicherns sowohl räumlich, als auch zeitlich, von einander. Durch die Gripper wird die Maschine am Ausbruchrand des Gebirges verspannt, anschließend erfolgt der Abbau durch das Schneidrad an der Ortsbrust. Die Stützung des Gebirges erfolgt, je nach Bedarf, in einem dem Bohrkopf nachgelagerten Maschinenabschnitt durch den Einbau von Stützmittel. Im Lockergestein, in Baugrund mit Grundwasser und in heterogenen Böden werden in der Regel Schildmaschinen eingesetzt. Diese bringen eine kontinuierliche Stützung des zu durchörternden Gebirges mit Hilfe ihres Schildes auf. Der Vorschub erfolgt durch Hydraulikpressen, welche die nachlaufende

Tübbingauskleidung des Tunnelbauwerkes als Widerlager nutzen.¹⁸ Eine Einteilung der am Markt vorhandenen Maschinenvarianten gibt DAUB [19] in Abb. 2.1.

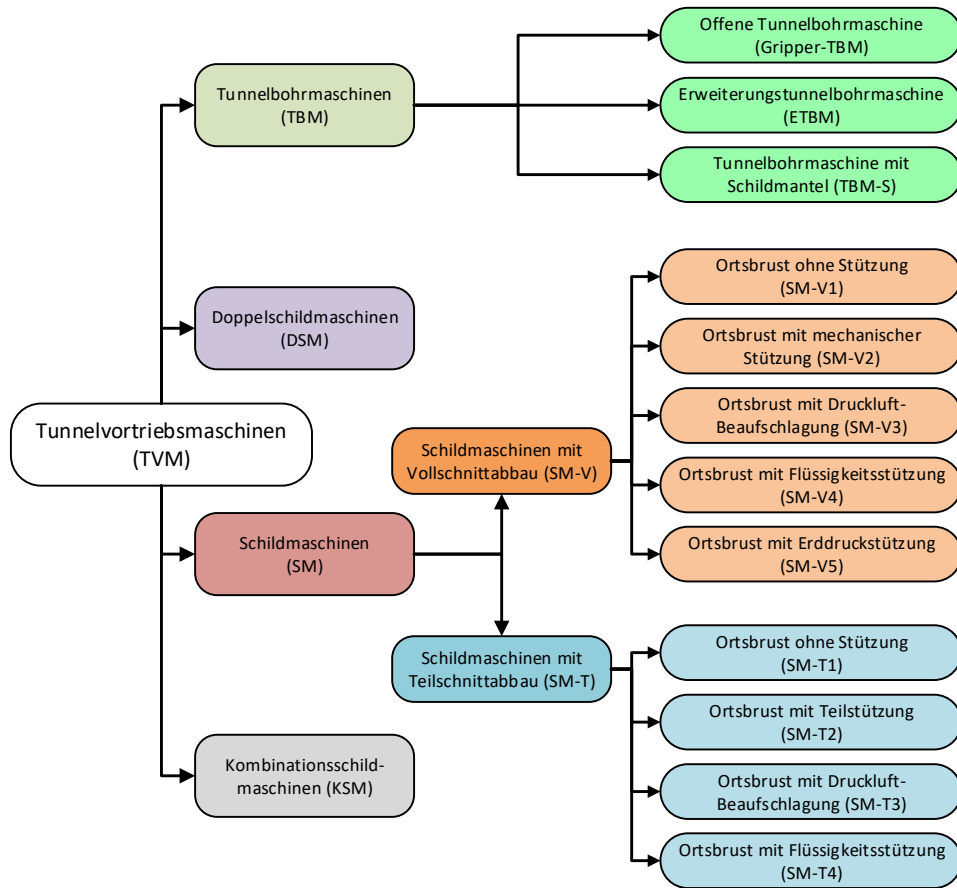


Abb. 2.1: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen (Quelle: DAUB [19, S. 11])

TVM's werden nach **TBM**, **Schildmaschine (SM)**, **Doppelschildmaschine (DSM)** und **Kombinationsschildmaschine (KSM)** kategorisiert.

2.1.1 Tunnelbohrmaschinen (TBM)

Zu der ersten Kategorie zählt die offene Tunnelbohrmaschine (TBM-O) oder auch Gripper-TBM. Diese ist die klassische Hartgesteinsmaschine, welche ihre Arbeit im standfestem Gebirge verrichtet. Dieser Maschinentyp besitzt keinen vollständigen Schildmantel.¹⁹

Die Erweiterungstunnelbohrmaschine (ETBM) ist eine Sonderform der TBM-O. Sie wird bei der Aufweitung eines bereits bestehenden Tunnelquerschnittes eingesetzt. Dabei ist dem Aufweitungsbohrkopf eine Grippereinrichtung vorgelagert, welche sich im bestehenden Tunnel verspannt. Anschließend wird der rotierende Aufweitungsbohrkopf über eine Hydraulikeinrichtung nachgezogen, und der Ausgangsquerschnitt auf den neuen Durchmesser ausgebrochen. Alle nachgelagerten Prozesse gehen analog der anderen Maschinentypen von statten. Einsatz findet diese Form des Tunnelvortriebes bei der Aufweitung von Erkundungsstollen zu Haupttunneln, oder bei Querschnittvergrößerungen von Bestandsbauwerken (Energie, Kanalisation). In Bereichen mit

¹⁸Vgl. [26] Goger, S. 113

¹⁹Vgl. [33] Maidl et al., S. 6 ff.

gestörten Felsformationen können die zuvor hergestellten Erkundungsstollen genutzt werden, um gebirgsverbessernde Maßnahmen durchzuführen und so die Vortriebsrisiken zu senken.¹⁹

2.1.2 Doppelschildmaschinen (DSM)

Die DSM setzt sich aus zwei nacheinander angeordneten Maschinenabschnitten zusammen. Der an der Ortsbrust liegende Teil besteht aus dem Bohrkopf und den Hauptvortriebspresen, im nachgelagerten Teil sind die Nebenvortriebspresen und eine Grippereinrichtung installiert. Mit Hilfe dieser zwei voneinander unabhängigen Hydraulikeinrichtungen kann der vordere Maschinenteil um eine komplette Ringlänge, gegenüber dem hinteren Teil, teleskopartig herausgefahren werden. Bei Vortriebsarbeiten im Festgestein wird das Vortriebsdrehmoment über die Gripper abgetragen. Dadurch kann im Schildschwanzbereich die Montage der Tübbingauskleidung während des Bohrens erfolgen, was zu einer Überlagerung der Arbeitsprozesse *Bohren* und *Sichern* führt. Je nach Anforderung an die Auskleidung ergibt sich die Möglichkeit, im standfesten Gebirge, gänzlich auf Tübbinge zu verzichten. In Baugründen, welche sich nicht zum Abtragen der Vortriebskräfte über die Gripper eignen (Lockergestein), stützt sich die DSM auf den zuletzt eingebauten Tübbingring ab. Bei diesem Arbeitsmodus werden die beiden Maschinenteile zusammengefahren, der Vorschub erfolgt ausschließlich über die Nebenvortriebspresen.¹⁹

2.1.3 Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (SM-V)

Bei den SM unterscheidet man zwischen Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (durch ein Schneidrad – SM-V) und Schildmaschinen mit teilflächigem Abbau (durch Fräse oder Bagger – SM-T). Ihr Einsatzgebiet ist das Lockergestein, mit oder ohne Grundwasservorkommen. Bei Vortrieben mittels SM bedarf der ausgebrochene Hohlraum und die Ortsbrust in der Regel einer Stützung durch das Schild. Beim Vollschnittabbau kann eine Sicherung der Ortsbrust mittels folgender Varianten erfolgen:¹⁹

Ortsbrust ohne Stützung (SM-V1): Falls der Vortrieb in standfestem Gebirge erfolgt, zum Beispiel in Tonböden mit fester Konsistenz und ausreichender Kohäsion, oder im Festgestein, werden offene Schilde eingesetzt. Der anstehende Baugrund wird an der Ortsbrust durch das Schneidrad abgebaut und über Förderbänder weggeschafft. Bei nachbrüchigem Festgestein wird ein weitgehend geschlossener Bohrkopf verwendet, der Abbau des Gesteins erfolgt über Diskenmeissel. Der entstandene Hohlraum wird vom Schildmantel und nachfolgend durch den Tübbingausbau geschützt. Der Vorschub und das Ableiten des Drehmomentes erfolgt gänzlich durch Abstützung am letzten eingebauten Tübbingring.

Ortsbrust mit mechanischer Stützung (SM-V2): Die mechanische Stützung erfolgt durch elastisch gelagerte Stützplatten in den Materialförderkanälen des Schneidrades. In der Praxis kann jedoch mit dieser Technik quasi keine nennenswerte Stützung der Ortsbrust erzielt werden. Heute wird diese Variante nur mehr als zusätzliche Sicherungsmöglichkeit in die Schneidräder eingebaut.

Ortsbrust mit Druckbeaufschlagung (SM-V3): Unterhalb des Grundwasserspiegels kommt diese Maschinenart zum Einsatz. Mittels Druckluft wird das Wasser an der Ortsbrust zurückgehalten, indem entweder der gesamte Tunnel unter Druck gesetzt wird, oder nur die Abbaukammer im vorderen Maschinenteil, welche durch eine Druckwand vom restlichen Tunnel getrennt wird. Für die wirksame Verdrängung des Wassers ist die Ausbildung einer Luftströmung, zur Geländeoberfläche hin, notwendig. Dabei zu beachten ist, dass wasserundurchlässige Schichten oberhalb der SM die Ausbildung dieses Stromes unterbinden können,

und somit die Stützwirkung herabsetzen. Bei dieser Variante sind im Inneren der Maschine Druckluftschleusen auszubilden. Weiters muss der dichten Ausbildung des Schildschwanzes besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-V4): Im Falle einer Flüssigkeitsstützung wird die Ortsbrust durch eine mit Druck beaufschlagte Flüssigkeit gestützt. Die verwendete Flüssigkeit wird in Abhängigkeit des Baugrundes festgelegt, bewährt haben sich dabei Bentonitsuspensionen, die in Dichte und Viskosität anpassungsfähig sind. Eine Druckwand trennt den Arbeitsraum von der restlichen Maschine. In der Arbeitskammer wird Stützdruck auf die Flüssigkeit aufgebracht, dieser ist durch Luftpolster und der Förderleistung von Förder- und Speisepumpe sehr genau regelbar. Der Abbau des Gesteins erfolgt mit einem Schneidrad und anschließender hydraulischer Materialförderung. Das Materialgemisch aus Abbaugut und Stützflüssigkeit muss hinter der Arbeitskammer wieder separiert werden. Sind Revisions- oder Reparaturarbeiten am Bohrkopf notwendig, wird die Stützflüssigkeit durch Druckluft ersetzt, um die Abbaukammer begehbar zu machen. Zu grobes Abbaumaterial wird im Bohrkopf gebrochen, um es hydraulisch förderbar zu machen. Im standfestem Gebirge kann das Flüssigkeitsschild auch ohne Druckluftbeaufschlagung arbeiten, gefördert wird in diesem Falle wiederum mit Wasser.

Ortsbrust mit Erddruckstützung (SM-V5): Bei der Erddruckstützung wird die Ortsbrust mit einem Brei aus abgebauten Boden stabilisiert. Bei diesem Maschinentyp ist ebenfalls die Abbaukammer durch eine Druckwand vom restlichen Hohlraum getrennt. Der Boden wird hinter dem Schneidrad auf eine geeignete Konsistenz gebracht. Mit Hilfe einer Schnecke erfolgt die Förderung des Gesteinsbreis aus der Abbaukammer. Durch die Fördergeschwindigkeit ist der Druck regelbar, mittels Druckmessdosen kann dieser kontrolliert werden. Die Druckdifferenz zwischen Abbaukammer und restlichem Tunnel wird über Reibung in der Förderschnecke abgebaut. Ein Arbeiten ohne Druckbeaufschlagung im standfestem Gebirge ist analog der vorher genannten Varianten ebenfalls möglich. Bei hohen Wasserdrücken und Bodentypen, die zum Verflüssigen neigen, kann die Schneckenförderung durch eine Pumpenförderung (SM-V4) getauscht werden.

2.1.4 Schildmaschinen mit Teilschnittabbau (SM-T)

Hinsichtlich der Schildmaschine mit Teilflächenabbau wird in folgende Varianten analog des Vollschnittabbaus eingeteilt:²⁰

Ortsbrust ohne Stützung (SM-T1): Bei einer standfesten Ortsbrust mit senkrechter oder steiler Böschung wird diese Variante bevorzugt eingesetzt. Abgebaut wird das Gestein mittels Bagger, Fräse oder Reißzahn, welche sich im Schutze eines Schildmantels befinden. Weitere Maschinenkomponenten sind lediglich die Vortriebspresen und Förderbänder zur Materialschutterung.

Ortsbrust mit mechanischer Teilstützung (SM-T2): Hierbei werden an der Ortsbrust Bühnen und/oder Brustplatten eingesetzt, welche diese, der Höhe nach, in mehrere Abschnitte unterteilen. Auf den Bühnen bilden sich dadurch Böschungen aus Abbaumaterial, welche die Ortsbrust stützen. Der Abbau des Bodens erfolgt analog der Variante SM-T1. Bei dieser Abbauvariante besteht die Gefahr großer Setzungen zufolge unkontrollierbarer Nachbrüche. Im Falle der Schildmaschine mit Brustplattenverbau wird die Ortsbrust durch hydraulisch bedienbare Brustplatten gesichert. Beim Bodenabbau werden die Brustplatten

²⁰Vgl. [33] Maidl et al., S. 11 f.

im entsprechenden Bereich zurückgezogen, um den Abbauwerkzeugen genügend Platz zu schaffen.

Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung (SM-T3): Beim Abbau im Grundwasser werden die beiden zuvor beschriebenen Maschinenvarianten mit Druckluft beaufschlagt. Dabei ist entweder der Abbauraum durch eine Druckwand vom restlichen Tunnel getrennt, oder der komplette Tunnel unter Druck gesetzt (Vgl. SM-V3). Die Materialförderung erfolgt entweder hydraulisch oder im trockenen Zustand über Druckschleusen.

Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-T4): Die Ortsbruststützung mittels Stützflüssigkeit im Teilflächenabbau konnte sich in der Vergangenheit nicht bewähren und kommt deshalb nicht mehr zum Einsatz.

2.1.5 Kombinationsschildmaschinen (KSM)

Die Kombinationsschildmaschine steht stellvertretend für *Anpassbare Schildmaschinen mit kombinierter Verfahrenstechnik*. Dabei kann beim Bau von Tunnelbauwerken mit wechselhaftem Baugrund (oft reicht die Bandbreite des Gebirges vom lockeren Boden bis hin zum Fels), je nach geotechnischen Gegebenheiten, die Verfahrensart angepasst werden. Es wird unterschieden zwischen Schildmaschinen, bei denen ein Wechsel der Verfahrensart ohne Umbau möglich ist, und jenen, bei denen ein Wechsel nur durch den Umbau möglich ist. Zum ersteren zählt beispielsweise die Anpassung von einem Erddruckschild (SM-V5) auf ein Druckluftschild (SM-V3). Bei der Variante mit Umbauarbeiten sind folgende Kombinationen bereits erprobt:

- Flüssigkeitsschild SM-V4 ↔ Schild ohne Stützung SM-V1
- Flüssigkeitsschild SM-V4 ↔ Erddruckschild SM-V5
- Erddruckschild SM-V5 ↔ Schild ohne Stützung SM-V1

Für die Umbauarbeiten sind in der Regel mehrere Schichten einzuplanen.²¹

2.2 Überblick der Maschinenauswahl

Ein Leitfaden der Vorgangsweise zur Auswahl einer passenden TVM wird in Kapitel 2.4 vorgestellt. Im Hinblick auf die Eignung des Einsatzes der genannten Maschinentypen, betreffend verschiedene Baugrundparameter, werden die Veröffentlichungen des *Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB)* herangezogen. In Abb. 2.2 sind die Haupteinsatzgebiete in Schwarz und die möglichen Einsatzgebiete in Grau, abhängig der geologischen Randbedingungen, aufgezeigt.

Die Auswahl bezieht sich vor allem auf geotechnische Kennwerte, welche im Rahmen von Erkundungsmaßnahmen erarbeitet werden. Einfluss auf die Wahl der TVM nehmen folgende Parameter:

- Gesteinsfestigkeit
- Zugfestigkeit
- RQD-Wert
- Kluftabstand

²¹Vgl. [33] Maidl et al., S. 12

| Geo-technische Kennwerte Geotechnical Parameters | Baugrund Subsoil | Fels/Festgestein/Hard rock/soil | | bindig standfest cohesive stable | Boden/Lockergestein/Soft rock/soil | | nicht bindig non-cohesive |
|---|--------------------------|---|---|--|--|--|--|
| | | standfest bis nachbrüchig competent to caving in | nachbrüchig bis gebräch caving in to unstable | | bindig nicht standfest cohesive not stable | Wechsellagerung mixed conditions | |
| Gesteinsfestigkeit σ_D [MN/m ²] Rock Compressive strength | | 300 bis 50 | 50 bis 5 | 1,0 | 0,1 | | |
| Zugfestigkeit σ_z [MN/m ²] Tensile strength | | 25 bis 5 | 5 bis 0,5 | | | | |
| RQD-Wert RQD value | RQD [%] | 100 bis 50 | 50 bis 10 | | | | |
| Kluftabstand Fissure spacing | [m] | > 2,0 bis 0,6 | 0,6 bis 0,06 | | | | |
| Kohäsion Cohesion | Cu [kN/m ²] | | | ≥ 30 | 30 bis 5 | 30 bis 5 | |
| Kornverteilung Grain distribution | < 0,02 [%] < 0,06 [5] | | | 30 ≥ 30 | 30 ≥ 30 | | 10 |
| TBM | o.W. | ■ | | | | | |
| TBM | m.W. | ■ | | | | | |
| TBM-S mit Schild | o.W. | ■ | | | | | |
| TBM-S with shield | m.W. | ■ | | | | | |
| SM-V1 ohne Stützung | o.W. | ■ | | | | | |
| SM-V1 without support | m.W. | ■ | | | | | |
| SM-V2 mechan. Stützung | o.W. | | | ■ | | | ■ |
| SM-V2 mech. support | m.W. | | | ■ | | | ■ |
| SM-V3 mit Druckluft | o.W. | | | | ■ | | |
| SM-V3 with compressed air | m.W. | | | | ■ | | |
| SM-V4 Flüssigkeitsstützung | o.W. | ■ | | | | | ■ |
| SM-V4 fluid support | m.W. | ■ | | | | | ■ |
| SM-V5 Erddruck-Stützung | o.W. | | | | ■ | | |
| SM-V5 earth pressure balance support | m.W. | | | | ■ | | |
| SM-T1 ohne Stützung | o.W. | ■ | | ■ | | | |
| SM-T1 without support | m.W. | ■ | | ■ | | | |
| SM-T2 Teilstützung | o.W. | | | | | ■ | ■ |
| SM-T2 partial support | m.W. | | | | | ■ | ■ |
| SM-T3 mit Druckluft | o.W. | | | | ■ | | |
| SM-T3 with compressed air | m.W. | | | | ■ | | |
| SM-T4 Flüssigkeitsstützung | o.W. | | | | | ■ | |
| SM-T4 fluid support | m.W. | | | | | ■ | |
| Abbauwerkzeug Extraction tool | V | rollend (Diskenmeißel) rolling (cutter disc) | rollend (Diskenmeißel) rolling (disc bit) | schälend (Flachmeißel) stripping (flat bit) | schälend (Flachmeißel) stripping (chisel) | lösend/schälend (Stichel/Flachmeißel) loosening/stripping (cutter/flat bit) | lösend (Stichel) loosening (pick) |
| | T | ritzend (Spitzmeißel) notching (pick) | ritzend (Spitzmeißel) notching (point bit) | ritzend (Spitzmeißel) notching (point bit) | schälend (Flachmeißel) stripping (flat bit) | schälend (Flachmeißel) stripping (flat bit) | lösend (Stichel) loosening (pick) |
| o.W. = ohne Grund- bzw. Schichtwasser/without groundwater or underground water | | | | ■ | | Haupteinsatzbereich/Main field of application | |
| m.W. = mit Grund- bzw. Schichtwasser/with groundwater or underground water | | | | ■ | | Einsatz möglich/application possible | |

Abb. 2.2: Einsatzbereich der Maschinentypen in Abhängigkeit der Geologie nach DAUB (Quelle: DAUB et al. [20, S. 33])

- Kohäsion
- Kornverteilung
- Festgestein/Lockergestein

Laut Goger [26] ist der angedachte Durchmesser von Vortriebsmaschinen ein weiteres wichtiges Auswahlkriterium. Einen Überblick der Ausbruchsdurchmesser in Abhängigkeit der Maschinenvariante gibt Tab. 2.1. Generell gilt, Tunnelbohrmaschinen ohne Schildmantel können hinsichtlich Ausbruchsdurchmesser konstruktiv in einer gewissen Bandbreite verändert werden. Schildmaschinen dagegen sind betreffend Ausbruchsdurchmesser nur in einem geringen Maße anpassbar.

2.3 Tunnelvortriebsmaschinen für den Datenauswertungsprozess

Im Rahmen der gegenständlichen Diplomarbeit wird auf die Tunnelvortriebsmaschinentypen der in Kapitel 3 vorgestellten Referenzprojekte näher eingegangen. Hierbei sollen die groben

Tab. 2.1: Ausbruchsdurchmesser in Abhängigkeit des Maschinentyps (Quelle: Goger [26, S. 115])

| TVM-Typ | Bohrkopfdurchmesser | |
|---------|---------------------|---------|
| | von [m] | bis [m] |
| TBM-O | 2,00 | 12,50 |
| TBM-S | 1,50 | 14,00 |
| DSM | 2,80 | 12,50 |
| SM-V5 | 1,70 | 16,00 |
| SM-V4 | 4,80 | 19,00 |

Bestandteile der verschiedenen Varianten erläutert und deren Funktion dargestellt werden. An dieser Stelle sei zusätzlich erwähnt, dass die *ÖNORM B 2203-2* Tunnelvortriebsmaschinen nach ihren Arbeitsbereichen unterteilt. Für die eingesetzten Maschinenvarianten dieser Diplomarbeit sind die Arbeitsbereiche in Abb. A.1 und Abb. A.2 ab Seite 159 im Anhang ersichtlich.

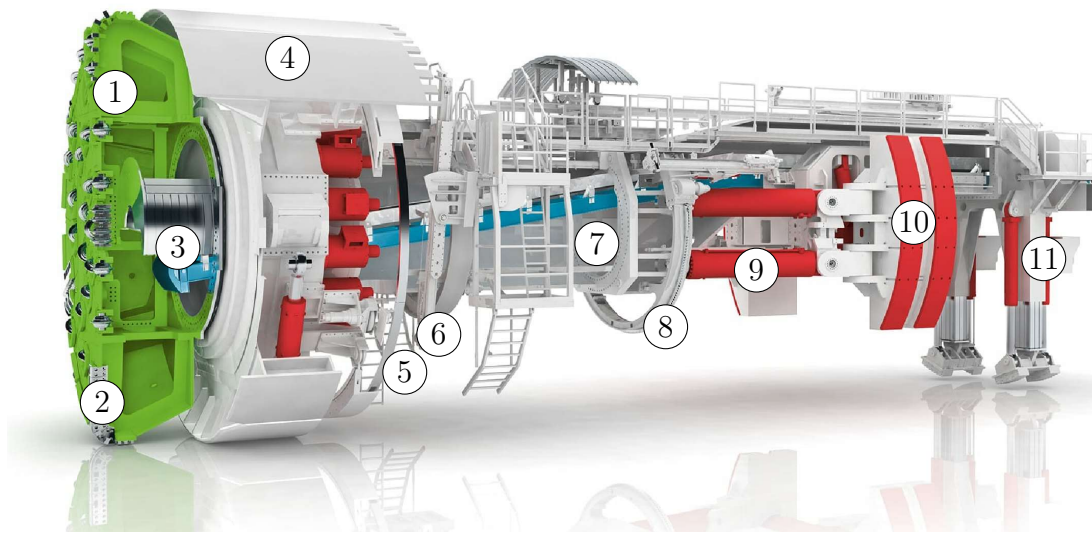
2.3.1 Offene Tunnelbohrmaschine – Gripper-TBM

Die Informationen zum folgenden Absatz sind Girmscheid [24] und Goger [26] entnommen. In Abb. 2.3 ist eine klassische TBM-O der *Fa. Herrenknecht* mit ihren wichtigsten Bauteilen dargestellt. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

Gegliedert wird die TBM-O in Aggregate (Abbau-, Abstütz- und Antriebsaggregate) und Förderbeziehungweise Montageeinrichtungen. Der Bohrkopf zählt zu den primären Aggregaten, er wird von hydraulischen oder elektrischen Antriebsmotoren, welche um das Hauptlager der Maschine am Schaft angeordnet sind, betrieben. Im Hartgestein werden meist geschlossene Felsbohrköpfe verwendet, ein Beispiel ist in Abb. 2.4 dargestellt, die mit Disken und Räumschlitzen ausgestattet sind. Der Bohrkopf ist an der Frontseite zur Ortsbrust hin schwach konisch ausgebildet und verfügt über eine hohe räumliche Steifigkeit. Diese wird durch ein kegelstumpfförmiges Element, mit im Inneren radial angeordneten Leitblechen, erreicht, um eine Rissbildung aus Eigenspannungen durch zu große Materialstärke auszuschließen.²² Die Leitbleche und der Kegelstumpf bilden Kammern im Bohrkopfinnenen, in die das gelöste Festgestein über die Räumerschlitze beziehungsweise Räumschlitze transportiert wird. Von dort aus wird das Material ins Zentrum des mittelfrei gelagerten Bohrkopfes (Muckring) gefördert, wo es über einen Aufgabetrichter an ein Förderband abgegeben wird. Um zu verhindern, dass das Abbaumaterial zwischen Ortsbrust und Bohrkopf an allen Disken vorbei rutschen muss, sind die Räumschlitze möglichst weit ins Zentrum zu führen. Ansonsten rieselt das Gesteinsmaterial über die Schneidspuren und vermindert dadurch die Penetration der Disken.²² Die Diskenmeissel werden von Schneidrollenhaltern aufgenommen. Diese sind im Bohrkopf eingelassen und sollten einen Meisselwechsel von beiden Seiten des Bohrkopfes aus ermöglichen. Die Auswechslung der Disken erfolgt händisch unter Einsatz von hydraulischen Werkzeugen. Durchstiegen wird der Bohrkopf über Mannlöcher (Ausstiege), beziehungsweise ermöglichen auch die Schneidrollenhalter einen zusätzlichen Zugang zur Ortsbrust.²²

Der Bohrkopfmantel mit integrierter Staubwand und Firstschild ist dem Bohrkopf nachgelagert. Er bietet Schutz vor abbröckelnden und hinein brechendem Gestein. Die Staubwand schützt den dahinter befindlichen Arbeitsraum vor Staub und absplitterndem Ausbruchmaterial. Getragen wird der Bohrkopf von einer Innenkelly, meist eine Rechteckhohlkasten- oder Zylinderkonstruktion, die Vorschubkräfte und Antriebsmomente überträgt. Die Innenkelly ist ausschierbar in der Außenkelly gelagert, wodurch der hubweise Vorschub einer TBM ermöglicht wird. An der

²²Vgl. [24] Girmscheid, S. 435 ff.



- | | |
|-------------------|---|
| 1. Bohrkopf | 7. Innenkelly |
| 2. Räumer | 8. Vorauserkundungsbohrgerät |
| 3. Muckring | 9. Vortriebszylinder |
| 4. Firstschild | 10. Grippereinrichtung, dahinter Außenkelly |
| 5. Ringerektor | 11. Maschinenabstützung |
| 6. Ankerbohrgerät | |

Abb. 2.3: Offene Tunnelbohrmaschine (Quelle: Herrenknecht AG [29])

Außenkelly sind entweder zwei Gripper in einer Ebene, oder vier Gripper in zwei Ebenen montiert. Mit diesen Einrichtungen wird die TBM-O gegen die Hohlraumwand verspannt. Durch Vorschubzylinder wird die Innenkelly aus der, als Widerlager dienenden, Außenkelly geschoben und der Bohrkopf gegen die Ortsbrust gepresst. Mit dieser Einrichtung kann der Anpressdruck der Bohrwerkzeuge auf das Gestein gesteuert werden. Eine starre Führung aus Innen- und Außenkelly bietet tunnelbautechnisch folgende Vorteile:²²

- gutes Übertragen hoher Anpress- und Vorschubkräfte in hartem Gestein
- Verhinderung von Lageabweichungen des Bohrkopfes beim Bohrvorgang
- im Falle schwieriger Gebirgsverhältnisse können Verspannkräfte auf mehrere Angriffspunkte der Wand verteilt werden

Die Hydraulikeinrichtungen sind durch Elektromotoren angetrieben, welche meist auf der NLE situiert werden. Unter sekundären Einrichtungen versteht man Gerätschaften, welche für den Einbau von Sofortsicherungsmaßnahmen und zur Vorsondierung des Gebirges verwendet werden. Gesichert wird der Ausbruchsquerschnitt, falls erforderlich, durch das Versetzen von Ausbaubögen direkt hinter dem Bohrkopfmantel und/oder mit Hilfe von Netzen, Ankern oder Spritzbeton in Form eines Kopfschutzes. Die Stützmittel werden über Fördereinrichtungen von

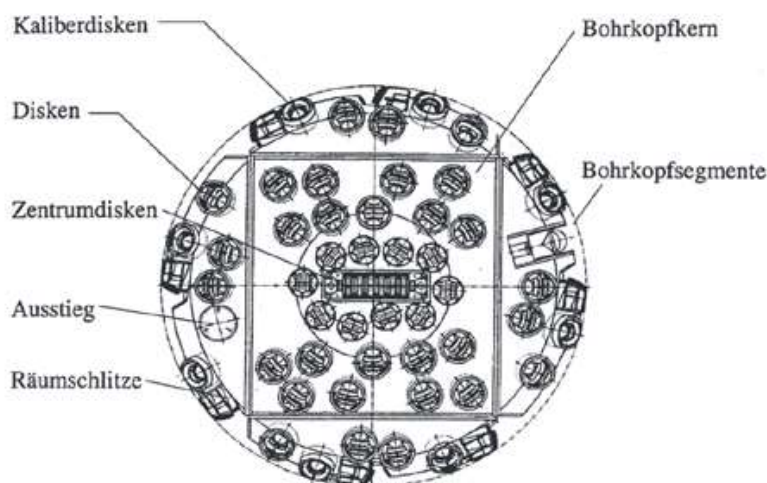


Abb. 2.4: Bohrkopf (Quelle: Goger [26, S. 117])

einem Zwischenlager auf der Maschine an ihren Einbauort bewegt. Anschließend baut sie ein Ringrektor hinter dem Firstschild ein. Die Sondierung erfolgt durch eine Bohrlafette, welche mittels Kreisschlitten am Umfang der Außenkelly montiert ist, wodurch sie radial über den ganzen Maschinenumfang für eine Bohrung positioniert werden kann. Mit ihr sind auch Injektionen an der Ortsbrust und Injektionsschirme in sehr zerklüftetem und gebrächem Gebirge herstellbar. Hierbei ist allerdings erwähnenswert, dass sich diese Sicherungsmaßnahmen nur für kleinere Störzonen anbieten und wirtschaftlich sind. Bei ausgedehnten Störbereichen bietet sich der Einsatz einer TBM-S an, bei der die Sicherung des Gebirges mittels Tübbingauskleidung erfolgt.²²

In Tab. 2.2 sind Kennzahlen verschiedener Gripper-Tunnelbohrmaschinen der *Fa. Wirth* angegeben. Man erkennt, dass sich die Drehzahl des Bohrkopfes bei größer werdendem Durchmesser verringert. Die Länge eines Bohrhubes ist proportional zur Erhöhung des Durchmessers und umgekehrt-proportional zur Drehzahl. Der Bohrkopf wird immer für eine Durchmesserbandbreite

Tab. 2.2: Technische Daten von TBM-Os der *Fa. Wirth* (Quelle: Girmscheid [24, S. 437])

| Vollschnittmaschine | Durchmesserbereich [m] | Drehzahlbereich [1/min] | Bohrhub [mm] |
|---------------------|------------------------|-------------------------|--------------|
| TB 0/1 | 2,2 – 2,6 | 11,8 | 800 |
| TB 0/2 | 2,6 – 3,0 | 11,0 – 13,8 | 1000 |
| TB I | 3,0 – 3,5 | 9,4 – 12,0 | 1200 |
| TB II | 3,5 – 4,0 | 8,8 – 10,2 | 1200 |
| TB III | 4,0 – 4,8 | 7,0 – 9,0 | 1500 |
| TB IV | 4,8 – 6,0 | 5,4 – 7,5 | 1600 |
| TB V | 6,0 – 7,2 | 4,5 – 6,0 | 1600 |
| TB VI | 7,2 – 8,6 | 3,8 – 5,0 | 1600 |

konstruiert. Dabei ist der meist rechteckige Bohrkopfkernel mit festen Abmessungen hergestellt, dieser ist in Abb. 2.4 ersichtlich. Um diesen herum werden Bohrkopfsegmente angeordnet, deren Größe sich aus dem festgelegten Ausbruchdurchmesser projektspezifisch ergibt. Bei einer Änderung des Durchmessers, zum Beispiel durch den Einsatz der Maschine in einem nachfolgenden Bauprojekt, werden lediglich die Bohrkopfsegmente getauscht und der Schildmantel sowie das Staubschild

angepasst. Leistungstechnisch ist die Maschine auf den maximalen Bohrkopfdurchmesser der Bandbreite auszulegen.²³

Beim Vortrieb spielt der schonende Umgang mit dem Gerät eine besondere Rolle, da Verzögerungen aus außerordentlichen Reparaturen oder Gebrechen immer mit erhöhtem Zeitaufwand und Kosten einher gehen. Um einen schonenden Betrieb der Maschine zu ermöglichen, muss der Bohrkopf weich angefahren und vibrationsarm betrieben werden. Dies ermöglicht ein stufenlos regelbarer Hydraulik- oder E-Frequenzumwandlungsantrieb. Der Antrieb soll auf ein kurzzeitiges Brechdrehmoment vom 1,5- bis 2-fachem des Nenndrehmoments ausgelegt sein. Über die technischen Einrichtungen des Antriebes ist eine Überlastung der Maschine zu unterbinden. Weiters ist der Bohrkopf auf rechts- und links Drehbarkeit auszulegen, um die Wartungsarbeiten (Meisselwechsel) zu vereinfachen, und mit einer Feststellbremse auszustatten. Der Antrieb des Bohrkopfes erfolgt durch eine der folgenden Möglichkeiten:²⁴

- elektrischer Antrieb mit Reibungskupplung (meist zwei verschiedene Drehzahlen)
- elektrischer Antrieb mit Frequenzsteuerung (variable Drehzahl)
- hydraulischer Antrieb (variable Drehzahl)
- elektrischer Antrieb mit Hilfsantrieb für ein hohes Losbrechmoment

Maschinen mit elektrischem Antrieb verfügen meist lediglich über zwei verschiedene Drehzahlen und somit zwei unterschiedliche Bohrkopfgeschwindigkeiten. Beim Anfahren der TBM ist ein zeitlich begrenztes Losbrechmoment von der 1,5-fachen Stärke des Betriebsdrehmomentes erforderlich, um die Maschine, im Falle von Verklemmungen im Gestein, befreien zu können. Dieses Moment wird erzeugt, indem alle vorhandenen Motoren hochgefahren werden und ein abruptes Einwerfen der Kupplung vorgenommen wird. Dadurch bricht entweder der festsitzende Bohrkopf los, oder die Rutschkupplung entlastet den Motor. Bei dieser Variante wird ein Wirkungsgrad von rund 95 % des Elektromotors erreicht.²⁴

Frequenzgesteuerte Elektromotoren sind in ihrer Drehzahl viel variabler und besitzen einen Wirkungsgrad von ungefähr 90 %. Das Losbrechmoment liegt beim 1,7-fachen des Betriebsdrehmomentes. Dabei werden die frequenzgesteuerten Motoren aus dem Stand voll angefahren. Ein Abriegeln des Motors erfolgt durch einen Hitzeschutzschalter.²⁴

Im Gegensatz zu den Elektromotoren sind Hydraulikmotoren weit weniger komplex und werden dank ihrer Robustheit sehr gerne eingesetzt. Durch diese Gegebenheiten ist mit den Maschinen ein sehr hohes Losbrechmoment vom bis zu 2,5-fachem des Regelbetriebes zu erzielen. Allerdings liegt der Wirkungsgrad nur bei 75 %, da eine sehr hohe Wärmeentwicklung stattfindet.²⁴

Im Falle des Elektroantriebes mit zwei Geschwindigkeitsstufen gibt es die Option eines zusätzlichen hydraulischen Hilfsmotors, welcher das Losbrechmoment auf das 1,8 – 2,2-fache kurzzeitig steigern kann.²⁴

Bei der Wahl des Antriebs einer TBM, mit gleicher Antriebsleistung, ist zusammenfassend auf folgende Punkte bedacht zu nehmen. Elektromotoren haben einen höheren Wirkungsgrad und sind dadurch beim ohnehin sehr energieaufwändigen Vortrieb positiver zu bewerten. Jedoch ist ihre Wartung sehr aufwändig und im Allgemeinen erreichen sie kein so hohes Losbrechmoment wie die Hydraulikvariante. Der Hydraulikantrieb kann durch eine robuste Ausführung und den geringen Wartungsaufwand überzeugen, jedoch verbraucht er durch den geringeren Wirkungsgrad ein deutliches Mehr an Energie.²⁴

Eine variable Umdrehungsgeschwindigkeit ist bei großen Durchmessern in Gebirgen mit veränderlichen Bedingungen anzustreben. Durch eine Anpassung der Drehzahl wird den, sich ändernden,

²³Vgl. [24] Girmscheid, S. 442

²⁴Vgl. [24] Girmscheid, S. 439 ff.

Vortriebsverhältnissen Rechnung getragen. Außerdem bietet sich dadurch die Möglichkeit zur Kontrolle von Losbrechmomenten und die Reduzierung der Maschinenvibrationen. Des Weiteren sind eine stufenlose Regelung von Vorschubgeschwindigkeit und Antriebsdruck von Vorteil, um den Gesteinslösevorgang so effektiv wie möglich gestalten zu können. Unter Effizienz versteht man hier den wirtschaftlichsten Bohrfortschritt bei bestmöglicher Werkzeugausnutzung.²⁴

Der diskontinuierliche Arbeitszyklus einer TBM-O ist in Abb. 2.5 dargestellt. Im Bild oben links befindet sich die Maschine am Bohrende, die komplette Hublänge ist abgebohrt und die Innenkelly ausgefahren. Nun wird, wie oben rechts dargestellt, die Innenkelly auf den vorderen und hinteren Abstützeinrichtungen abgesetzt. Die Grippereinrichtung wird vom Gebirge gelöst und kann mit der Außenkelly, in Richtung Bohrkopf, an der Innenkelly nach vorne gleiten. Mit Hilfe der Abstützungen wird eine Neuausrichtung der Maschine vorgenommen, ist diese abgeschlossen, können die Gripper wieder in das Gebirge gespannt werden. Wie im Bild rechts unten dargestellt, werden zum Schluss die Abstützungen der Innenkelly eingefahren und der Bohrvorgang beginnt von neuem.²⁵

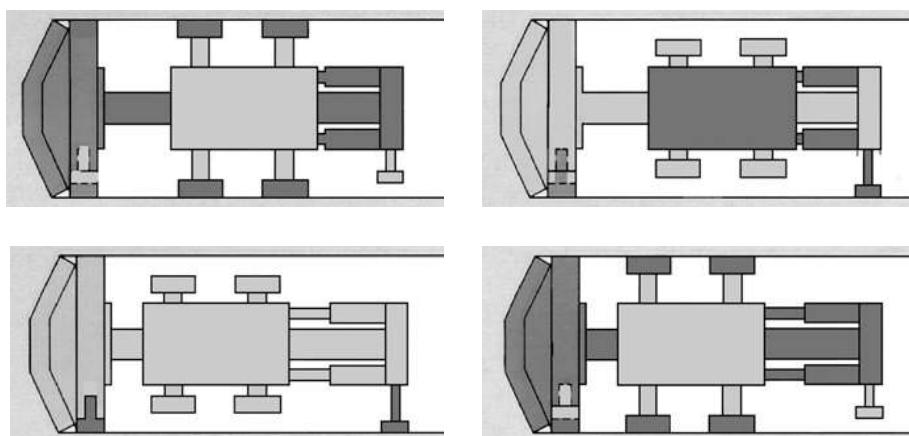


Abb. 2.5: Arbeitszyklus einer TBM-O (Quelle: Girmscheid [24, S. 444])

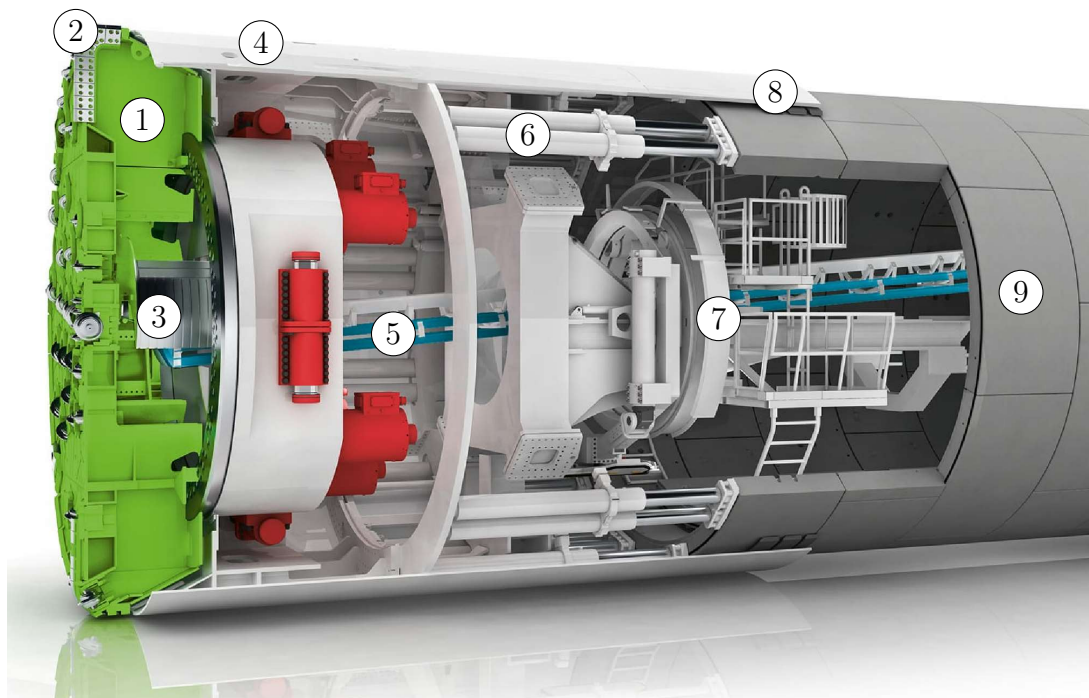
Im Zuge der periodischen Vortriebsarbeiten finden gleichermaßen periodische Revisions- und Unterhaltungsarbeiten statt. Diese Arbeiten werden täglich beziehungsweise wöchentlich zusammengefasst, und in den geplanten Stillstandszeiten ausgeführt, um die Vortriebszeit nicht zu beeinflussen. Tägliche Wartung und Inspektion sind entscheidend für die Zuverlässigkeit aller TVMs.²⁵

2.3.2 Tunnelbohrmaschine mit Schild – TBM-S

Der folgende Absatz betreffend die TBM-S wurde mit Hilfe der Veröffentlichungen von Girmscheid [24] und Goger [26] erarbeitet. Der Einsatzbereich dieses Maschinentyps liegt im nachbrüchigen bis gebräuchtem Festgestein. Zu erwarten sind hierbei viele Stützmaßnahmen direkt hinter dem Bohrkopf. Aus diesem Umstand heraus, bedient man sich einer kompletten Auskleidung des Tunnels mit Tübbing. Diese Sicherungsmaßnahme erfolgt im Schutze eines Schildmantels, der dem Bohrkopf nachgelagert ist. Mit dieser Methode wird auch die Arbeitssicherheit deutlich erhöht und psychischer Druck vom Personal genommen. Die Leistungsfähigkeit einer TBM-S ist in den eingangs erwähnten Gebirgsverhältnissen wesentlich größer, als jene einer herkömmlichen TBM-O. In Abb. 2.6 ist eine TBM-S der *Fa. Herrenknecht* dargestellt, wobei darunter die

²⁵Vgl. [24] Girmscheid, S. 444

wichtigsten Bauteile benannt sind.²⁶ Im Wesentlichen funktioniert der Gesteinsabbau mittels



- | | | |
|-------------|------------------------|------------------------|
| 1. Bohrkopf | 4. Schild | 7. Tübbingerektor |
| 2. Räumler | 5. Maschinenförderband | 8. Ringspaltverfüllung |
| 3. Muckring | 6. Vortriebszylinder | 9. Tübbingauskleidung |

Abb. 2.6: Tunnelbohrmaschine mit Einzelschild (TBM-S) (Quelle: Herrenknecht AG [28])

Bohrkopf und die Materialförderung über Räumler, Muckring und Maschinenförderband analog der TBM-O. Die Erläuterungen zu den Prozessen können unter Abschnitt 2.3.1 nachgelesen werden. Die Bauteile

- Schild
- Vortriebszylinder
- Tübbingerektor
- Ringspaltverfüllung und die
- Tübbingauskleidung

sind im Abschnitt 2.3.3 im Zuge der SM näher beschrieben. Der Vortriebsprozess einer TBM-S ist analog zur SM und kann daher von dieser abgeleitet werden. Da für das Fortschreiten der Maschine eine Abstützung der Vortriebszylinder auf dem letzten eingebauten Tübbingring unerlässlich ist, müssen ebenso dort Tübbinge eingebaut werden, wo aus Sicherheitsgründen eigentlich keine Notwendigkeit besteht. Auf Grund der schnellen Vorfertigung und Verlegung

²⁶Vgl. [24] Girmscheid, S. 447 f.

der Tübbingung wird mit einer TBM-S eine konstant hohe Leistung erzielt. Daraus resultiert in der Regel eine Bauzeitverkürzung gegenüber der TBM-O. In Bereichen mit schweren Störzonen kann es durch den Ausbau im Schildmantel (z.B. durch Kavernenbildung) zu Vortriebsproblemen kommen. In diesen Bereichen sind Bohrsondierungen von der Maschine aus vorzunehmen, um Aufschlüsse über den Baugrund zu erhalten und eine Maßnahmenplanung zu erarbeiten. Im Falle von Problemzonen müssen in der Maschine Einrichtungen installiert sein, welche das Setzen von Injektionen oder GFK-Ankern ermöglichen.²⁶

2.3.3 Schildmaschine – SM

Die verschiedenen Typen von Schildmaschinen wurden bereits in Abschnitt 2.1 eingehend beschrieben. In diesem Absatz wird auf die wichtigsten Bestandteile der Maschine eingegangen, die Informationen dafür stammen von Girmscheid [24]. Zu den wesentlichen Bestandteilen einer SM zählen:

- der geschlossene Schildmantel,
- Einrichtungen zum Einbau von Tübbingungen, oder zum Herstellen von Extruderbeton,
- ein mit Abbauwerkzeugen bestücktes Schneidrad (Vollschnittmaschine) und
- gegebenenfalls eine Abbaukammer, die als Druckluftkammer ausgebildet ist.

In dieser Diplomarbeit werden nur Vollschnittmaschinen behandelt, diese sind im Vergleich zu den Teilschnittmaschinen leistungsfähiger, da sie die gesamte Ortsbrust kontinuierlich abbauen. Jedoch ist im Falle eines Hindernisses (z.B. Findling), die Zugänglichkeit zur Ortsbrust auf Grund des Schneidrades deutlich erschwert und die Beseitigung von längerer Dauer. Der Abbau von gering standfesten Böden im Grundwasser erfordert den Einsatz eines geschlossenen Schildes. Hierbei gilt es, die Setzungen an der Oberfläche zu minimieren. Dies kann beispielsweise durch den Einbau einer Druckkammer in der SM erreicht werden, in der ein Stützmedium mit Druck beaufschlagt wird. In Abb. 2.7 wird ein Mixschild der Fa. Herrenknecht dargestellt, dieses ermöglicht die Stützung des Erdreiches mit verschiedenen Stützmedien.²⁷

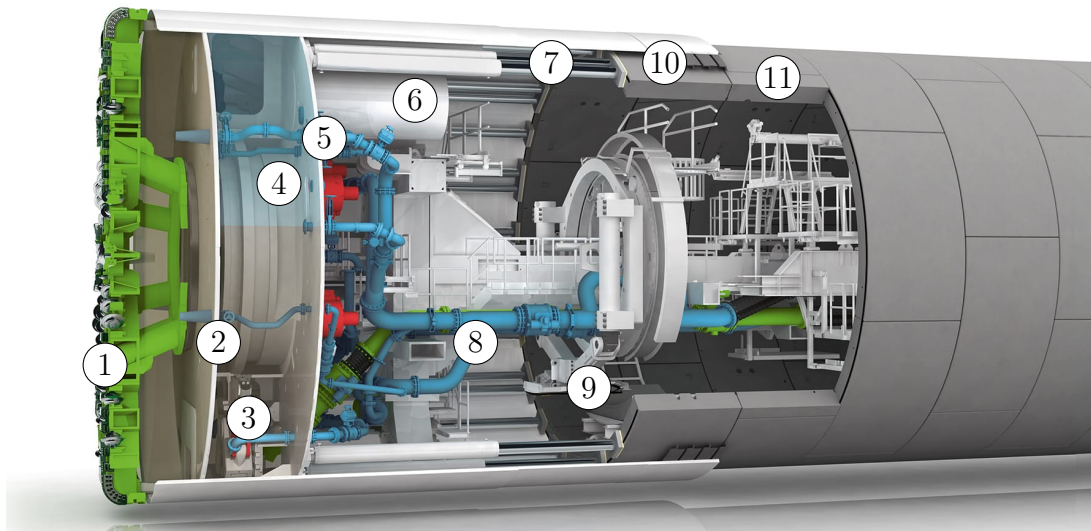
Im Anschluss werden jene Bauteile behandelt, die eine SM von einer TBM unterscheiden.

Schneidrad

Im Falle der SM dient das Schneidrad als Träger der Abbauwerkzeuge. Im Lockergestein werden beim Vollschnittabbau meist Speichenschneidräder verwendet, welche mit den verschiedenen Abbauwerkzeugen bestückt sind. Der Raum zwischen den Speichen dient zum Fördern des Abbaumaterials. Unterschieden wird zwischen offenem Speichenschneidrad und Felgenspeichenschneidrad. Ersteres wird in Gebirgsarten eingesetzt, wo keine Findlinge, beziehungsweise größere Hindernisse, anzutreffen sind. Dort, wo Findlinge erwartet werden, und bei inhomogenen Böden mit unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften, bedient man sich dem Felgenspeichenschneidrad. Dieses verteilt die lokalen Belastungen, zum Beispiel aus einem angetroffenen Findling, über die äußere Felge von einer Speiche auf alle anderen gleichmäßig. Felgenspeichenschneidräder werden meist gegenüber dem nachfolgenden Schildmantel mit einem Überschnitt von rund 2 cm gefertigt. Dies verlangt zwar ein größeres Drehmoment der Maschine aufgrund erhöhter Reibung, gegenüber dem offenen Speichenschneidrad, jedoch wird das Risiko eines Verklemmens des Schildmantels deutlich vermindert.²⁸

²⁷Vgl. [24] Girmscheid, S. 496 ff.

²⁸Vgl. [24] Girmscheid, S. 499 f.



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

Abb. 2.7: Mixschild (Quelle: Herrenknecht AG [30])

Die Schneidräder können mit Hilfe einer Gelenklagerung kippbar installiert werden. Dies ist erforderlich, um die Soll-Lage der Maschine beim Anschneiden eines Findlings zu gewährleisten, und ein Abdrücken, beziehungsweise das Einklemmen, der Maschine zu unterbinden. Mit dem geneigten Schneidrad kann aktiv gegen eine Verschiebung gesteuert werden. In Abb. 2.8 ist rechts im Bild das gekippte Schneidrad zu sehen. Im linken Bild der Abb. 2.8 ist ein offenes Speichenschneidrad (drei Speichen) mit Verschlussplatten dargestellt. Der Raum zwischen den Speichen dient der Materialförderung. Das kontinuierlich abgeschälte Gestein der Ortsbrust erzeugt durch den Vorschub der Maschine einen Materialfluss durch das Schneidrad, wo es, je nach Maschinentyp spezifisch, gefördert wird. Zwischen den Speichen können Verbauplatten angeordnet sein, welche eine aktive Ortsbruststützung ermöglichen. Diese sind in der Regel hydraulisch verschieb- und/oder klappbar. Sie dienen auch zum Schutz der Mannschaft bei Reparaturarbeiten und Werkzeugtausch am Schneidrad.²⁸

Bestückt sind die Schneidräder einer SM mit folgenden Abbauwerkzeugen:

- Messer und Zähne (Ton, Sand, Kies)
- Stichel (Schluff, Sand, Ton)
- Hochdruckwasserstrahldüsen (Fein- und Mittelsande)
- Meißel (harte Böden)
- Rollenmeißel / Disken (Fels und Findlinge)

Die Auswahl richtet sich nach dem mechanischen Verschleiß, welcher oft im Labor geprüft wird. In heterogenen Böden wird, um einen optimalen Arbeitsprozess zu gewährleisten, eine

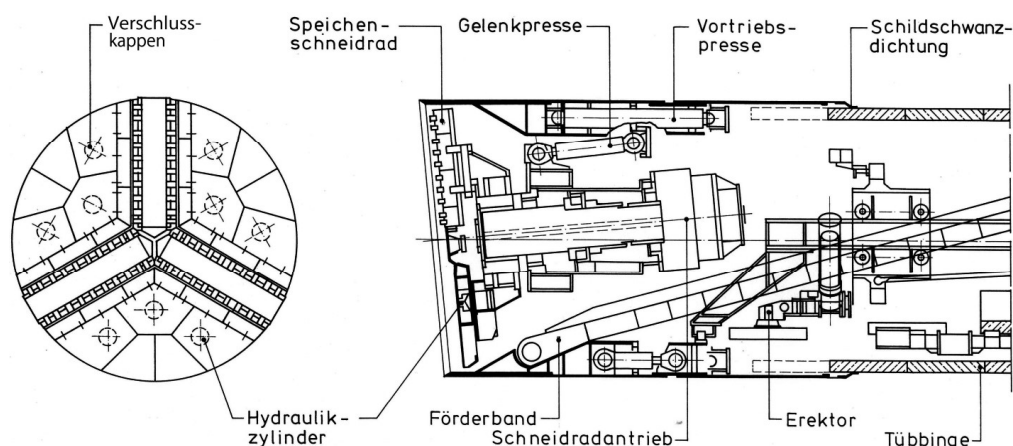


Abb. 2.8: Offener Schild mit Speicherschneidrad und Verschlussklappen (Quelle: Maidl et al. [33, S. 195])

Kombination verschiedener Werkzeuge gewählt. Die Schildgestaltung und Werkzeugbestückung haben einen sehr großen Einfluss auf die Vortriebsgeschwindigkeit. Verschiedene Kombinationen unter Berücksichtigung der Bodenklasse sind in Tab. 2.3 dargestellt.²⁹

Schild

Ein weiterer wichtiger Maschinenabschnitt ist der Schild. Laut Girmscheid [24] besteht er aus folgenden Bestandteilen:

Schildmantel: Schildmäntel werden entweder einteilig oder zweiteilig mit zwischengeschaltetem Gelenk ausgeführt. Die Anordnung eines Gelenkes im Schild richtet sich vor allem nach dem Verhältnis von Schilddurchmesser zu Schildlänge und den angedachten Kurvenradien des Tunnelvortriebs. Ein im Verhältnis zum Durchmesser langer Schild liegt eher starr im Boden und lässt sich schwerer steuern, jedoch ist er weniger empfindlich gegenüber inhomogenem Baugrund (zB. weiche Linsen, einseitig hartes Gestein). Der kurze Schild ist leichter steuerbar, dadurch aber auch empfindlicher was das Abrücken aus der Soll-Lage betrifft. Ausgeglichen wird dieser Umstand durch die Überschneidtechnik, das heißt, dass der Schneiddurchmesser etwas größer als der restliche Schild gewählt wird, wie in Abb. 2.9 dargestellt ist. Lange Schilde werden durch den Einbau von Gelenken im Schildmantel flexibler gestaltet, dies bringt aber Probleme bei der Abdichtung des Schildmantels und der statischen Durchbildung im Gelenkbereich mit sich.³⁰

Schildschwanzdichtung: Die Schildschwanzdichtung ist zwischen dem Schildende und der Tübbingauskleidung situiert. Sie hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Abdichtung der Fuge zwischen Schildschwanz und Tübbingauskleidung
- Ausgleich von Unebenheiten der Auskleidung auf Grund von Einbautoleranzen der Tübbinge

Auf die Schildschwanzdichtung wirken von der Hohlraumseite aus Erddruck, Wasserdruck und Mörtelverpressdruck, welcher durch das Verpressen des Ringspalts zwischen Tübbing und Hohlraum entsteht, ein. Die Dichtung besteht entweder aus mehreren hintereinander angeordneten Kunststoffprofilen, oder aus einer Reihe nacheinander liegender Stahlbürsten,

²⁹Vgl. [24] Girmscheid, S. 502 ff.

³⁰Vgl. [24] Girmscheid, S. 505 ff.

Tab. 2.3: Abbauwerkzeugeinsatz (Quelle: Girmscheid [24, S. 503])

| | Bodenklasse | Abbauwerkzeuge / konstruktive Gestaltung |
|----|---|---|
| 1 | Leicht lösbar Bodenarten: • nicht- bis schwachbindige Sande, Kiese, etc. | • Schälmesser, durchgehende Schneidkante |
| 2 | Mittelschwer lösbar Bodenarten (bindig, leichte bis mittlere Plastizität): • Sand, Kies • Schluff und Ton | • Schälmesser, Stichel • Schälmesser, Stichel, vorausseilender Zentrumsschneider |
| 3 | Schwer lösbar Bodenarten (bindig, leichte bis mittlere Plastizität): | |
| 3a | • wie 1 und 2, jedoch Korngröße > 63 mm, Steine 0,01 – 0,10m ³ | • wie 2, sowie Rollendiskens und kleine Steinbrecher |
| 3b | • wie 1 und 2, jedoch Findlinge 0,10 – > 1,00m ³ | • wie 2, sowie Rollendiskens und größere Steinbrecher |
| 4 | Leicht lösbarar Fels oder vergleichbare Bodenarten: • Fels bröckelig, schieferig, weich, verwittert • vergleichbare, verfestigte, • nichtbindige sowie bindige Böden | • Disken, Rollenmeissel, Meissel • Abräumzähne |
| 5 | Schwer lösbarer Fels: • hohe Gefügefestigkeit | • Disken, Meissel |

deren Zwischenräume mit Fett gefüllt sind. Das Fett wird permanent unter Druck gehalten, welcher höher als der Außen vorherrschende Druck sein muss, um die Dichtigkeit zu gewährleisten. Das Fett wird kontinuierlich an den Außenseiten der Tübbing abgestreift, wodurch enorme umweltverträgliche Mengen erforderlich sind.³⁰

Ringspaltverpressung: Wie Abb. 2.9 zeigt, entsteht durch den Durchmesserunterschied zwischen Schneidrad und Tübbingauskleidung ein Hohlraum geringer Breite. Dieser Ringspalt muss aus folgenden Gegebenheiten kraftschlüssig verpresst werden:

- Verhinderung des Nachsackens von Boden
- elastische Bettung der Tübbingelenkkette
- zusätzlicher Schutz der Tübbing gegen aggressives Grundwasser und Boden
- Auflockerungszone im anstehenden Gebirge wird nachverpresst

Das Einbringen von Perlkies oder Zementsuspension erfolgt durch radial am Umfang der Maschine angeordnete Injektionslanzen.³⁰

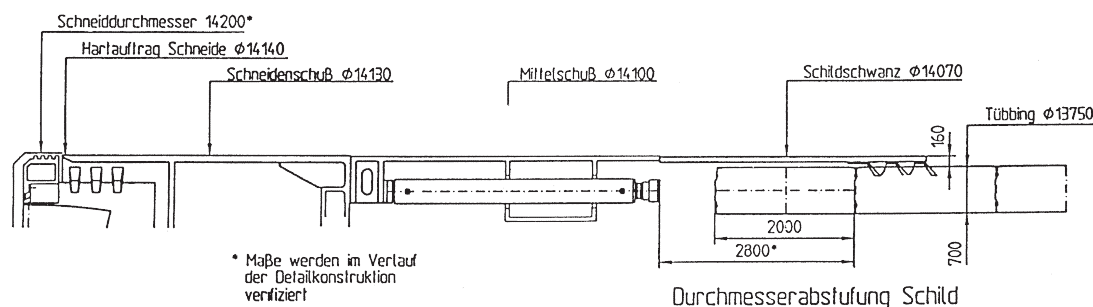


Abb. 2.9: Einteiliger Schildmantel mit Durchmesserabstufung (Quelle: Girmscheid [24, S. 505])

Vorschub- und Steuerpressen

Im Schutze des Schildes sind im hinteren Maschinenbereich die Vorschub- und Steuerpressen angeordnet. Im Falle eines langen Schildes können diese alternativ im Gelenkbereich situiert werden. Zu den Aufgaben der Pressen zählen:³¹

- Erzeugung des notwendigen Anpressdruckes für die Abbauwerkzeuge
- Steuerung der Vortriebsrichtung (speziell im Falle von Kurvenfahrten)
- vornehmen von Richtungskorrekturen
- Lagesicherung neu eingebauter Tübbinge

Über die Einstellungen der Steuerpressen wird die Maschine gelenkt. Kurven werden polygonal in Abschnitten, welche der Hublänge entsprechen, angenähert. Dabei ist vor allem auf die exzentrische Belastung der Tübbinge während des Vorschubes zu achten. Über Vermessungen wird die Lage der Maschine kontinuierlich mit den Vorgaben verglichen, und wenn notwendig, korrigiert. Die Tübbingbeanspruchung aus den Pressen wird mit Hilfe von dazwischen gelagerten Pressenschuhen vergleichmäßigt. Daraus erfolgt auch die Zusammenfassung mehrerer Pressen zu parallelgeschalteten Pressengruppen, welche gemeinsam gesteuert werden und Zwängungen reduzieren.³¹

Tübbingauskleidung

Für das Versetzen der Tübbinge ist ein Tübbingerektor verantwortlich, dieser wird in Abb. 2.10 dargestellt. Er arbeitet ebenfalls im Schutz des Schildes. Versorgt wird der Erektor über die NLE mit den einzubauenden Tübbingen. Die Hauptbestandteile dieser Einrichtung sind ein Fahrträger, der Grundrahmen, ein Drehrahmen mit Teleskopeinrichtung und die Traverse mit dem Greifkopf. Der Erektor kann entlang der Maschinenachse auf dem Fahrträger in einem gewissen Bereich vor und zurück bewegt werden, um die angelieferten Tübbinge zu erfassen. Die Aufnahme der Betonsegmente erfolgt mittels Vakuumsaugplatten. Anschließend fährt der Erektor an den Einbauort, vollzieht eine Drehung zum gewünschten Platz, und richtet den Tübbing mittels Teleskopeinrichtung anhand der bereits eingebauten Segmente richtig aus. Die Aufnahmeplatten sind außerdem mit Zentrierkonen ausgestattet, um ein genaueres Versetzen zu ermöglichen. Anschließend erfolgt die Verschraubung der einzelnen Segmente in Längs- und Ringrichtung.³²

Im Laufe der Jahre haben sich verschiedene Konstruktionsvarianten der Tübbinge am Markt etabliert, davon sind laut Maidl et al. [33] die wichtigsten Typen:

³¹Vgl. [24] Girmscheid, S. 508 ff.

³²Vgl. [24] Girmscheid, S. 532

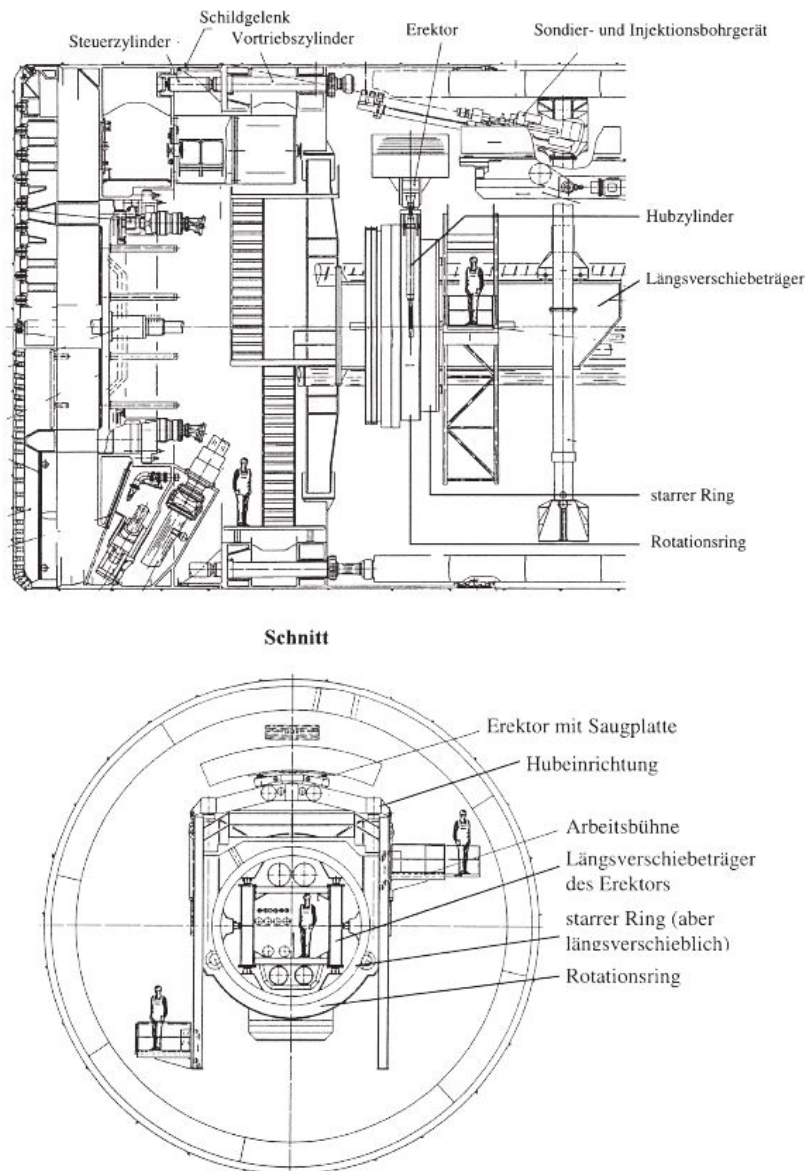


Abb. 2.10: Tübingerrekor der Fa. Wirth (Quelle: Girmscheid [24, S. 533])

Blocktübbling mit rechteckigem Grundriss: Diese ist eine der am häufigsten eingesetzten Varianten. Dabei besteht ein Ring aus fünf bis acht Einzelsegmenten und einem Schlussstein. Es ergibt sich eine ebene Ringgeometrie, wodurch jeder Ring alleine stabil und tragfähig ist. Ein in der Regel keilförmig ausgebildeter Schlussstein ermöglicht durch das Schließen eine Vorspannung des Tübbingringes. Vor allem bei einschaligen, wasserdichten Auskleidungen hat sich diese Konstruktionsweise bewährt. Abgedichtet werden die Betonsegmente mit umlaufenden Dichtprofilbändern, welche in einer Nut entlang den Fugen eingelegt sind. Eine hohe Ringbauqualität und damit einher gehend die Steifigkeit der Auskleidung wird, wie in Abb. 2.11 dargestellt, durch den Versatz der Längsfuge von Ring zu Ring erreicht.³³ Da die Trasse eines Tunnels jedoch nicht gerade ist, sondern eine räumliche Kurve darstellt, muss sich die Tübbingauskleidung an diese anpassen. Um dies ohne ein einseitiges Öffnen

³³Vgl. [33] Maidl et al., S. 131 ff.

der Ringfuge zu gewährleisten, werden die Ringe konisch ausgebildet. Es kommen dabei zwei Systeme zur Anwendung:³³

- Zum Einsatz gelangt ein konischer Universalring, wodurch sich durch dessen Drehung jede beliebige Richtung einschlagen lässt. Es wird der immer gleiche Ring verwendet, was schalungstechnische und logistische Vorteile mit sich bringt. Jedoch kann es bei dieser Variante zum Stoß von Längsfugen kommen, wodurch die Dichtheit beeinträchtigt wird. Außerdem ergibt sich die Position des Schlusssteins aus der jeweiligen Kurvenfahrt und kann somit nicht frei gewählt werden, was dazu führt, dass der Schlussstein in der Sohle zu liegen kommen kann. Ist dies der Fall, muss der Ringbau in der Firste begonnen werden, was zusätzliche Sicherungseinrichtungen in der Maschine erfordert.
- Beim zweiten System werden mehrere Ringtypen, konkret Rechts-, Links- und Parallelringe, für die entsprechende Kurvenfahrt hergestellt. Hier ist der Längsfugenversatz und die Schlusssteinposition frei realisierbar. Jedoch bringt diese Variante einen höheren logistischen Aufwand mit sich, da jeweils der passende Ring zur Maschine geliefert werden muss. Außerdem ist die Tübbingherstellung aufwändiger und somit teurer.

Beim Blocktübbling findet der Ringbau erst nach dem Bohrvorgang statt, wodurch eine lange Zykluszeit resultiert. In Abb. 2.11 wird die Tunnelauskleidung mittels Blocktübblingen dargestellt.³³

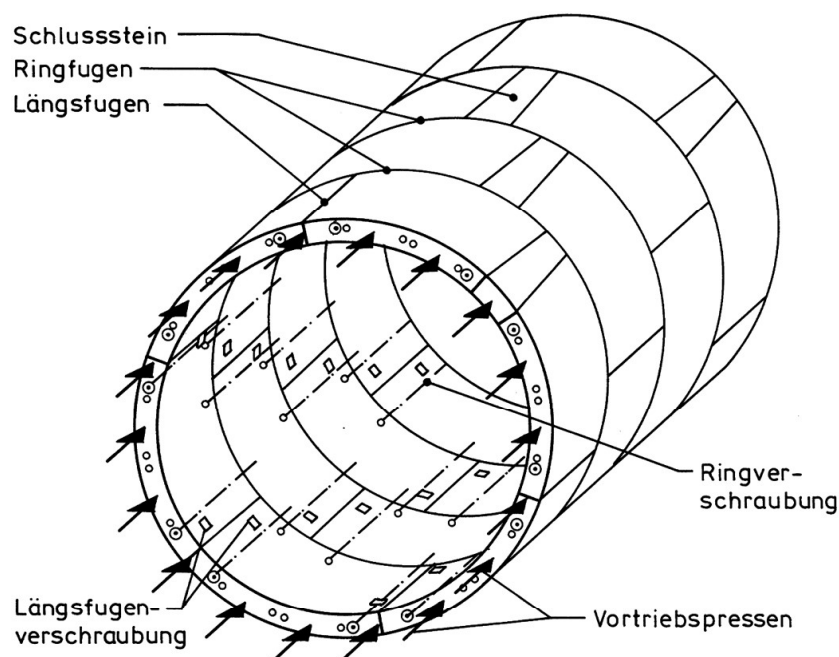


Abb. 2.11: Blocktübbling mit Schlussstein und Längsfugenversatz (Quelle: Maidl et al. [33, S. 132])

Hexagonaltübbling: Hexagonaltübblinge können bei einschaligen- oder zweischaligen Tunnelauskleidungen eingesetzt werden. Heute finden sie vermehrt Einsatz bei einschaligen Wasserstollen, die mit einer DSM hergestellt werden. Aus der hexagonalen Tübblingform, welche in Abb. 2.12 ersichtlich ist, entsteht bei Aneinanderreihung keine durchgehende Ringfuge, da diese zwischen benachbarten Steinen um eine halbe Breite versetzt ist. Die Tübbingauskleidung wird dadurch steifer als bei Blocktübblingen ohne Versatz. Im Falle eines

kleinen Tunneldurchmessers besteht die Auskleidung lediglich aus vier Tübbing, wobei sich der Sohl-tübbing meist von First- und Seitentübbing unterscheidet. Aufgrund dieser maximal zwei verschiedenen Formen wird die Produktion der Segmente sehr wirtschaftlich. Nachteile hat diese Variante erst ab einem Tunneldurchmesser von etwa 4,50 m. Aus zu großen Tübbing ergeben sich Schwierigkeiten betreffend Transport und Montage.³³

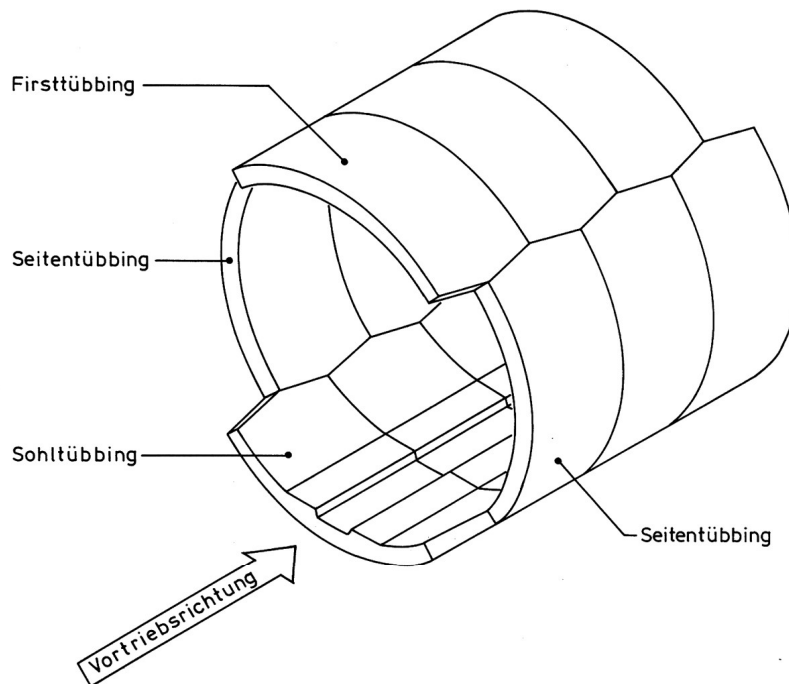


Abb. 2.12: Hexagonal-tübbing (Quelle: Maidl et al. [33, S. 135])

Rhomboide und trapezoide Tübbingsysteme: Ein Tübbingring dieses Typs besteht aus einem trapezförmigen Sohlsegment, vier rhombenförmigen Seitensegmenten und wieder einem trapezförmigen Schlussstein (siehe Abb. 2.13). Mit fortschreitender Automatisierung in der Tübbingmontage entwickelten sich Systeme mit Steckbolzen und Führungsschienen. Eine Optimierung der Geometrie soll zusätzlich Zwängungen vermindern, und der Einbau von Gleitschienen und Zentrierdübel die Qualität der Auskleidung erhöhen. Erfolgreich wurde dieses System bei der Errichtung von Infrastrukturtunneln in Paris und Mailand eingesetzt.³³

Spreiztübbinge Liegt standfestes Gebirge vor, so kann der Ringbau abseits des Schildes erfolgen. Im Falle des Spreiztübbings wird der Ring gegen das anstehende Gebirge gepresst, wodurch eine Ringspaltverpressung beziehungsweise -verfüllung entfallen kann. Anwendung findet dieses System in tonigen Böden mit langer Standzeit (Londoner U-Bahnbau). Gespreizt wird der Tübbingring durch das mehr oder weniger weite Hineindrücken des keilartigen Schlusssteines. Dieser muss weniger Breit als die übrigen Tübbinge ausgeführt sein, um einen Überstand zu unterbinden. Vorteil dieser Bauweise ist eine sehr kurze Ringbauzeit, jedoch erfolgt diese auf Kosten von Gleichmäßigkeit der Tunnelauskleidung. Sie sind für einschalige dichte Bauwerke ungeeignet.³³

Auszulegen ist der Erektor auf die Leistung der SM, das Versetzen eines kompletten Tübbingringes sollte etwa 20 – 30 Minuten in Anspruch nehmen.

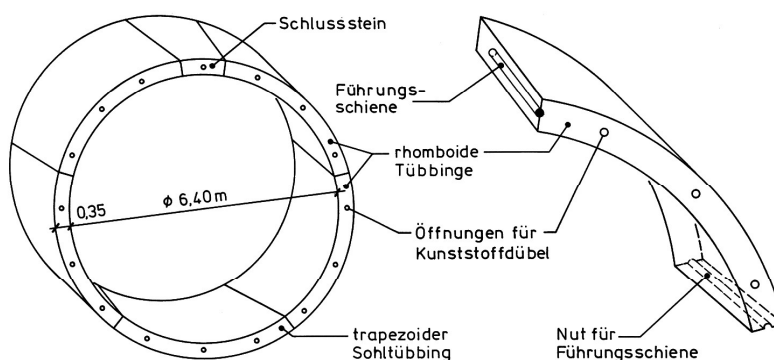


Abb. 2.13: Rhomboide und Trapezförmige Tübbingsysteme (Quelle: Maidl et al. [33, S. 136])

2.3.4 Doppelschildmaschine – DSM

Die Ausarbeitung dieses Abschnittes stützt sich auf die Werke von Girmscheid [24], Goger [26] und Maidl et al. [33]. Die DSM, oder auch Tunnelbohrmaschine mit Doppelschild (TBM-DS) beziehungsweise Teleskopschild-TBM, wird bei Tunnelbauprojekten, die neben größeren Abschnitten mit standfestem Gebirge auch Bereiche mit gebrächem Gebirge ohne anstehendes Grund- und Gebirgswasser aufweisen, eingesetzt. In Abb. 2.15 ist zur generellen Übersicht eine Maschine der Fa. Herrenknecht mit den wichtigsten Bestandteilen dargestellt.^{34 35}

Dieser Maschinentyp wurde zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit aus einer gewöhnlichen TBM-S mit Tübbingausbau entwickelt. Sie besteht im Prinzip aus drei in Längsrichtung unterteilten Maschinenbereichen:³⁶

- Frontschild mit Bohrkopf
- Teleskopschild im Mittelbereich
- Anpressschild mit Schwanzschild zum Einbau der Tübbinge im hinteren Bereich

Die Leistungssteigerung beruht auf der Parallelschaltung von Bohrprozess und Auskleidungsprozess mit Tübbing. Dadurch wird der Bohrvorgang bei einer DSM nur während des Nachschiebens des hinteren Anpressschields unterbrochen, im Gegensatz zu den vorher genannten Maschinentypen, bei denen der Bohrprozess über die gesamte Ringbauzeit und Umstellzeit pausiert werden muss. Laut Girmscheid [24] entspricht die Bohrzeit bei TBM-S ungefähr der Ringbauzeit, daraus folgt, dass die DSM theoretisch das Doppelte an täglicher Nettobohrzeit erreicht. Prinzipiell wird bei der Maschine nach Abb. 2.15 in Frontschild und hinteren Schild unterschieden. Diese sind übergreifend aneinander gebaut, dabei wird der hintere Schild überlappend in den Frontschild eingeschoben. Der hintere Schild wird seinerseits noch einmal in

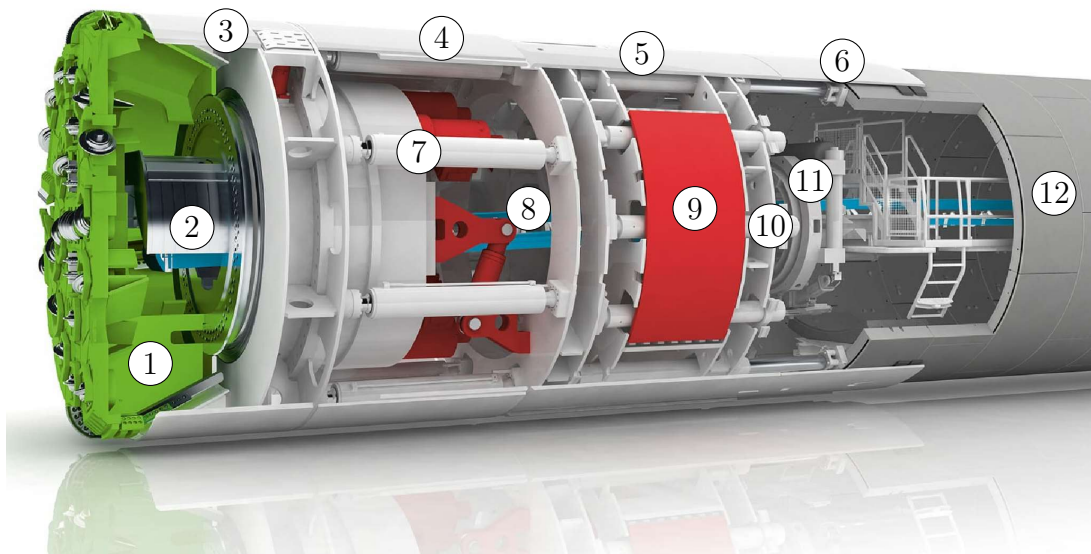
- Teleskopschild,
- Anpressschild und
- Schildschwanz

unterteilt.³⁶ Der Frontschild mit Bohrkopf entspricht dem Schild einer kurzen TBM-S. In ihm

³⁴Vgl. [33] Maidl et al., S. 450

³⁵Vgl. [24] Girmscheid, S. 448

³⁶Vgl. [24] Girmscheid, S. 448 ff.



- | | | |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1. Bohrkopf | 5. Anpressschild | 9. Grippereinrichtung |
| 2. Muckring | 6. Schildschwanz | 10. Schildvortriebszylinder |
| 3. Frontschild | 7. Hauptvortriebszylinder | 11. Tübbingerektor |
| 4. Teleskopschild | 8. Maschinenförderband | 12. Tübbinauskleidung |

Abb. 2.14: Doppelschildmaschine (DSM) (Quelle: Herrenknecht AG [27])

sind ringsum die Längsvorschubpressen (Bohrkopfverschubzylinder) angeordnet. Diese stützen sich einerseits auf die Wiederlager im Frontschild, andererseits an den Anpressschild. Der Anpressschild wird, analog der TBM-O, mit einer Grippereinrichtung, quer zur Maschinenlängsachse, im Gebirge verspannt. Zwischengeschaltet ist der Teleskopschild, welcher über jede Stellung der Vorschubzylinder einen geschlossenen Schild, und damit umfassenden Schutz des Personals im Inneren der Maschine, ermöglicht. Ein sicherer Übergang zwischen Schild und Tübbingauskleidung wird durch den Schildschwanz gewährleistet, er wirkt analog der TBM-S. Im Schutz des Schildschwanzes sind ringsum die Schildvorschubzylinder angeordnet. Diese stützen sich zwischen Anpressschild und eingebautem Tübbingring ab. Auf die beiden Arbeitsmodi der DSM wird im Folgenden genauer eingegangen.³⁶

Doppelmodus (Double Shield Mode): Diese Arbeitsweise wird in standfestem Gebirge gefahren, in der eine Abstützung an der Ausbruchswand mittels Grippereinrichtung möglich ist. Der Schreitzyklus läuft wie folgt ab:^{37, 38}

- *Bohr- und Tübbingversetzphase*

Der Anpressschild wird mit dem anstehenden Gebirge verspannt. Im Frontschild beginnt der Bohrvorgang, in dem die Bohrkopfverschubzylinder ausgefahren werden. Der Vorgang ist beendet, wenn die volle Hublänge der Zylinder abgebohrt ist. Parallel dazu erfolgt im hinteren Schild der Versetzvorgang mittels Tübbingerektor. Dabei werden die Schildvorschubzylinder zur Abstützung der Tübbinge verwendet, bis der

³⁷Vgl. [26] Goger, S. 128

³⁸Vgl. [24] Girmscheid, S. 450 f.

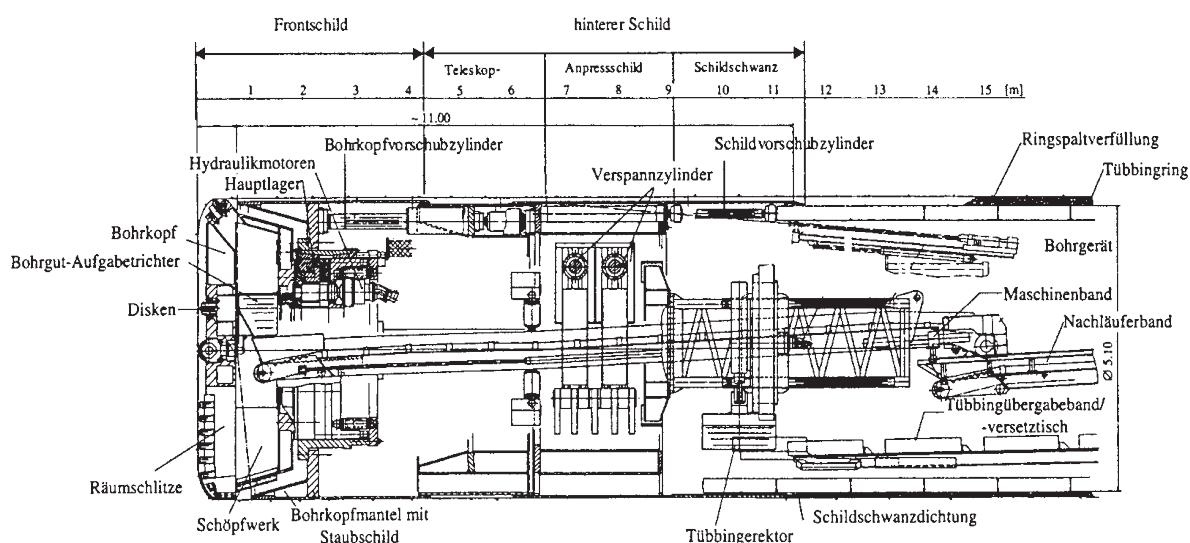


Abb. 2.15: Längsschnitt einer Doppelschildmaschine (DSM) (Quelle: Girmscheid [24, S. 449])

Ring geschlossen ist. Im Allgemeinen soll der Bohrvorgang am kritischen Weg zu liegen kommen, das heißt, der Versetzvorgang ist kürzer als der Bohrvorgang zu dimensionieren.

- *Schreitphase*

Die Schreitphase beginnt mit dem kraftschlüssigen Lösen von Bohrkopfvorschubzylindern und Anpressschild. Anschließend wird der hintere Schild durch die Schildvorschubzylinder über eine Hublänge, vom fertig gebauten Tübbingring aus, nach vorne gepresst. Der hintere Schild wird dabei im Teleskopschild wieder in den Frontschild eingefahren. Dieser Prozess dauert nur einige Minuten, ehe der nächste Bohr- und Tübbingversetzvorgang beginnt.

Einfachmodus (Single Shield Mode): Im nicht standfestem Gebirge wird die DSM als TBM-S gefahren. Dabei werden die Bohrkopfvorschubzylinder komplett zusammen gezogen und kommen beim Bohrprozess nicht zum Einsatz. Der Vorschub erfolgt ausschließlich durch die Schildvorschubzylinder, welche sich am letzten Tübbingring abstützen. Hierbei müssen Bohr- und Tübbingversetzvorgang analog der TBM-S hintereinander geschaltet sein.

Für den Abtransport des Abbruchmaterials eignet sich auf Grund des kontinuierlich hohen Anfalls am besten ein Förderband. Des Weiteren muss die Tübbinglogistik entsprechend dimensioniert sein. Um einer diskontinuierlichen Anlieferung der Tübbinge in den Tunnel Rechnung zu tragen, werden auf der NLE meist Tübbingmagazine zwischen geschaltet, aus denen der Erektor gleichmäßig mit Nachschub versorgt wird.³⁸

2.4 Planung und Vergütung von Untertagebauten mit maschinellem Vortrieb

Der folgende Abschnitt basiert auf Informationen aus den Werken der ÖGG [34], Goger [26] und der *ÖNORM B 2203-2* [37], diese befindet sich derzeit in Überarbeitung. Da sich diese Diplomarbeit in Kapitel 4 mit den Ausschreibungen und Kalkulationen verschiedener österreichischer und internationaler Projekte beschäftigt, soll im Folgenden der Aufwand solcher Arbeiten

verdeutlicht werden. Vor allem Ausschreibungen haben je nach Auftraggeber und Staat unterschiedliche Erscheinungsbilder. In dieser Diplomarbeit wird stellvertretend zur Veranschaulichung der Arbeitsschritte die Vorgehensweise aus den *ÖNORMEN* herangezogen, welche für öffentliche Auftraggeber zwingend einzuhalten ist. Hier soll die Abfolge der einzelnen Schritte, beginnend mit der Planung, bis hin zur Vergütung, eines Tunnelbauprojektes kurz umrissen werden. Die Verfahrensschritte sind auf Basis der Veröffentlichungen der ÖGG bzw. der einschlägigen Normen kurz beschrieben. Außerdem soll damit ein gewisses Maß an Unvorhersehbarkeit im Verlauf einer Tunnelbaustelle ausgedrückt werden. Vor allem im Zuge der Ausführung treten unbeständige und oft auch unvorhersehbare Gegebenheiten auf, welche in geringem bis großem Ausmaß von der Planung abweichen können. Auf Grund der, zu diesem Zeitpunkt, bereits im Einsatz befindlichen, und damit nicht änderbaren Maschinenauswahl, rücken die Arbeiten von Mannschaft und Ingenieuren in den Mittelpunkt des baubetrieblichen Geschehens. Sie sind es, die Entscheidungen treffen, welche oft eine Anpassung der Vergütung dieser Projekte erfordert.

2.4.1 Geotechnische Planung

Laut Österreichischer Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) sind die erforderlichen geotechnischen Parameter im Voraus nur in geringem Umfang und mit begrenzter Genauigkeit bestimmbar. Beim kontinuierlichen Vortrieb mittels TVM ist das Vortriebskonzept und der Ausbau nur in einem geringen Maße an die tatsächlichen Gegebenheiten anpassbar. Den Planungsaufgaben wird daher eine besondere Sorgfaltspflicht auferlegt, dabei gilt es auch, mögliche auftretende Zusatz- und Sondermaßnahmen zu berücksichtigen. In diesem Zuge ist insbesondere eine geotechnische Risikoanalyse zu erstellen, welche sich der Identifizierung und Untersuchung von möglichen Gefährdungen widmet. Laut ÖGG sind beim kontinuierlichen Vortrieb folgenden Punkten besondere Beachtung zu schenken:³⁹

- geringe Anpassbarkeit des tunnelbautechnischen Konzeptes während der Bauausführung
- der Ausbau erfolgt in einem räumlichen und zeitlichen Abstand zum Ausbruch
- je nach Typ der TVM kann der Vortrieb auch im Grenzbereich der Hohlraumstabilität weitergeführt werden (zum Beispiel beim Einsatz einer Schildmaschine)
- die Herstellung von Voraussicherungsmaßnahmen ist mit hohem Aufwand verbunden
- im Falle einer geschlossenen Maschine kann zur Gebirgsstützung ein Stützmedium eingesetzt werden
- Verschiebungsmessungen sind je nach Maschinentyp nur eingeschränkt möglich
- Sondermaßnahmen wie das Begehen der Abbaukammer, Ausbläser, Hindernisbeseitigung, instabile Ortsbrust und Verkleben müssen erfasst und berücksichtigt werden

Die Planung eines Tunnelbauwerkes umfasst in Österreich die Stufen der:³⁹

1. Machbarkeitsstudie
2. Vorentwurf
3. Einreich- und Ausschreibungsplanung
4. Ausführungsplanung

³⁹Vgl. [34] ÖGG, S. 6 ff.

Mit fortschreitender Projektdauer wächst die Menge an Informationen, welche konsequent und fortlaufend niedergeschrieben und präzisiert werden muss. Die Ausarbeitung der notwendigen Planungen erfolgt fachübergreifend durch Fachleute der Gebiete Ingenieurgeologie, Hydrologie, Geotechnik, Bautechnik und Maschinenbau. Eine geotechnische Planung soll das Ziel eines wirtschaftlichen, gesamtheitlichen Ergebnisses verfolgen, in dem den prognostizierten Gebirgsverhältnissen, den zu erfüllenden Sicherheitsanforderungen, der Dauerhaftigkeit und den Umwelterfordernissen Rechnung getragen wird. Laut ÖGG besteht die geotechnische Planung aus drei Phasen:³⁹

Phase 1 – Planung: Zu Beginn gilt es, die zu erwartenden Gebirgseigenschaften festzulegen und eine Einteilung in Gebirgsarten vorzunehmen. Darauf aufbauend wird das Gebirge in Gebirgsverhaltenstypen unterteilt, welche in Tab. 2.5 beschrieben werden. Weiters wird in dieser Phase die Wahl der TVM vorgenommen und bau- bzw. maschinentechnische Maßnahmen festgelegt. Außerdem wird das Systemverhalten des Gebirges im Zuge des Vortriebs prognostiziert, anhand dem die Ermittlung der Vortriebsklassen laut ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 [37] erfolgt.

Phase 2 – Planung der TVM für die Bauausführung: In dieser Phase erarbeitet der Bieter im Rahmen der Angebotsbearbeitung ein maschinentechnisches Konzept für die im Zuge der Phase 1 vorgesehenen TVM. Eine maschinentechnische Detailplanung erfolgt erst nach Auftragsvergabe. Dabei müssen Anforderungen des Bauvertrages und der geotechnischen Planung in die Maschinenauslegung eingearbeitet werden.

Phase 3 – Bauausführung: Während der Bauausführung gilt es Daten, die im Zuge des Vortriebs gewonnen werden können, zu erfassen, auszuwerten und zu dokumentieren. Dabei sind vor allem folgende Daten wichtig:

- Gebirgsparameter
- allgemeine Beobachtungen
- bau- und maschinentechnische Maßnahmen
- betriebstechnische Daten der TVM

Auf Basis der im Vorfeld ermittelten Parameter kann ein Abgleich mit den tatsächlich angetroffenen Verhältnissen erfolgen und die geotechnische Planung fortgeschrieben werden.

Es folgt nun eine detaillierte Beschreibung der Phase 1 nach ÖGG. In Abb. 2.16 wird der Planungsablauf in sieben Schritte unterteilt. Dabei umfassen die Schritte 1 – 6 die geotechnische Planung und Schritt 7 die Ausschreibung.⁴⁰

1. Schritt – Bestimmung der Gebirgsart: Auf Basis eines geologischen Modells wird für jede im Zuge des Vortriebs vorkommende Gebirgsart deren geotechnische Eigenschaften bestimmt. Aussagekräftige Werte werden dabei aus Erkundungsmaßnahmen gewonnen oder aus ingenieurmäßig fundierten Erfahrungswerten abgeleitet. Für Gebirge mit gleichartigen Parametern erfolgt die Einteilung in eine Gebirgsart.

2. Schritt – Bestimmung des Gebirgsverhaltens, Zuordnung zu Gebirgsverhaltenstypen: Im nächsten Schritt werden der Gebirgsart die örtlichen Einflussfaktoren zugewiesen, dazu zählen Bergwasserverhältnisse, räumliche Orientierung der Trennflächen, örtliche Spannungszustände und gegebenenfalls zusätzliche Faktoren. Für Bereiche, in denen ähnliche

⁴⁰Vgl. [34] ÖGG, S. 12 ff.

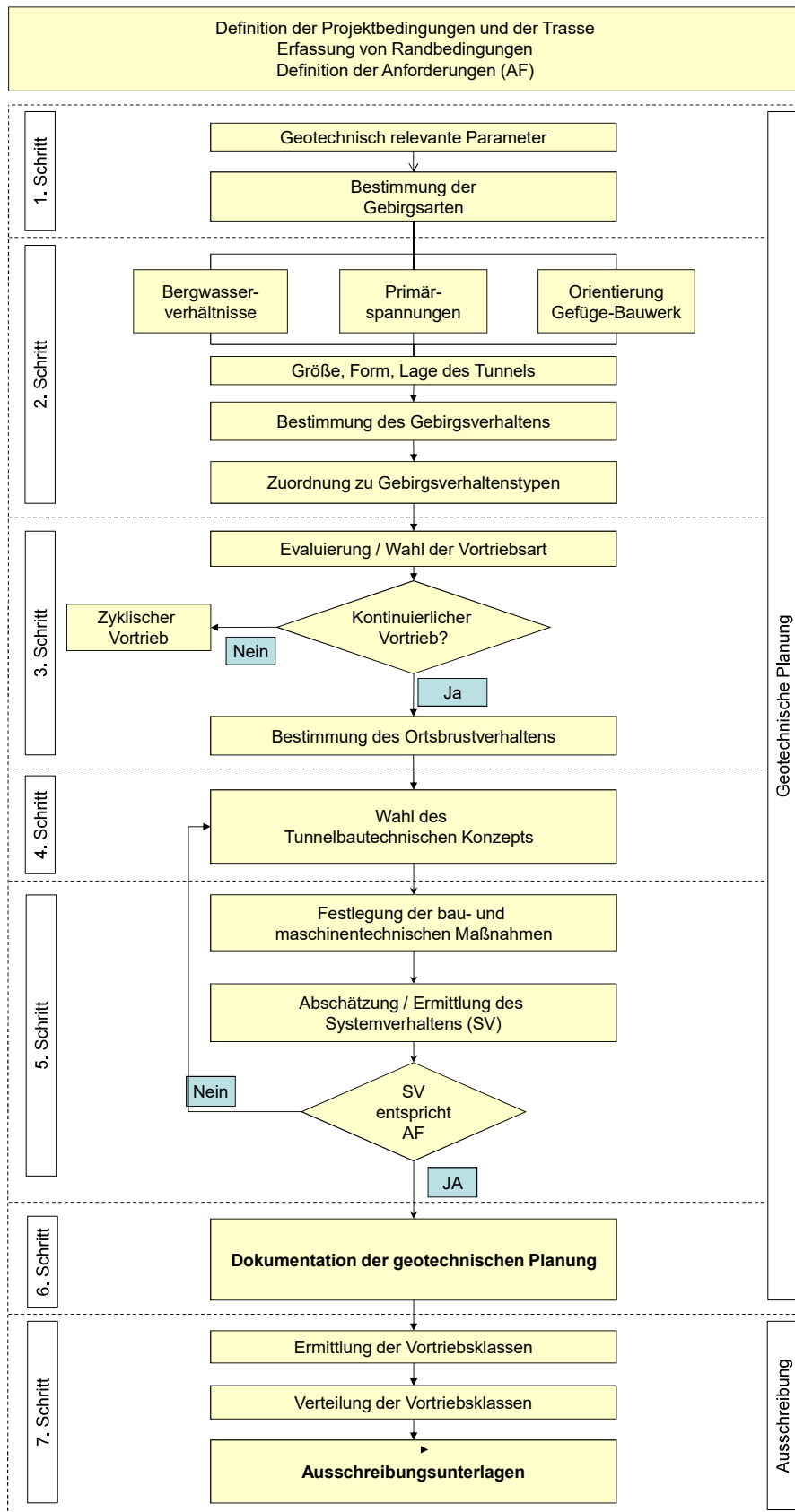


Abb. 2.16: Schematischer Ablauf der geotechnischen Planung (Quelle: ÖGG [34, S. 15])

Tab. 2.4: Bereiche einer TVM nach ÖGG (Quelle: ÖGG [34, S. 14])

| Kurzbezeichnung | TVM-Bereich |
|-----------------|---|
| I | Bohrkopfbereich / Schneidradbereich |
| II | Schildbereich / Bohrkopfträger und Firstschild |
| III | Einbaubereich |
| IV | Bereich fertiger Ausbau bis Endzustand |
| V | Sonderbereiche (Anfahren, Ausfahren, Öffnungen für Querschläge, Querschnittsaufweitungen, etc.) |

Verhältnisse betreffend Gebirgsart und Einflussfaktoren vorherrschen, wird das Gebirgsverhalten analysiert. Dabei muss das Verhalten ohne zusätzliche Baumaßnahmen beschrieben werden. Anschließend kann eine Zuordnung der Bereiche zu einem der in Tab. 2.5 definierten Gebirgsverhaltenstypen erfolgen. Diese Gebirgsverhaltenstypen können projektspezifisch genauer angepasst definiert sein.

3. Schritt – Evaluierung / Wahl der Vortriebsart: Nach der Bestimmung von Gebirgsart und Gebirgsverhaltenstyp muss ermittelt werden, ob die Umsetzbarkeit eines kontinuierlichen Vortriebs möglich ist. Dabei sind folgende bestimmende Faktoren zu berücksichtigen:

- Tunnellänge
- Ausbruchsquerschnitt
- geographische/topografische Lage
- Querschnittsänderungen
- Kosten

Ebenfalls zu berücksichtigen sind Rahmenbedingungen wie Verwert- und Deponierbarkeit des Ausbruchmaterials, Karst, Temperatur, Gas und chemische Eigenschaften. Aus dieser Menge an Gegebenheiten wird ermittelt, welche Vortriebsart einer weiteren geotechnischen Bearbeitung zu Grunde gelegt wird. Fällt die Entscheidung auf einen kontinuierlichen Vortrieb, werden Ortsbrustverhaltenstypen gemäß Tab. 2.5 für Bereiche mit einheitlicher Gebirgsart und Einflussfaktoren bestimmt.

4. Schritt – Wahl eines tunnelbautechnischen Konzepts: Dieses wird basierend auf Schritt 3 ausgearbeitet und beinhaltet die Wahl und Beschreibung des Maschinentyps, das Vortriebsverfahren, den Ausbau und Regel-, Zusatz- und Sondermaßnahmen.

5. Schritt – Festlegung der bau- und maschinentechnischen Maßnahmen und Abschätzung bzw. Ermittlung des Systemverhaltens: In diesem Schritt gilt es, bau- und maschinentechnische Maßnahmen im Detail festzulegen. Außerdem werden die im Schritt 4 abgeschätzten Regel-, Zusatz- und Sondermaßnahmen, sowie Maschinenparameter genauer bestimmt. Ausgehend vom tunnelbautechnischen Konzept wird nach Tab. 2.4 das Systemverhalten in den verschiedenen Bereichen der TVM abgeschätzt, beziehungsweise ermittelt. Die Schritte 4 und 5 werden solange wiederholt, bis das Systemverhalten den gestellten Anforderungen genügt.

6. Schritt – Dokumentation der geotechnischen Planung: Auf Grundlage der vorherigen Schritte wird eine Einteilung in Vortriebsabschnitte vollzogen. Diese ist in einer Dokumentation zusammenzufassen und muss folgende Ausarbeitungen beinhalten:

- Geotechnischer Bericht mit tunnelbautechnischem Rahmenplan
- Geotechnische Risikoanalyse
- Geotechnischer Sicherheitsmanagementplan
- Störfallanalyse inklusive Maßnahmen
- Maschinentechnische Anforderungen

7. Schritt – Ermittlung der Vortriebsklassen und Erstellung der Ausschreibungsunterlagen: Die Vortriebsklassen werden gemäß ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 [37] ermittelt, die genaue Vorgangsweise wird in Abschnitt 2.4.2 beschrieben. Die Vortriebsklassen dienen der Bewertung von Baumaßnahmen im jeweiligen Vortriebsabschnitt. Sie sind Grundlage für die Vergütungsregelungen beim Erstellen der Ausschreibungsunterlagen, beziehungsweise im später vertraglich vereinbartem Leistungsverzeichnis.

2.4.2 Ermittlung der Vortriebsklassen (relevante TVM-Typen)

Aus der in Abschnitt 2.4.1 erfolgten Gebirgscharakterisierung wird mit Hilfe der ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 [37] eine Einteilung in Vortriebsabschnitte und gegebenenfalls innerhalb dieser Abschnitte eine weitere Separierung in VKL vorgenommen. Dargestellt wird diese Klassifizierung beispielsweise mit *VKL 1/1,5*. Dabei entspricht die erste Zahl der ersten Ordnungsgruppe (Vortriebsabschnitt), welche sich auf das Löseverhalten oder baubetriebliche Belange bezieht. Darunter fallen Eigenschaften des Baugrunds wie Gesteinsart, Mineralbestand oder der Zerlegungsgrad des Gebirges, aber auch Parameter wie die Penetration von Abbauwerkzeugen in der Ortsbrust und der dabei auftretende Werkzeugverschleiß. Die zweite Zahl entspricht der zweiten Ordnungsgruppe, welche von Art und Umfang der leistungsbestimmenden Maßnahmen im Zuge des TVM-Vortriebes abhängig gemacht wird. Vor allem der Einbau von Sicherungsmaßnahmen spielt hierbei eine bedeutende Rolle.⁴¹

2.4.2.1 Erste Ordnungsgruppe

Zweck der ersten Ordnungsgruppe ist es einerseits, Vortriebsabschnitte mit deutlich unterschiedlichem Löseverhalten, beziehungsweise Gebirgsverhalten, zu klassifizieren. Andererseits besteht die Notwendigkeit, den gesamten Vortrieb auf Teilabschnitte herunter zu brechen, um die Auswirkungen allfälliger Prognoseabweichungen im Zuge des Vortriebs eingrenzen zu können. Die Unterteilung muss so detailliert erfolgen, dass die Erstellung einer klaren Leistungsbeschreibung ermöglicht wird. Auf diese aufbauend, hat der Bieter die Möglichkeit, eine projektspezifische Kalkulation zu erstellen, und im Falle der Beauftragung die Abrechnung seiner Leistungen, basierend auf der vereinbarten Leistungsbeschreibung, vorzunehmen. Durch die Abweichungen aus prognostizierten zu tatsächlich angetroffenen Verhältnissen, ist es zweckmäßig, die maßgebenden Einflussparameter (Gesteinsdruckfestigkeit, Verschleiß bestimmender Materialgehalt, etc.) in Bandbreiten anzugeben.⁴¹

Die Länge der einzelnen Vortriebsabschnitte soll einem Vielfachen der dort erzielbaren Tagesleistung entsprechen. Damit soll sichergestellt werden, dass eine statistisch zutreffende Angabe der Verteilung der Parameter eingehalten wird. Im Falle von Tunnelbauprojekten im Festgestein,

⁴¹Vgl. [37] ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01, S. 13 ff.

Tab. 2.5: Übergeordnete Kategorien von Gebirgsverhaltenstypen (Quelle: ÖGG [34, S. 19])

| | Übergeordnete Kategorien von Gebirgsverhaltenstypen | Beschreibung des Gebirgsverhaltens (ohne bautechnische Maßnahmen) |
|----|--|--|
| 1 | Standfestes Gebirge | Standfestes Gebirge mit dem Potenzial zum schwerkraftbedingten Herausfallen oder Herausgleiten von kleinvolumigen Kluftkörpern |
| 2 | Gefügebedingte Ausbrüche | Großvolumige gefüge- und schwerkraftbedingte Ausbrüche, vereinzelt lokales Überschreiten der Scherfestigkeit an Trennflächen |
| 3 | Hohlraumnahe Überbeanspruchung | Spannungsbedingte Entfestigung bzw. Plastifizierung des Gebirges in Hohlraumnähe, ev. in Kombination mit gefügebedingten Ausbrüchen |
| 4 | Tiefreichende Überbeanspruchung | Spannungsbedingte tiefreichende Entfestigung bzw. Plastifizierung im Gebirge mit großen Deformationen |
| 5 | Bergschlag | Schlagartige Ablösungen von Gesteinsplatten verursacht durch Sprödbruch |
| 6 | Schichtknicken | Knicken von schlanken Schichtpaketen, häufig in Kombination mit Scherversagen |
| 7 | Firstniederbruch durch Scherversagen | Großvolumige Ausbrüche überwiegend im Firstbereich mit progressivem Scherversagen |
| 8 | Rolliges Gebirge | Ausrieseln von kohäsionsarmem, gering verzahntem, trockenem bis feuchtem Gebirge |
| 9 | Fließendes Gebirge | Ausfließen von kohäsionsarmem, gering verzahntem Gebirge mit hohem Wassergehalt oder Wasserzufluss |
| 10 | Quellendes Gebirge bzw. Schwellendes Gebirge | Zeitabhängige Volumszunahme des Gebirges vorwiegend im Sohlbereich durch physikalisch-chemische Reaktion von Gebirge und Wasser in Kombination mit Entspannung bzw. durch chemisch-kristallographische Vorgänge |
| 11 | Gebirge mit kleinräumig wechselnden Verformungseigenschaften | Kombination mehrerer GVT bei kleinräumiger, starker Änderung von Spannungen und Deformationen über längere Strecken, bedingt durch heterogenen Gebirgsbau (z. B. Block-Matrix Struktur, heterogene Störungszonen, tektonische Melange) |

bei denen Maschinen mit großem Durchmesser zum Einsatz kommen, kann eine Unterteilung der ersten Ordnungsgruppe anhand der Penetration vorgenommen werden. Dies hat den Hintergrund, dass sich bei genannten Bedingungen die Prognose des Löseverhaltens, auf Grund von

Überlagerungen und unsicherem Zerlegungsgrad des Gesteins, als äußerst ungenau herausgestellt hat, und sich dadurch die Penetration beziehungsweise Festigkeitswerte als Ausweichmöglichkeit empfehlen.⁴¹

2.4.2.2 Zweite Ordnungsgruppe

Für die Ermittlung der zweiten Ordnungsgruppe wird der festgelegte Maschinentyp betrachtet. Es wird unterschieden zwischen den Varianten TBM-O/EBTM, TBM-S/DSM und SM. Dies hat zur Folge, dass sich für jedes Projekt eine spezifische Vortriebsklassenmatrix ergibt. Sie beruht auf den zuvor erläuterten Parametern der ersten Ordnungsgruppe und den im Folgenden beschriebenen Möglichkeiten für die zweite Ordnungsgruppe. Ein Beispiel einer projektspezifischen Vortriebsklassenmatrix für eine TBM-O ist in Abb. 2.17 dargestellt.⁴¹

| ERSTE ORDNUNGSGRUPPE | VORTRIEBSABSCHNITTE (VA) gemäß 4.3.2.2 | ZWEITE ORDNUNGSGRUPPE | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|-------------------------------|---------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| | | Stützmittelzahl gemäß 4.3.2.3 | | | | | | | | | | | |
| | | Maximaler Geltungsbereich | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 9 | 13 | 17 | 21 | 27 | 33 | 39 |
| | | ± 0,5 | | | ± 1,0 | | | ± 2,0 | | | ± 3,0 | | |
| 1 | 1 / 0,5 | 1 / 1,5 | 1 / 2,5 | 1 / 4 | 1 / 6 | 1 / 8 | 1 / 11 | 1 / 15 | 1 / 19 | 1 / 24 | 1 / 30 | 1 / 36 | |
| 2 | | 2 / 1,5 | 2 / 2,5 | 2 / 4 | 2 / 6 | 2 / 8 | 2 / 11 | | | | | | |
| 3 | 3 / 0,5 | 3 / 1,5 | 3 / 2,5 | 3 / 4 | | | | | | | | | |
| n-1 | | | | | | | | | | | | | |
| n | | | | | | | | | | | | | |

Abb. 2.17: Beispiel einer Vortriebsklassenmatrix für TBM-O und EBTM (Quelle: ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 [37, S. 14])

- **TBM-O / EBTM – Stützmittelzahl je nach Einbauort**

Bei der offenen Tunnelbohrmaschine und der Erweiterungstunnelbohrmaschine wird die Stützmittelzahl als Bewertungskriterium der zweiten Ordnungsgruppe herangezogen. Sie lässt sich aus der Art, der Anzahl und dem Einbauort eingebauter Regelstützmittel pro Laufmeter Tunnel ermitteln. Dazu wird Tab. 2.6 aus der ÖNORM B 2203-2 herangezogen. Aus dem gewählten Stützmittel und dem jeweiligen Arbeitsbereich erhält man einen Bewertungsfaktor, welcher mit der Menge je angegebener Einheit multipliziert wird. Die Einteilung in Arbeitsbereiche erfolgt bei allen TVMs auf Grundlage der ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 – Anhang A. Anschließend wird die Summe der so bewerteten Stützmittel für einen Laufmeter Tunnel gebildet. Die Stützmittelzahl ergibt sich aus der Division dieser Summe durch die Bewertungsfläche des Tunnelquerschnitts. Die Bewertungsfläche ist auf Basis des nominalen Bohrdurchmessers der Maschine vertraglich vereinbart, dieser geht aus der Abb. 2.18 hervor. Sie bleibt auch bei der Ausführung eines Überbohrmaßes unverändert. Die in Tab. 2.6 angegebene Bewertungsfaktoren gelten für die laut Ausschreibung einzusetzenden Regelstützmittel.⁴¹

Tab. 2.6: Bewertung der Regelstützmittel für TBM-O und EBTM (Quelle: ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 [37, S. 15])

| Stützmittel | | Bewertungsfaktoren nach Arbeitsbereichen | | Mengen- einheit | Bemerkung |
|--|--|--|---------------------------|--------------------|---|
| | | Arbeits- bereich A1 | Arbeits- bereich A2 | | |
| Anker | Gefalteter Rohrreibungsanker | 3,0 | 1,6 | m | |
| | SN-Mörtelanker | 4,0 | 2,5 | m | |
| | Selbstbohranker | 6,0 | 3,5 | m | |
| | Verpressanker | 6,0 | 4,0 | m | |
| | Vorgespannte Mörtelanker | 10,0 | 5,0 | m | |
| Verpressungen über 10 kg je m Anker | | 0,3 | 0,2 | kg | |
| Baustahl- gitter | bergseitig ohne Bogen | 4,0 | 2,5 | m ² | |
| | bergseitig mit Bogen | 3,0 | 2,0 | m ² | |
| | hohlraumseitig | 3,0 | 2,0 | m ² | |
| Bogenteile kürzer als halber Umfang | | 2,5 | 2,5 | m | |
| Bogenteile länger als halber Umfang | | 5,0 | — | m | |
| Bogen geschlossen | | 4,0 | — | m | |
| Liner plates | | 10,0 | — | m ² | |
| Spritzbeton | Laibung | 70,0 | 20,0 | m ³ | theoretische Massen nach Nennstärke und Abrechnungs- linie |
| | Auffüllen von Zwickeln und Mehrausbrüchen | 50,0 | 14,0 | m ³ | |
| Dielen | Verzugsdielen | 15,0 | | m ² | eingebaute Dielen |
| | Getriebedielen | 20,0 | | m ² | eingebaute Dielen |
| Die Stützmittelzahl der Tabelle 1 ergibt sich durch Division der Summe der bewerteten Stützmittel pro m Tunnel durch die Bewertungsfläche. | | | | | |
| Die Berechnung erfolgt sinngemäß nach dem Beispiel in B.1 | | | | | |

Für jede Vortriebsklasse sind die Stützmaßnahmen nach Art, Umfang und Ort des Einbaus separat auszuweisen. Der Gültigkeitsbereich einer Vortriebsklasse ist in der Vortriebsklassenmatrix mit Grenzen festzulegen. Sollten sich in unterschiedlichen Arbeitsbereichen auf Grund der oben erläuterten Berechnung, trotz unterschiedlicher Regelstützmaßnahmen, die selben Stützmittelzahlen ergeben, so wird eine weitere Untergliederung der VKL nach Art der Regelstützmittel zweckmäßig.⁴¹

- **TBM-S / DSM**

Für Tunnelbohrmaschinen mit Schild und Doppelschildmaschinen wird eine Kategorisierung anhand leistungsbestimmender Merkmale vorgenommen. Zu diesen Merkmalen zählen vor allem:⁴¹

- Verspannbarkeit (volle oder teilweise Verspannbarkeit im Gebirge)
- Art der Abstützung (Voll- oder Teilabstützung am Ausbau)
- Art des Ausbaus
- Ortsbruststützung (erforderlich oder nicht)

Damit schafft man die Möglichkeit, leistungsbestimmende (oft leistungsmindernde) Gegebenheiten, welche nicht aus dem Löseverhalten in Ordnungsgruppe 1 hervorgehen, zu charakterisieren und diese zu gruppieren. Dadurch kann wieder eine Bewertung des Bieters in der Angebotsphase stattfinden und eine eindeutige Zuordnung während der Bauausführung. Ergibt sich aus projektspezifischen Gründen keine Erfordernis für eine zweite

Ordnungsgruppe, so darf sie entfallen. Die Unterscheidung erfolgt dadurch allein auf Basis der ersten Ordnungsgruppe.⁴¹

- **SM**

Im Falle der Schildmaschine wird ebenfalls eine gestaffelte Unterscheidung anhand von leistungsbestimmenden Merkmalen vorgenommen. Hier bezieht man sich auf das eingesetzte Vortriebssystem des Schildes, beispielsweise kann ein leistungsbestimmendes Merkmal das Vortriebsverfahren sein. Wiederum entfällt auch bei der Klassifizierung einer SM die zweite Ordnungsgruppe, falls keine Notwendigkeit gegeben ist. Klassifiziert wird in diesem Falle nur auf Grundlage der ersten Ordnungsgruppe.⁴¹

2.4.3 Vergütung von Tunnelbauvorhaben laut ÖNORM B 2203-2

In Österreich werden die erbrachten Leistungen mittels vertraglich vereinbarter Leistungsverzeichnisse abgerechnet. Diese sind von öffentlichen Auftraggebern nach den Vorgaben der ÖNORM B 2110: 2013-03-15 [35] oder ÖNORM B 2118: 2013-03-15 [36] anzufertigen. Die Ausfertigungen von privaten Auftraggebern können von diesen Vorgaben abweichen. Im Rahmen einer projektspezifischen Ausschreibungen wird dem Bieter die Auspreisung des Leistungsverzeichnisses und damit die Abgabe eines Angebots ermöglicht. Laut ÖNORM B 2203-2 sind bei Tunnelbauvorhaben allenfalls eigene Positionen für projektabhängige Leistungen vorzusehen. Auf diese wird nun näher eingegangen.⁴²

2.4.3.1 Baustellengemeinkosten

Im Falle der Baustellengemeinkosten ist ein Tunnelbau-LV durch folgende Positionen zu ergänzen:⁴²

Einmalige Kosten der Vortriebssysteme: Zusätzlich zu den Baustellengemeinkosten wird bei Tunnelbauprojekten mit kontinuierlichem Vortrieb eine eigene Position für die einmaligen Kosten der Beistellung einer TVM notwendig. Im Falle mehrerer Maschinen ist jede einzeln auszuweisen und entsprechend zu vergüten. In diese Position sind alle von der Bauzeit, beziehungsweise von Erschwernissen, unabhängigen Gerätekosten (Pauschalabschreibung) einzurechnen. Den Ausschreibungsunterlagen ist ein entsprechender Zahlungsplan zu diesen Positionen beizulegen, aus dem hervorgeht, mit welchem Zeitpunkt diese Position teilweise- bzw. voll vergütet wird. Beispielsweise kann vertraglich vereinbart sein, dass mit Vertragsabschluss 30 % der Kosten vergütet werden, bis insgesamt 90 % nach erfolgter Montage in Monatsraten abgegolten werden, und die restlichen 10 % zwei Monate nach Inbetriebnahme an den AN übergehen. Sollte im Laufe des Vortriebs ein Umbau des nominalen Bohrdurchmessers erforderlich werden, so sind dafür eigene Positionen vorzusehen.⁴²

Zeitgebundene Kosten und Gerätekosten der Baustelle: Die zeitgebundenen Kosten der Baustelle und allgemeine Gerätekosten sind für jeden Vortrieb einzeln auszuweisen. Ebenso für Gerätekosten des einzusetzenden Vortriebssystems. Die erforderlichen Positionen werden in Abhängigkeit des Bauablaufes wie folgt unterteilt:⁴²

- Baubeginn bis Vortriebsbeginn
- Vortrieb
- Aufzahlung auf den Vortrieb, bei gleichzeitiger Herstellung der Tunnelinnenschale (bei zweischaligem Ausbau)

⁴²Vgl. [37] ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01, S. 13 ff.

- Herstellung der Innenschale nach vertraglichem Vortriebsende (bei zweischaligem Ausbau)
- Arbeiten nach Fertigstellung des Vortriebs bzw. der Innenschale (bei zweischaligem Ausbau)

Die Zeitbedarf für den Vortrieb wird anhand der vom Bieter eingesetzten Vortriebsgeschwindigkeiten in den ausgeschriebenen Vortriebsklassen ermittelt. Zuzüglich werden auch Zeitaufwendungen für

- Vortriebsunterbrechungen,
- Zusatzzeiten für Zusatzmaßnahmen,
- Sondermaßnahmen,
- allfällige Erschwerniszeiten,
- angeordnete Umbaumaßnahmen und
- sonstige Festzeiten

berechnet. Die Bauzeitermittlung erfolgt auf Grundlage eines vom AG vorzugebenden Bauzeitmodells und einer Baubeschreibung. Im Falle von mehreren Vortrieben oder gleichzeitiger Arbeit ober- und untertage, sind der Bearbeitung technischer und logistischer Angelegenheiten besondere Sorgfalt zu schenken. Daraus resultiert ein kritischer Weg für die Baudauer mitsamt den gegenseitigen Abhängigkeiten die zu berücksichtigen sind. Im Falle von Vortriebs-Stilliegezeiten sind für zeitgebundene Kosten der Baustelle und Gerätekosten extra ausgewiesene Positionen im Leistungsverzeichnis (LV) vorzusehen. Arbeitsfreie Tage wie Feiertage, Abgangszeiten oder Barbaratag sind anhand von Bieterabfragen zu ermitteln und ebenfalls separat auszuweisen.⁴²

2.4.3.2 Leistungsbezogene Kosten

Neben den Positionen der Baustellengemeinkosten müssen leistungsbezogene Kosten abgegolten werden. Dies ermöglichen die im Folgenden beschriebenen Ergänzungen eines Tunnelbau-LVs:⁴³

Positionen des Ausbruchs: Der Ausbruch kann laut ÖNORM B 2203-2 mittels zwei Varianten vergütet werden:⁴³

1. Anhand von Positionen für *Lohn* und *Sonstiges* je Vortriebsklasse (innerhalb einer Vortriebsklassenmatrix) mit der Einheit [m]
2. Mit einer Position für die *Lohnkosten* der Vortriebsmannschaft je Vortriebsabschnitt und Zeiteinheit als Verechnungseinheiten [VE] und einer Position für den Anteil *Sonstiges* je Vortriebsklasse in der Einheit [m]. Der Lohnanteil beinhaltet dabei alle zeitabhängigen Lohnkosten, die nicht in den zeitgebundenen Kosten der Baustelle berücksichtigt sind.

Weitere Positionen des Ausbruchs: Für die Ermittlung der weiteren Ausbruchpositionen werden die Abb. 2.18 und Abb. 2.19 herangezogen. Dabei stellt Abb. 2.18 die Auskleidung des Tunnels in konventioneller Arbeitsweise mit einer Spritzbetonsicherung, Abdichtung und bewehrter Betoninnenschale dar, Abb. 2.19 den Tübbingausbau mit- und ohne planmäßig eingebauter Innenschale. Keine eigenen Positionen werden für das Ausbrechen von Überschnitt (üs) und Überprofil (üp) im Leistungsverzeichnis vorgesehen. Die Aufwendungen für diese Ausbrüche sind vom AN in die Positionen des Ausbruchs zu kalkulieren.⁴³

⁴³Vgl. [37] ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01, S. 16 ff.

Sollte ein Überbohrmaß (\ddot{u}_B) erforderlich sein, so ist dieses, je Vortriebsabschnitt, vom AG bekanntzugeben. Zusätzliche Bestimmungen die beim Bohren eines Überbohrmaßes geltend werden, sind im Vorfeld vertraglich in den Ausschreibungsunterlagen zu regeln. Dabei werden vor allem ein zusätzlicher Preis für den Ausbruch, und eine Erhöhung der zeitgebundenen Kosten im Falle des Überbohrens, festgelegt.⁴³

Für Vergütungen des Mehrausbruchs bergseitig der Grenzfläche A wird nach Maschinentypen unterschieden. Im Falle von TBM-O und Tunnelbohrmaschine mit Aufweitungsbohrkopf (TBM-A) bildet sich die Grenzfläche A aus der Summe des maximalen, effektiven Bohrdurchmesser mit nicht abgenützten Werkzeugen (D_{ME}) und dem Überprofil (\ddot{u}_P). Es sind eigene, von den Vortriebsklassen unabhängige, Positionen für das Schuttern und den Materialabtransport des Mehrausbruches in den Leistungsverzeichnissen vorzusehen. Außerdem sind Positionen für das Zerkleinern, Aufnehmen und Fördern von Blöcken aus dem Sohlbereich des Ausbruchquerschnitts im LV zu berücksichtigen. Die Auswirkungen, welche ein Mehrausbruch bergseitig der Grenzfläche A auf zeitgebundene Kosten hat, ist in projektspezifischen Vereinbarungen vertraglich zu regeln.⁴³ Bei den Maschinentypen TBM-S, DSM und SM, die eine Tübbingauskleidung nach sich ziehen, entspricht die Grenzfläche A lediglich dem maximalen effektiven Bohrdurchmesser mit unabgenutztem Werkzeug. Hier sind keine gesonderten Vergütungspositionen für einen Mehrausbruch vorzusehen.⁴³

2.4.3.3 Erschwernisse

Vergütungen von erwarteten Erschwernissen werden projektbezogen im Vorfeld festgelegt. Dabei sind zeitabhängige Kosten und sonstige Kosten getrennt zu betrachten. Eine gute Möglichkeit bietet dabei Variante 2 der Vergütung von Positionen des Ausbruchs (siehe Kapitel 2.4.3.2). Die Erschwernisse sind eindeutig zu beschreiben, um einerseits der Kalkulation Rechnung zu tragen, und andererseits einer Identifikation in der Bauausführung gerecht werden zu können. Eine Benennung möglicher Erschwernisse wird im Folgenden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, in Anlehnung an ÖNORM B 2203-2 wiedergegeben:⁴³

- **Wassererschwernisse**

Erschwernisse aus dem Zufluss von Bergwasser im Tunnel werden mit Abminderungsfaktoren auf zusätzliche Vortriebszeiten umgelegt, und dadurch abgegolten. Sie sind getrennt nach steigendem (gegebenenfalls abfließen des Wassers) und fallenden Tunnelvortrieb (Pumpenauslegung) zu betrachten. Dabei werden zum Beispiel Kalendertage oder Verrechnungseinheiten vergütet. Im Leistungsverzeichnis sind entsprechende Positionen für Lohnkosten und Sonstige-Kosten, zum Beispiel auf Grund von erhöhtem Werkzeugverschleiß durch den Wasserzutritt, vorzusehen. Die Positionen für Wassererschwernisse sind in Abhängigkeit der Bergwasserspense abzustufen und für jeden Vortriebsabschnitt getrennt anzugeben. Die tatsächliche Beeinträchtigung auf die Vortriebsgeschwindigkeit ist vom Bieter in der Angebotsphase zu kalkulieren. In diesem Kontext kann eine ständige untere Schwelle der Bergwasserspense im Vertrag vereinbart sein, bis zu der keine Erschwernisse abgegolten werden. Im Falle der ausgeschriebenen Positionen ist die Anzahl der Kalendertage mit Wassererschwernissen durch den AG festzulegen. Die tatsächliche Bergwasserspense wird durch definierte Messungen getrennt nach steigenden und fallenden Vortrieb ermittelt.

- **Hoher Verschleiß**

Erhöhter Verschleiß der Bohrwerkzeuge wirkt sich negativ auf die zu erbringende Leistung aus. Im Falle von extrem abrasivem Gestein (klassifiziert nach dem Cerchar Abrasivität Index), oder dem Überschreiten einer vertraglichen Bandbreite von Verschleißparametern,

können Erschwernispositionen vorgesehen werden, die diese Umstände entsprechend vergüten. Die Abrasivität wird dabei mit geeigneten Versuchen überprüft und anhand von Schwellenwerten klassifiziert. Dieser Abstufung ist ein monetäres Vergütungssystem zu Grunde gelegt.

- **Klebrigkeit**

Für Leistungen zur Beseitigung von Verklebungen können gesonderte Positionen vorgesehen werden. Diese beziehen sich dann auf die Maßnahmen, zum Beispiel Hochdruckbedüsung oder Beigabe von Additiven im Abbauraum, welche getroffen werden, um die Verklebung zu unterbinden. Eine eindeutige Leistungsbeschreibung der Arbeiten wird vorausgesetzt.

- **Sonstige Erschwernisse**

Unter sonstigen Erschwernissen sind folgende Umstände zu verstehen, für welche ebenfalls extra Positionen angefertigt werden können:⁴³

- Mixed Face-Bedingungen
- Blockigkeit
- Verspannbarkeitsprobleme und extreme Nachbrüchigkeit bei TBM-O
- Stützflüssigkeitsverlust bei SM

- **Hindernisse**

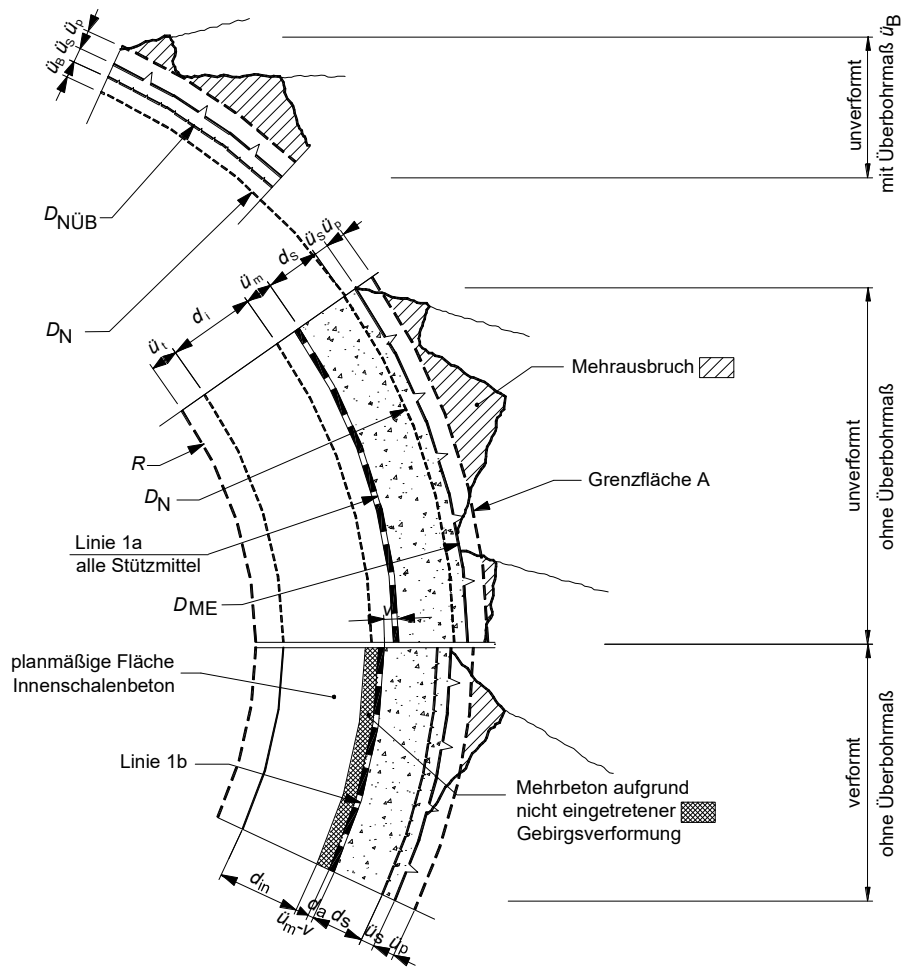
Sollten bereits Hindernisse im Vorfeld bekannt sein, so sind diese detailliert zu beschreiben. Darunter fallen zum Beispiel Findlinge, Brunnen, Altholz, Bohrgestänge, etc. Anhand der Beschreibung werden Klassifizierungen und im weiteren Sinne Abrechnungskriterien festgelegt, um die zu erbringenden Leistungen kalkulieren und angemessen vergüten zu können. Die Verrechnung nicht kalkulierbarer Hindernisse wird durch aufwandsabhängige Positionen vorgenommen.

2.4.3.4 Regiepositionen

Regiepositionen finden Verwendung, wenn ein Vortrieb auf Basis der Leistungsbeschreibung nicht möglich ist oder im Zuge von Sondermaßnahmen Umstände auftreten, die Vortriebsunterbrechungen mit sich ziehen, bzw. Vortriebsarbeiten erfordern, welche mit vorhandenen Positionen im LV nicht abgegolten werden können. Eine Vergütung der geleisteten Arbeiten kann in folgenden Fällen über Regiepositionen erfolgen:⁴³

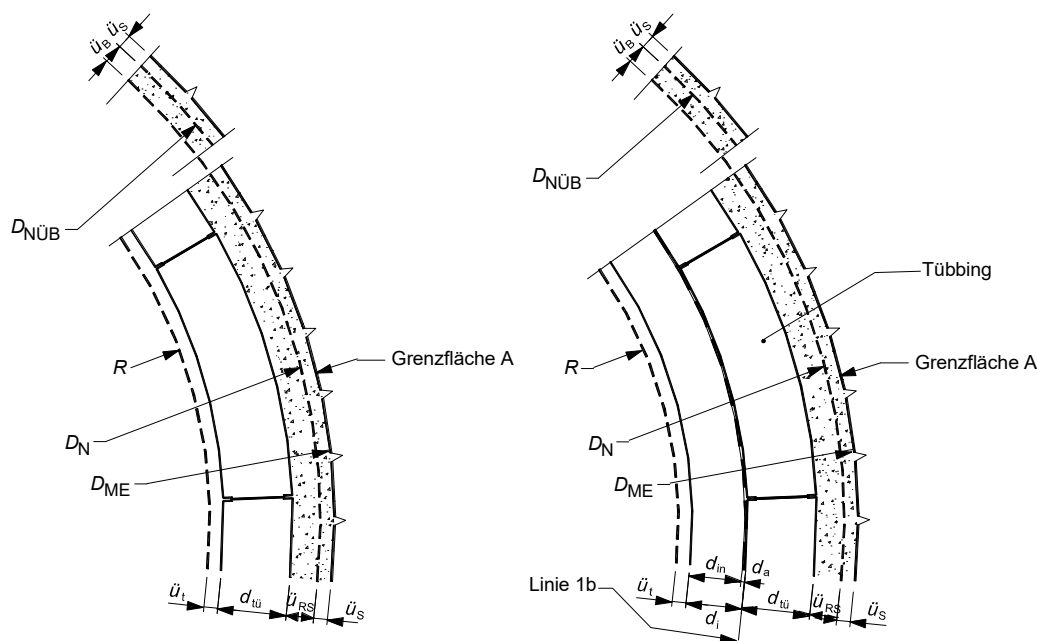
- laufender Teilverbrauch (unzureichende Standfestigkeit des Gebirges mit fortschreitender Auflockerung)
- große Verspannprobleme
- gebirgsbedingte Steuerungsschwierigkeiten (Absinken der TVM)
- Vortriebsarbeiten vor dem Bohrkopf

Die entsprechenden Regiepositionen sollten die Verrechnung von produktiven Lohnkosten, Betriebskosten des Vortriebs, Transport- und Logistikkosten, Reparatur-, Verschleiß- und Energiekosten ermöglichen.⁴³



| | | | |
|-----------------|---|-----------------|--|
| R ... | Radius des lichten Querschnitts | \dot{u}_p ... | im Zuge der Ausschreibung vom AG angegeben und vom AN gemäß seiner Einschätzung zu berücksichtigendes Überprofil bis zur Grenzfläche A |
| \dot{u}_t ... | in der Ausschreibung vorgegebenes Maß zur Kompensation von TVM-Vortriebsabweichungen und Schalungstoleranzen; vom AG vorgegeben | \dot{u}_B ... | Überbohrmaß |
| d_i ... | plangemäße Dicke der Innenschale einschließlich Abdichtungsuntergrund und Abdichtung ($d_i = d_{in} + d_a$) | \dot{u}_m ... | Übermaß für die Aufnahme der erwarteten Gebirgs- und Ringverformungen; im Zuge der Ausschreibung vom AG festzulegen |
| d_{in} ... | plangemäße Dicke der Innenschale | D_N ... | Nominale Bohrdurchmesser vom AG vorgegeben; $D_N = 2(R + \dot{u}_t + d_i + \dot{u}_m + d_s)$ |
| d_a ... | plangemäße Dicke des Abdichtungsuntergrundes und der Abdichtung | $D_{NÜB}$... | Nominale Bohrdurchmesser mit Überbohrmaß; $D_{NÜB} = D_N + 2 \dot{u}_B$ |
| v ... | eingetretene Gebirgsverformung | D_E ... | effektiver Bohrdurchmesser (veränderlich) |
| d_s ... | festgelegte Dicke des Spritzbetons als Stützmaßnahme | D_{ME} ... | max. effektiver Bohrdurchmesser mit nicht abgenutzten Bohrwerkzeugen |
| \dot{u}_s ... | Überschnitt aus der Sphäre des AN für Werkzeugabnutzung, Kurvenfahrt u.a.; vom AN anzugeben | A ... | Grenzfläche, bestimmt durch $D_{ME} + \dot{u}_p$ |

Abb. 2.18: Ausbruchquerschnitt mit konventionellem Ausbau (Quelle: ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 [37, S. 17])



| | |
|---------------------|---|
| R ... | Radius des lichten Querschnitts |
| \dot{u}_t ... | in der Ausschreibung vorgegebenes Maß zur Kompensation von TVM-Vortriebsabweichungen; vom AG vorgegeben |
| $d_{t\dot{u}}$... | Dicke des Tübbings |
| \dot{u}_{RS} ... | Ringspalt |
| \dot{u}_B ... | Überbohrmaß |
| \dot{u}_S ... | Überschnitt aus der Sphäre des AN für Werkzeugabnutzung, Kurvenfahrt u.a., vom AN anzugeben |
| D_N ... | Nominaler Bohrdurchmesser vom AG vorgegeben; |
| $D_{N\dot{u}B}$... | Nominaler Bohrdurchmesser mit Überbohrmaß; $D_{N\dot{u}B} = D_N + 2 \dot{u}_B$ |
| D_E ... | effektiver Bohrdurchmesser |
| D_{ME} ... | max. effektiver Bohrdurchmesser mit nicht abgenutzten Bohrwerkzeugen |
| A ... | Grenzfläche, entspricht D_{ME} |

| | |
|---------------------|---|
| R ... | Radius des lichten Querschnitts |
| \dot{u}_t ... | in der Ausschreibung vorgegebenes Maß zur Kompensation von TVM-Vortriebsabweichungen; vom AG vorgegeben |
| d_i ... | plangemäße Dicke der Innenschale einschließlich Abdichtungsuntergrund und Abdichtung ($d_i = d_{in} + d_a$) |
| d_{in} ... | plangemäße Dicke der Innenschale |
| d_a ... | plangemäße Dicke des Abdichtungsuntergrundes und der Abdichtung |
| $d_{t\dot{u}}$... | Dicke des Tübbings |
| \dot{u}_{RS} ... | Ringspalt |
| \dot{u}_B ... | Überbohrmaß |
| \dot{u}_S ... | Überschnitt aus der Sphäre des AN für Werkzeugabnutzung, Kurvenfahrt u.a., vom AN anzugeben |
| D_N ... | Nominaler Bohrdurchmesser vom AG vorgegeben; |
| $D_{N\dot{u}B}$... | Nominaler Bohrdurchmesser mit Überbohrmaß; $D_{N\dot{u}B} = D_N + 2 \dot{u}_B$ |
| D_E ... | effektiver Bohrdurchmesser |
| D_{ME} ... | max. effektiver Bohrdurchmesser mit nicht abgenutzten Bohrwerkzeugen |
| A ... | Grenzfläche, entspricht D_{ME} |

Abb. 2.19: Ausbruchquerschnitt mit Tübbingausbau – links ohne Innenschale, rechts mit Innenschale (Quelle: ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 [37, S. 18])

Kapitel 3

Datengrundlagen von konkreten Tunnelbauprojekten

Im folgenden Kapitel werden die zum Auswertungsprozess herangezogenen Projekte vorgestellt. Hiermit soll ein grundlegender Überblick über Projektparameter wie

- Verwendungskategorie des Tunnels
- Baugrund
- Tunnellänge
- Gewählte Tunnelbohrmaschine
- Ausbruchdurchmesser
- Tunnelauskleidung

und weiteren projektspezifischen Besonderheiten geschaffen werden. Der Ausbruchquerschnitt von Tunnelvortriebsmaschinen weist zwingend ein kreisrundes Profil auf, die Verwendung des Tunnels muss auf diesen Umstand abgestimmt sein. Des Weiteren setzt der Einsatz einer TVM eine gewisse Mindesttunnellänge voraus, da unter dieser der Einsatz von konventionellen Ausbruchmethoden wirtschaftlicher ist. Mit Hilfe der Parameter des Baugrundes, des Ausbruchdurchmessers und der festgelegten Tunnelauskleidung kann eine entsprechende Maschinenauswahl getroffen werden. Die vorliegenden Projekte sind durch Recherchen und Nachfragen sorgfältig ausgewählt und sollen trotz ihrer Eigenheiten einen aussagekräftigen Querschnitt für die gegenständliche Arbeit liefern. Dabei ist aus Gründen des Datenschutzes eine generelle Anonymisierung vorgenommen, um die Datenschutzbestimmungen von Auftraggeber, Planer und Ausführenden zu wahren.

3.1 Projekt A

Die im folgenden Absatz verwendeten Informationen sind dem Bauvertrag von Projekt A [2]⁴⁴, [3]⁴⁵ und [4]⁴⁶ entnommen. Die Baumaßnahme umfasst den Ausbau einer österreichischen Eisenbahnstrecke, die Teil des europäischen Hochleistungsstreckennetzes ist. Mit Hilfe dieses Bauvorhabens kann die Fahrzeit deutlich verkürzt und die Netzkapazität erheblich verbessert werden.

⁴⁴Vgl. [2] Auftraggeber Projekt A

⁴⁵Vgl. [3] Auftraggeber Projekt A

⁴⁶Vgl. [4] Auftraggeber Projekt A

3.1.1 Projektparameter

Das gegenständliche Tunnelbauprojekt ist auf eine Entwurfsgeschwindigkeit $v_e = 200$ km/h ausgelegt. Der Tab. 3.1 sind die Gesamtlänge der Tunnelröhren, sowie der Anteil des TVM-Vortriebs zu entnehmen, außerdem sind Angaben zur Überlagerung angeführt.⁴⁷

Tab. 3.1: Übersicht – Projekt A, Bauabschnitt 2 (Quelle: Auftraggeber Projekt A [2, S. 4 ff.])

| Bezeichnung | Vortrieb 1 | Vortrieb 2 |
|---------------------------|------------|------------|
| Länge | 20.050 m | 17.850 m |
| Kontinuierlicher Vortrieb | 17.127 m | 15.635 m |
| Maximale Überdeckung | 1.178 m | 1.178 m |
| Minimal Überdeckung | 71 m | 71 m |

Der zyklische Vortrieb wird zu Beginn der beiden Röhren verwendet. In diesen Abschnitten liegt ein bereits bestehender Erkundungsstollen, welcher im Zuge der Arbeiten auf den Fahrquerschnitt ausgeweitet wird, und eine Kaverne, welche zurückzubauen ist. Danach werden die beiden Tunnelröhren mit zwei TVMs in kontinuierlicher Bauweise aufgeföhren. Die parallelen Röhren im gegenständlichen Baulos sind mit insgesamt 39 Querschlägen verbunden, dies entspricht einem Querschlag-Abstand von 500 m. Außerdem wird ein circa 934 m langer Rettungstunnel, in Form einer Nothaltestelle, zwischen den beiden Fahrtunnelröhren hergestellt. Der Abgang im Gefahrenfall findet dabei über 16 Fluchtstollen zwischen den Röhren statt.⁴⁷

Beide eingleisigen Streckenröhren werden beginnend von der Montagekaverne über 17.127 m (Vortrieb 1) bzw. 15.635 m (Vortrieb 2) im maschinellen Vortrieb hergestellt. Die Regelquerschnitte sind für Vortrieb 1 und Vortrieb 2 (Abb. 3.1) spiegelverkehrt konstruiert. Die Gleisachsen sind dabei in Richtung des Entwässerungsgefälles von der Tunnelachse abgesetzt. Die Querschnitte unterscheiden sich außerdem in den gewählten Einbauten (zB. Kabeltröge). Der fertige Innenradius ist bei beiden Röhren identisch mit 4,10 m festgelegt. Daraus ergibt sich jeweils ein Ausbruchquerschnitt von ca. 77 m².⁴⁷

Zum Einsatz gelangen dabei zwei Doppelschildmaschinen. Dabei werden im Zuge des Vortriebes auch systematische Vorauserkundungen mittels Seismik und Vorausböhrungen von der Maschine aus durchgeführt, um bautechnisch relevante Störzonen im Vorhinein eingrenzen zu können. Im Falle von Störungen kommen bei der Durchörterung ergänzend zu Regelmaßnahmen auch folgende Zusatz- und Sondermaßnahmen zum Einsatz:

- Drainageböhrungen
- Gebirgsvergütung
- Injektionsbohrschirm
- Umgehungsstollen
- Überfirstung

Deren Art und Ausmaß werden mit Hilfe der Vorauserkundung vor Ort festgelegt. Grundsätzlich erfolgt im Zuge des Vortriebs mit der DSM ein zweischaliger Ausbau durch Tübbing und einer zeitlich nachgelagerten Ortbetoninnenschale mit Abdichtung. Die Tübbing weisen eine Stärke von 35 cm und eine Breite von 1,90 m, welche dem Bohrhübe der Maschine entspricht, auf. In geologisch günstigen Bereichen ist ein Entfall der Innenschale möglich. Für diese Option

⁴⁷Vgl. [2] Auftraggeber Projekt A, S. 4 ff.

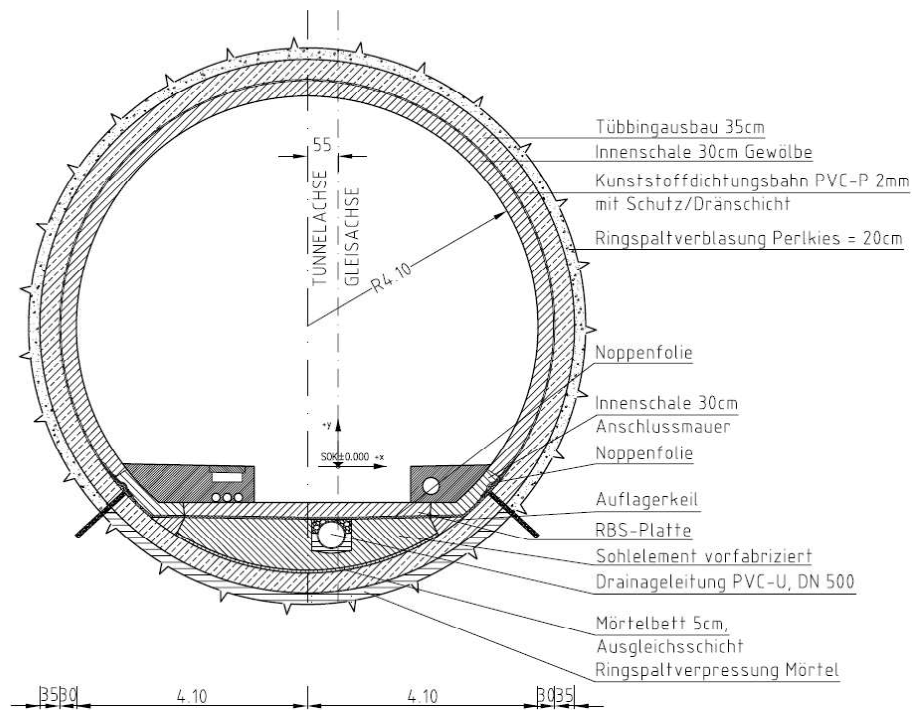


Abb. 3.1: Tunnelquerschnitt Vortrieb 2 – Projekt A (Quelle: Bisenberger [17, S. 4])

gelten höhere Anforderungen an Betonqualität, Herstellung und Einbau der Tübbing, was eine entsprechende Tübbingbemessung und -fertigung für eine dauerhafte Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit fordert. Unmittelbar nach der TVM werden am fertigen Tübbingring auch die vorfabrizierten Sohlelemente versetzt.⁴⁷

Die Innenschale besteht aus einem Abdichtungssystem, welches am ungedichteten Tübbing aufgebracht wird, und aus einer Ortbetoninnenschale, welche von den vorgefertigten Sohlelementen aus den Tunnel umspannt. Sie weist eine Mindestdicke von 30 cm auf und kann, je nach Erfordernissen, bewehrt ausgeführt werden. Die Herstellung wird in Betonierabschnitten von 12,50 m vorgenommen.⁴⁷

3.1.2 Geotechnisch relevante Parameter

Die Informationen zu folgendem Absatz sind Auftraggeber Projekt A [3] entnommen. Die Ausarbeitung stützt sich auf die *ÖNORM B 2203-2* [37] und die Richtlinien der ÖGG. Der Festgesteinsabschnitt des gegenständlichen Projektes besteht überwiegend aus bankigen bis massigen Gneisen, Glimmerschiefen und deren Varianten. Darunter mischen sich des Weiteren Einschaltungen von Marmoren, Amphiboliten und Eklogitamphiboliten. Aus Erkundungsbohrungen kann man eine hohe Schwankung der Mächtigkeit des verwitterten Gebirgsreliefs nachweisen, starke Verwitterungen finden sich bis in Tiefen von ca. 200 m.⁴⁸

Der Baugrund ist von einfachem Großfaltenbau bestimmt, dessen Schieferflächen großteils spitzwinkelig zur Tunnelachse streichen und meist flach bis mittel-steil gegen die Vortriebsrichtung einfallen. Vereinzelt können tektonische Störungen die Tunnelachse in überwiegend spitzen bis stumpfen Winkel schneiden. Diese bewegen sich in einer Größenordnung von mehreren Dezimetern bis einigen Metern und bestehen, laut getätigten Aufschlüssen, aus ungestörtem bis stark zerlegtem

⁴⁸Vgl. [3] Auftraggeber Projekt A, S. 7 ff.

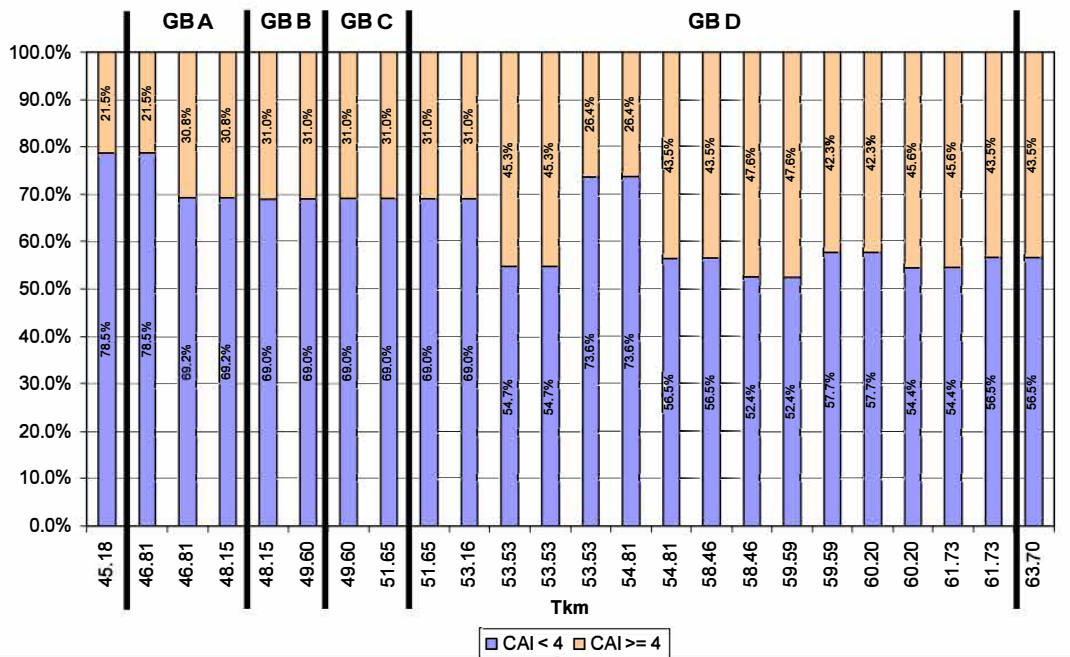


Abb. 3.2: Verteilung der Abrasivitätswerte nach Gebirgsbereichen – Projekt A (Quelle: Auftraggeber Projekt A [3, S. 8])

Fels oder heterogen aufgebauten Kataklisten. Die Prognose für den Vortrieb mittels TVM umreist günstige Gebirgsverhältnisse aus gering zerlegtem Gebirge mit hoher Festigkeit in größeren Abschnitten, welche durch lokale Störungen mit oben genannten Bedingungen unterbrochen werden. Außerdem sind große Mengen an Wasserzutritten in den Störzonen zu erwarten.⁴⁸

Das gesamte Baulos ist auf Basis von Gutachten der Disziplinen Geologie, Hydrologie und Geotechnik in Gebirgsbereiche unterteilt. Tab. 3.2 zeigt die Aufteilung der aufeinander folgenden Bereiche mit zugehörigen Längenangaben im Vortrieb mit TVM.⁴⁸

Tab. 3.2: Gebirgsbereiche des kontinuierlichen Vortriebs – Projekt A (Quelle: Auftraggeber Projekt A [3, S. 26])

| Gebirgsbereich | GB A | GB B | GB C | GB D |
|----------------|-------|-------|-------|--------|
| Länge [m] | 2.990 | 1.450 | 2.050 | 11.550 |

Um Gesteins- und Gebirgseigenschaften zu charakterisieren, welche Bohrbarkeit, Penetration und Verschleiß beeinflussen, werden der Cerchar Abrasivitäts Index (CAI) und die einachsiale Gesteinsdruckfestigkeit herangezogen. Dabei ist beim CAI eine Klassifikation der Abrasivitätswerte größer oder gleich 4, sowie kleiner 4 vorgenommen. In Abb. 3.2 ist die prozentuale Verteilung der CAI-Werte über die, aus geologischer Sicht abgegrenzten Gebirgsbereiche GB A bis GB D (kontinuierlicher Vortrieb) dargestellt.⁴⁸

Die Gesteinsdruckfestigkeit ist ebenfalls, aufgeteilt auf Gebirgsbereiche, klassifiziert. Dabei ergeben sich für die Bereiche GB A bis GB D die in Tab. 3.3 dargestellten Werte. Angegeben werden hier die statistischen Kennwerte Mittelwert, Median und Standardabweichung der Festigkeiten über den entsprechenden Gebirgsbereich. Auf Grundlage der vorgenommenen Einteilung in die Bereiche GB A bis GB D des kontinuierlichen Vortriebs erfolgt eine Einteilung in vier Vortriebsabschnitte. Diese entsprechen im Wesentlichen, bis auf Verschiebung der Abschnitte

Tab. 3.3: Verteilung der einachsialen Gesteinsdruckfestigkeit nach Gebirgsbereichen – Projekt A (Quelle: Auftraggeber Projekt A [3, S. 9])

| Gesteinsdruckfestigkeit | GB A | GB B | GB C | GB D |
|--------------------------|------|------|------|------|
| Mittelwert [MPa] | 129 | 134 | 140 | 144 |
| Median [MPa] | 117 | 115 | 123 | 127 |
| Standardabweichung [MPa] | 65 | 70 | 76 | 76 |

gegeneinander in der Größenordnung von wenigen hundert Metern, der Einteilung aus den Gebirgsbereichen. Es ergeben sich daher die Vortriebsabschnitte VA 1 bis VA 3 mit dem fixen Einbau einer Innenschale, und der VA 4, in dem diese, je nach angetroffenen Gegebenheiten, entfallen kann.⁴⁸

Aufbauend auf die prognostizierten Gebirgsverhaltenstypen sind Gefährdungsbilder für den Vortrieb abgeleitet. Die charakteristischen Gefährdungen im Projekt A sind:⁴⁸

Blockfallen: Im standfestem Gebirge (GVT K1) wird das Risiko von Blockfallen als sehr gering eingeschätzt. In Abschnitten mit nachbrüchigen Bedingungen (GVT K2) beziehungsweise hohlraumnaher Überbeanspruchung (GVT K3) und in Folge von Bergschlägen (GVT K5) muss mit Blockfallen gerechnet werden. Dabei erfolgt eine Unterscheidung zwischen groß- und kleinvolumigen Blöcken. Im Falle eines Herausgleitens großvolumiger Blöcke an der Ortsbrust oder im Schildbereich, besteht die Gefahr einer Beschädigung von Maschine und Abbauwerkzeugen. Beim kleinvolumigen Blockfallen spricht man vom Herauslösen kleinerer Blöcke und aufgelockertem Material aus der Tunnellaubung. Dies erschwert das Einbringen von Bettungsmaterial im Hohlraum zwischen Ausbau und Laibung und erfordert oft eine Nachverpressung.

Echter Gebirgsdruck: Im GVT K4, also Abschnitten mit tiefreichender Überbeanspruchung des Gebirges, ist in Abhängigkeit der angetroffenen Gegebenheiten wie Festigkeit, Verformbarkeit und Störungen, mit druckhaftem Gebirgsverhalten zu rechnen. Es kann dabei zu Belastungen des Schildes kommen, welche zu dessen Verklemmung führen. Um dies zu vermeiden, sind genauere Erkundungsmaßnahmen von der Maschine aus vorzunehmen, auf Basis deren Ergebnisse entsprechende bautechnische Maßnahmen folgen.

Die Gefährdungsbilder werden zu den prognostizierten Gebirgsverhaltenstypen zugeordnet, gemeinsam lässt sich daraus das Systemverhalten ableiten. Abschließend sind die Vortriebsklassen zu erarbeiten, anhand derer eine Ausschreibung des Vortriebs erfolgt.

3.1.3 Tunnelbohrmaschine

Seitens des AG sind für den kontinuierlichen Vortrieb Maschinen vom Typ TBM-S und DSM zugelassen. Der AN entscheidet sich für den Einsatz zweier Doppelschildmaschinen. Für diese Maschinen werden im Vorfeld eine Vielzahl an Eignungskriterien durch den AG definiert, die wichtigsten Eckdaten sind in Tab. 3.4 angegeben.⁴⁹

Weitere wichtige Anforderungen an die TVM sind:⁴⁹

- Öffnungen im Bereich des Teleskopschildes für Wartungsarbeiten und besondere gebirgsverbessernde Maßnahmen

⁴⁹Vgl. [4] Auftraggeber Projekt A, S. 6 ff.

Tab. 3.4: Anforderungen an die DSM – Projekt A (Quelle: Auftraggeber Projekt A [4, S. 6 ff.])

| Bezeichnung | Ausmaß |
|------------------------------|------------------------------|
| Nominaler Bohrdurchmesser | 9,90 m |
| Bohrhub | 1,90 m |
| Anpresskraft Bohrkopf | ≥ 20.000 kN |
| Maximale Hauptvorschubkraft | ≥ 80.000 kN |
| Gripper-Verspannkraft | ≥ 70.000 kN |
| TVM-Mantel ausgelegt auf | ≥ 500 kN/m ² |
| Bohrkopfmantel ausgelegt auf | ≥ 500 kN/m ² |
| Durchmesser Rollenmeissel | $\geq 17,00$ Zoll |
| Minimaler Kurvenradius | 500 m |
| Schildlänge | $\leq 13,00$ m |

- Öffnungen am Schildumfang und Bohrkopf zur Durchführung von Vorauserkundungs- und Injektionsbohrungen, sowie Abdichtungsmaßnahmen
- Schildmantelschmierung
- Stufenlose Drehzahlregulierung und in beide Richtungen drehbarer Bohrkopf
- Pressengruppen die einzeln steuerbar sind und die zulässigen Betonspannungen der Tübbinge nicht überschreiten
- Wiegeeinrichtung der Materialförderung mit kontinuierlicher Datenerfassung in Abhängigkeit der Vortriebsgeschwindigkeit
- Verschleißmessung der wesentlichen Abbauwerkzeuge

Mit Hilfe der genannten, und einer Vielzahl weiterer wichtiger Anforderungen, muss der AN die Maschinen mit Hilfe der Herstellerfirma designen und vom AG genehmigen lassen.⁴⁹

3.2 Projekt B

Die allgemeinen Informationen zu Projekt B entstammen der Arbeit von Schlatter [39]. Es handelt sich hierbei um ein Laufwasserkraftwerk im Grenzgebiet des schweizerisch-österreichischen Alpenraums. Das Kraftwerk ist auf eine Leistung von 89 MW ausgelegt und liefert eine mittlere Jahreserzeugung von 414 GWh. Die Wasserfassung erfolgt über ein Wehr, welches den Inn im Grenzgebiet zwischen Schweiz und Österreich aufstaut. Dessen Einzugsgebiet hat in dieser Lage eine Fläche von ungefähr 1.960 km². Über einen Druckstollen, dessen Errichtung in dieser Arbeit einer Analyse unterzogen wird, gelangt das Wasser zum Krafthaus. Durch den Höhenunterschied zwischen Wasserfassung und Turbinen wird eine Nettofallhöhe von 132,50 m erreicht. Vom

Krafthaus aus wird das Wasser über einen Unterwasserkanal mit Übergabebauwerk an den Inn zurückgegeben.⁵⁰

3.2.1 Projektparameter

Der zur Analyse herangezogene Triebwasserstollen hat eine Gesamtlänge von 22,80 km. Das Tunnelbauprojekt ist aus bauzeitlichen Gesichtspunkten in zwei Abschnitte, TVM Süd und TVM Nord, unterteilt. Die wesentlichen Angaben sind in Tab. 3.5 zusammengefasst. Angegriffen wird das Projekt von einem Fensterstollen aus, der den Triebwasserstollen ungefähr auf halber Länge teilt. Der Fensterstollen wird von einem Portal aus ca. 600 m mittels zyklischem Vortrieb in den Berg getrieben. Anschließend erfolgt der Ausbruch einer Kaverne, in der die Montagen beider TVMs von statten gehen. Im Schnittpunkt Fensterstollen – Triebwasserstollen befindet sich der Tiefpunkt des Tunnels mit einer Achsenhöhe von 950 m. Von dort aus fährt die TVM Süd mit einer Steigung von 0,543 ‰ in Richtung Wehrbauwerk, welches eine Höhe der Tunnelachse von 1.017 m aufweist. Die TVM Nord arbeitet sich mit einer Steigung von 0,173 ‰ in Richtung Wasserschloss, welches vor dem Krafthaus auf einer Höhe von 965 m zu liegen kommt, durch das Gebirge. Der Südvortrieb weist eine Länge ungefähr 12.075 m auf, der Nordvortrieb ca. 9.416 m.⁵¹

Tab. 3.5: Übersicht – Projekt B (Quelle: Arbeitsgemeinschaft Bernard – Stucky [1, S. 4 ff.]

| Bezeichnung | TVM Süd | TVM Nord |
|----------------------|------------|----------|
| Bauloslänge | 12.075 m | 9.416 m |
| Steigung | 0,543 ‰ | 0,173 ‰ |
| Maximale Überdeckung | 1.250 m | 580 m |
| Minimal Überdeckung | auslaufend | 130 m |

Für den Vortrieb der beiden Tunnelbauwerke ist von Seiten des AG und seiner Planer eine TBM-S oder DSM angedacht. Ausgebaut wird der Tunnel folglich mit Tübbing, welche mit Perlkies zu betten sind und nachträglich, zur Verhinderung von Wasserströmungen zwischen Tunnellaubung und Tübbing, mit Mörtel verpresst werden. Der nominale Bohrdurchmesser ist mit 6,50 m festgelegt. Der Querschnitt des fertig ausgebauten Triebwasserstollens ist in Abb. 3.3 ersichtlich.⁵¹

3.2.2 Geotechnisch relevante Parameter

Die geologischen Randbedingungen werden aus dem Längenschnitt von Projekt B [1] entnommen. Die Beschreibung ist ausgehend von der Montagekaverne in Richtung des Süd- beziehungsweise Nordvortriebs. Im Südvortrieb befinden sich ungefähr drei Viertel der Tunnellänge im Kalkglimmerschiefer. Dieser weist oft Einschaltungen aus Ton- und Graphitlagen auf. Das letzte Viertel hin zur Wasserfassung besteht aus Kalkglimmerschiefer mit Marmorbanken. Zwischen diesen beiden Hauptanteilen liegt an der Trennzone eine kurze Einschaltung aus Diabas. Im Südvortrieb sind drei Störzonen mit einigen Metern Mächtigkeit detektiert, welche die Tunnelachse ungefähr rechtwinkelig schneiden. Im Nordvortrieb liegen ca. sieben Achtel des Vortriebs

⁵⁰Vgl. [39] Schlatter, S. 27 ff.

⁵¹Vgl. [1] Arbeitsgemeinschaft Bernard – Stucky, S. 23 ff.

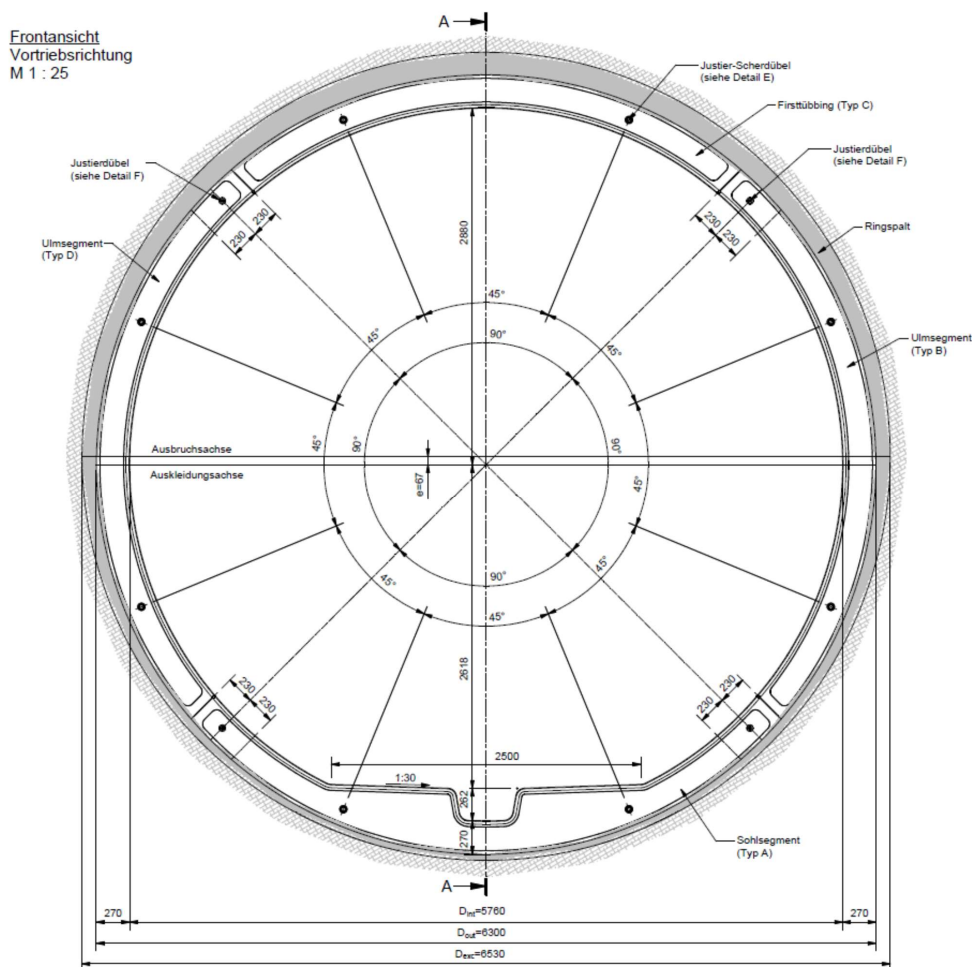


Abb. 3.3: Querschnitt des Triebwasserstollens mit Tübbingauskleidung – Projekt B (Quelle: Arbeitsgemeinschaft Bernard – Stucky [1, Anhang])

wieder im Kalkglimmerschiefer, dieser weist ebenfalls über seine gesamte Länge immer wieder Einschaltungen aus Ton- oder Graphitlagen auf. Das letzte Achtel hin zum Krafthaus besteht aus Serizitphillit. Im Nordvortrieb werden ebenfalls drei Störzonen mit Mächtigkeiten bis zu einigen Metern detektiert, welche rechtwinkelig zur Tunnelachse angegeben werden.⁵²

Bei Projekt B sind ausgehend von der prognostizierten Abrasivität des Gebirges zwei Vortriebsklassen festgelegt. Diese werden mit Hilfe des CAI bestimmt und sind wie folgt aufgeteilt:⁵³

TVM CAI 1 – 2: Vortriebsklasse für einen Abrasivitätswert von CAI 1,00 bis CAI 2,00

TVM CAI 3 – 4: Vortriebsklasse für einen Abrasivitätswert von CAI 3,00 bis CAI 4,00

Die Festlegung der tatsächlichen Vortriebsklassenverteilung erfolgt auf Basis von Cerchar-Tests. Im laufenden Vortrieb sind Gesteinsproben zu entnehmen und im Prüflabor auszuwerten. Die Gültigkeit für Probeentnahmestellen sind vertraglich geregelt, damit aussagekräftige Prüfungen zu Stande kommen können.⁵³

⁵²Vgl. [1] Arbeitsgemeinschaft Bernard – Stucky, S. Anhang

⁵³Vgl. [1] Arbeitsgemeinschaft Bernard – Stucky, S. 27 ff.

3.2.3 Tunnelbohrmaschine

Die Arbeitsgemeinschaft Bernard – Stucky [1] führt einige Mindestanforderungen an die TVM an, die wichtigsten sind nachfolgend aufgelistet:⁵⁴

- Ausführung von Erkundungsbohrungen und anderer Zusatz- und Sondermaßnahmen in den Bereichen Bohrkopf und Schild
- Erstellung von Injektions-Bohrschirmen ausgehend vom Schildbereich
- Verstärkungsmaßnahmen der Tübbingauskleidung (Mörtelverpressung, Rückverankerung, Verstärkung)
- Stufenlose Drehzahlregulierung des Bohrkopfes (elektromechanischer Direktantrieb)
- Einzel steuerbare Pressengruppen und schonende Kraftübertragung auf die Tübbinge, um Abplatzungen zu vermeiden – aus gegebenen Dichtheitsanforderungen des Druckstollens
- Drehbarkeit des Bohrkopfes in beide Richtungen
- Wasserbedüsung der Ortsbrust
- Radialer Überschchnitt von mindestens 50 mm durch Schiften der Kalibermeißel

Seitens des ausführenden Unternehmens werden schlussendlich zwei Doppelschildmaschinen für den Vortrieb ausgewählt. Festgelegt sind bei der Tunnelauskleidung rhomboid- und trapezförmige Elemente, ebenfalls durch den AN. Die wichtigsten Daten des Tunnelquerschnitts und der Tübbingauskleidung sind in Tab. 3.6 zusammengestellt, die Durchmesser, beziehungsweise Abstände, basieren auf *ÖNORM B 2203-2* [37] und der daraus entnommenen Abb. 2.19 auf Seite 53.⁵⁴

Tab. 3.6: Regelquerschnitt – Projekt B (Quelle: Arbeitsgemeinschaft Bernard – Stucky [1, S. 23 ff.])

| Bezeichnung | Ausmaß |
|----------------------|-----------------|
| Innendurchmesser | 5,76 m |
| Außendurchmesser | 6,30 m |
| Ausbruchsdurchmesser | 6,50 m |
| Tübbingstärke | 0,27 m |
| Ringspalt | nominal 0,10 m |
| Tübbingbreite | 1,20 m – 1,50 m |

3.3 Projekt C

Die im folgenden Absatz verwendeten Informationen liegen der Baulosbeschreibung von Projekt C [5] zugrunde. Diese Baumaßnahme umfasst ebenfalls den Ausbau einer österreichischen Eisenbahnstrecke, welche wiederum Teil eines TEN-Korridors ist. Das Gesamtprojekt ist in

⁵⁴Vgl. [1] Arbeitsgemeinschaft Bernard – Stucky, S. 23 ff.

mehrere Baulose unterteilt, gegenständliches beinhaltet zahlreiche zyklische Vortriebe und einen TVM-Vortrieb. In dieser Arbeit wird der kontinuierlich vorzutreibende Erkundungsstollen analysiert, welcher in zeitlichem Vorlauf zu den beiden Fahrtunnelröhren hergestellt wird. Der Erkundungsstollen ist als späterer Rettungstunnel für den laufenden Betrieb ausgelegt.⁵⁵

3.3.1 Projektparameter

Der Erkundungsstollen hat eine Länge von 15.077 m und verläuft unter einer permanenten Steigung von 6,703 ‰ (siehe Tab. 3.7). Im Grundriss sind drei langen Geraden kurze Abschnitte, welche bogenförmig vorzutreiben sind, zwischengelagert. In regelmäßigen Abständen werden Nischen ausgebrochen, welche später der Verbindung von Fahrtunnelröhren zum Rettungstunnel dienen sollen. Der Regelquerschnitt hat einen Ausbruchsradius von 3,95 m und berücksichtigt Deformationstoleranzen von bis zu 15 cm. Auf die Ausbruchslaibung wird eine Spritzbetonaußenschale von bis zu 30 cm Dicke aufgebracht. Außerdem kann eine Innenschale mit einer Dicke von 25 cm nachträglich betoniert werden, falls diese erforderlich wird. Im Sohlbereich ist ein Sohlübbing zu versetzen, welcher die Fahrbahn trägt.⁵⁶

Tab. 3.7: Übersicht – Projekt C (Quelle: Auftraggeber Projekt C [5, S. 117 ff.]

| Bezeichnung | Ausmaß |
|----------------------|-------------|
| Bauloslänge | 15.077 m |
| Steigung | 6,703 ‰ |
| Maximale Überdeckung | ca. 1.720 m |
| Minimal Überdeckung | k. A. |

3.3.2 Geotechnisch relevante Parameter

Der Abschnitt betreffend die geologischen Verhältnisse von Projekt C ist auf Basis der Veröffentlichung von Brandner et al. [18] erstellt. Das Tunnelbauprojekt ist in der geologisch komplex gebauten Übergangszone zwischen Nord- und Südalpen situiert. Dabei werden alle tektonischen Großeinheiten der Alpen, also Südalpin, Ostalpin, Penninikum und Subpeninikum, durchquert. In Abb. 3.4 ist ein Teil des geologische Längsschnittes aus dem Gesamtprojekt dargestellt. Der Erkundungsstollen reicht dabei, bezogen auf die Kilometrierung der Abbildung, ca. von km 3,00 im Norden bei Innsbruck bis km 18,00 im Süden Richtung österreichischer Staatsgrenze. Beginnend von Innsbruck aus findet sich hier die Innsbrucker-Quarzphyllit-Decke (Ostalpin) bis etwa km 14,00. Diese setzt sich hauptsächlich aus Quarzphyllit und Einschaltungen aus Kalk-/Dolomitmarmor, Grünschiefer, Orthogneis, Quarzit, Schwarzphyllit und Glimmerschiefer zusammen. Anschließend folgt im Bereich von km 14,00 bis km 19,00 die Nordrahmenzone des Tauernfensters. Hier finden sich Quarzphyllit und Bündnerschiefer mit gehäuft exotischen Schollen aus Karbonat, Gips oder Anhydrit.⁵⁷

Im Trassenbereich sind zahlreiche Störungszonen detektiert, welche technische und hydrologische Risikobereiche darstellen. Der Erkundungsstollen durchörtert dabei Inntal-, Ahrental-,

⁵⁵Vgl. [5] Auftraggeber Projekt C, S. 13 ff.

⁵⁶Vgl. [5] Auftraggeber Projekt C, S. 117 f.

⁵⁷Vgl. [18] Brandner et al., S. 1 ff.

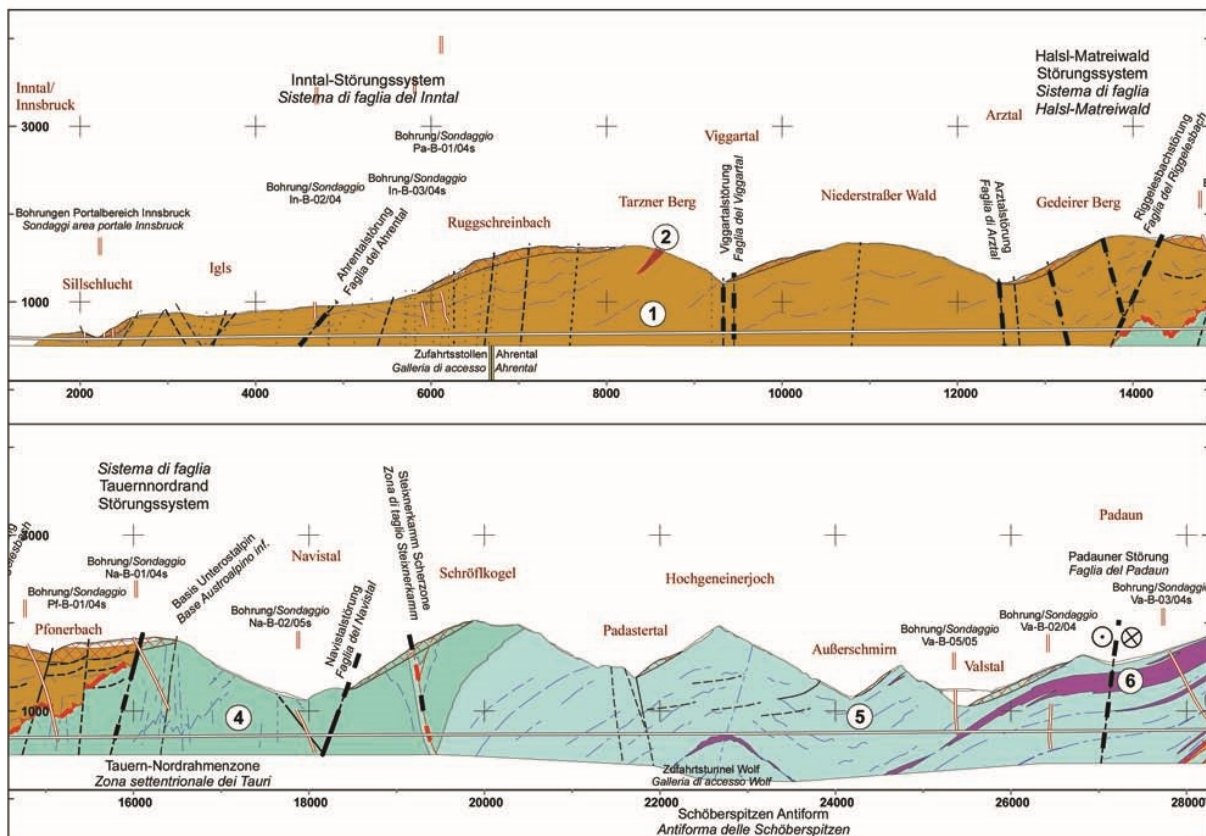


Abb. 3.4: Geologischer Längsschnitt – Projekt C (Quelle: Brandner et al. [18, S. 7])

Wipptal-, Halsl-Matreiwald- und das Miskopf-Tauernnordrand-Störungssystem. Im gesamten Trassenbereich belegen Erdbeben- und Vermessungsdaten, dass durch die andauernde alpine Gebirgsbildung der Alpen mit aktiven Störungszonen zu rechnen ist. Der nördliche Tunnelabschnitt befindet sich in der Erdbebenzone des Inntals, der erdbebenreichsten Region Österreichs.⁵⁷

3.3.3 Tunnelbohrmaschine

Für den folgenden Absatz sind die Informationen Lussu et al. [32] entnommen. Hieraus werden die wichtigsten maschinenspezifischen Daten wiedergegeben:⁵⁸

- Länge der TBM-O inklusive ihrer elf Nachläufer: ca. 200 m,
- Gewicht der TBM-O inklusive Nachläufer: ca. 1.800 t,
- Durchmesser Bohrkopf nominal: 7,93 m,
- Maximales Überbohrmaß: 10 cm,
- Schneidrollen: 19"-Disken,
- Länge des Verspannschildes im Firstbereich mit Fingern: 4.420 mm,
- maximaler radialer Gebirgsdruck auf Verspannschild: 500 kN/m²,

⁵⁸Vgl. [32] Lussu et al., S. 595 ff.

- maximale Vorschubkraft: 23.560 kN,
- installierte Leistung: ca. 5.500 kW

Außerdem ist die Maschine auf den Einbau von Stützmitteln in den Bereichen A1 und A2 ausgelegt. Im A1-Bereich hinter dem Verspannschild ist der Einbau von Ausbaubögen (Profile: UNP 140, UNP 160 und TH 29) in Abständen von 0,85 m oder 1,70 m möglich. Das Setzen von Anker und der Einbau von Bewehrungsmatten ist ebenfalls hier situiert. Im A2-Bereich, welcher ca. 55 m hinter dem Bohrkopf beginnt, wird Spritzbeton mit einer Regelstärke von 15 cm auf die Tunnellaibung aufgetragen. Außerdem werden ca. 30 m hinter dem Bohrkopf ein Sohlübbing und eine Abdeckplatte versetzt. Zu den Sondermaßnahmen im Vortrieb, welche ebenfalls von der Maschine aus durchzuführen sind, zählen weiters die Herstellung von Injektions- und Rohrschirmen sowie Schauminjektionen.⁵⁸

3.4 Projekt D

Dieses Projekt umfasst den Bau eines neuen Abwassertunnels einer Kläranlage in Kanada mit einer Länge von 6.255 m. Die Informationen für diesen Abschnitt sind Ferraro und Lathi [22] entnommen. In der kanadischen Region Halton verlangt eine Kläranlagenerweiterung der Stadt Oakville einen neuen Abwassertunnel. Das gereinigte Wasser wird von der Anlage aus über einen Tunnel in den Lake Ontario gepumpt, und somit wieder dem natürlichen Wasserkreislauf zugeführt.⁵⁹

3.4.1 Projektparameter

Der gesamte Tunnel weist eine Länge von 6.255 m auf, diese teilt sich in einen Onshore-Abschnitt mit 4.100 m landseits und einem Offshore-Abschnitt mit 2.155 m unter dem Lake Ontario. Die wichtigsten Parameter sind in Tab. 3.8 zusammengefasst. Von der Kläranlage aus wird der Tunnelvortrieb in einem Bauschacht, mit einer Tiefe von 62 m, begonnen. Von diesem Schacht ausgehend werden ein 51 m langer Blindtunnel in die Gegenrichtung des Abwassertunnels, und ein 77 m langer Startertunnel bergmännisch vorgetrieben. Diese beiden Ausbrüche dienen zur Montage und zum Anfahren der TVM. Am Seeufer zwischen Onshore- und Offshore-Abschnitt quert der Tunnel einen zweiten, zur Inspektion dienenden, Schacht. Anschließend verläuft der Tunnel in den Seeboden hinaus, wo die Übergabe des Wassers stattfindet. Dies geschieht über 18 vertikale Rohre, welche den Tunnel mit dem darüber liegenden See verbinden.⁵⁹

3.4.2 Geotechnisch relevante Parameter

Ein Großteil der Projektlänge liegt in der Queenstone-Formation. Diese besteht überwiegend aus rotem und grauem Schiefer mit dünnen Zwischenschichten aus Schlickstein, Kalkstein und Sandstein. Darunter liegend befindet sich die Formation der Georgian Bay. Diese besteht aus dunkelgrau gefärbten, schwach bis mittelstark laminierten Schiefer, welcher in harten bis sehr harten Kalkstein und Schlickstein Schichten eingebettet ist. Die mittlere einachsiale Druckfestigkeit liegt bei 22,70 MPa. Die durchschnittliche Festigkeit der Kalksteinschichten liegt bei 137,00 MPa. Bekannt ist weiters, dass der Schiefer Taschen, welche mit entzündlichem Gas gefüllt sind, enthalten kann. Seitens des Grundwassers ist während des Vortriebes im Onshore-Abschnitt mit bis zu 6,60 l/s und im Offshore-Abschnitt mit bis zu 12,50 l/s zu rechnen.⁵⁹

⁵⁹Vgl. [22] Ferraro und Lathi, S. 1 ff.

Tab. 3.8: Übersicht – Projekt D (Quelle: Ferraro und Lathi [22, S. 1 ff.]

| Bezeichnung | Ausmaß |
|----------------------|------------|
| Bauloslänge | 6.255,00 m |
| Onshore | 4.100,00 m |
| Offshore | 2.155 m |
| Neigung | 7,00 ‰ |
| Maximale Überdeckung | 50,00 m |
| Minimal Überdeckung | 15,00 m |

3.4.3 Tunnelbohrmaschine

Für den Vortrieb wird bei diesem Projekt eine generalüberholte TBM-O mit 3,50 m Bohrdurchmesser eingesetzt. Für die Maschine sind folgende Spezifikationen gefordert:⁵⁹

- Tunnelvortrieb mit hoher Leistung von 5,00 m – 7,00 m pro Stunde
- Fahren enger Radien von 130 m und 144 m
- Abbau von Baugrund mit möglichen Gaseinschlüssen
- Sondierbohrungen vor dem Bohrkopf

Durch den Hersteller wird die geforderte Leistung im betrachteten Baugrund gewährleistet. Das Fahren enger Radien wird durch diverse Modifikationen an der Maschine erreicht. Um das sichere Arbeiten im Tunnel auch beim Anfahren von Gaseinschlüssen gewährleisten zu können, ist das Belüftungssystem auf einen Luftstrom von 1.000 m³/min ausgelegt. Zusätzlich sind Messeinrichtungen für die Gaskonzentration im Bohrkopfbereich installiert, die eine zu hohe Konzentration melden und den Zuluftstrom entsprechend regeln. Das Überwachungssystem ist auf Methan, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff ausgelegt. Für die Sondierbohrungen musste der Winkel des Bohrgerätes derart begrenzt werden, dass kein Durchhörtern der Seesohle möglich ist. Im Falle von Wasserzutritt durch Bohrlöcher müssen diese verpresst werden können. In Tab. 3.9 werden die wichtigsten Maschinendaten dargestellt. Der Sicherungsmaßnahmen erfolgen durch Stahlbögen (C 100) in einem Abstand von 900 mm – 1400 mm, Baustahlgitter und Felsanker mit einer Länge von 1,50 m bis 1,70 m. Über diese wird Spritzbeton und in weiterer Folge eine Innenschale mit einer Gesamtdicke von 40 cm aufgebracht. Daraus ergibt sich ein fertiger Innendurchmesser des Tunnels von 2,70 m.⁵⁹

3.5 Projekt E

Das Projektgebiet gegenständlichen Tunnels liegt in Norwegen. Die Informationen für das folgende Kapitel sind der allgemeinen Projektbeschreibung von Ramoni [38] entnommen. Hier wird neben einem bestehenden Eisenbahntunnel der Bahnlinie Begensbahnen, welche die norwegischen Städte Oslo und Bergen verbindet, eine zweite Röhre parallel hinzu errichtet. Die bestehende Tunnelröhre, welche 1964 in Betrieb genommen wurde, weist eine Länge von 7,70 km auf. Sie durchqueren pro Tag 120 Personenzüge und 14 Güterzüge. Auf Grund der sehr hohen Auslastung

Tab. 3.9: Daten der TBM-O – Projekt D (Quelle: Ferraro und Lathi [22, S. 2 f.]

| Bezeichnung | Ausmaß |
|---------------------------|------------|
| Bohrdurchmesser | 3,50 m |
| Bohrhub | 1,40 m |
| Leistung | 735,50 kW |
| Durchmesser Rollenmeissel | 17,00 Zoll |
| Anzahl Rollenmeissel | 26 Stück |

der eingleisigen Strecke und zur Erhöhung der Betriebssicherheit, wurde im Jahr 2009 ein Ausbau beschlossen. Die zweite Röhre weist eine Gesamtlänge von 7,80 km auf und ist das erste norwegische Bahnbauprojekt, in dem eine TVM zum Einsatz kommt.⁶⁰

3.5.1 Projektparameter

Die neue zweite Röhre verläuft südlich des bestehenden Tunnels und wird mit einer Geschwindigkeit von $v_p = 160$ km/h projiziert. Die wichtigsten Projektparameter sind in Tab. 3.10 angegeben. Das Westportal liegt nahe der Atlantikküste der Stadt Bergen, das Ostportal landeinwärts in der Stadt Årna. Begonnen wird der Tunnelbau von Osten aus im zyklischen Vortrieb auf rund 1,00 km Länge, da dort veränderliche Querschnitte situiert sind und eine Startstrecke für die TVM geschaffen werden muss. Anschließend erfolgt der kontinuierliche Vortrieb Richtung Bergen. Die vertikale Linienführung des Bahntunnels ist sattelförmig, vom östlichen Portal aus steigt der Vortrieb auf 1,90 km mit 8,80 ‰ auf einen Hochpunkt, anschließend fällt die restliche Strecke mit einer Neigung von 3,00 ‰ in Richtung Bergen. Alle 500 m werden die bestehende und die neue Tunnelröhre mittels Querschlägen verbunden.⁶⁰

Tab. 3.10: Übersicht – Projekt E (Quelle: Ramoni [38, S. 1 ff.]

| Bezeichnung | Ausmaß |
|----------------------|----------|
| Bauloslänge | 7800 m |
| Länge TVM-Vortrieb | 6.893 m |
| Minimale Steigung | 3,00 ‰ |
| Maximale Steigung | 8,80 ‰ |
| Minimale Überdeckung | 5,00 m |
| Maximale Überdeckung | 600,00 m |

⁶⁰Vgl. [38] Ramoni, S. 1 ff.

3.5.2 Geotechnisch relevante Parameter

Abb. 3.5 veranschaulicht den geologischen Grundriss und den geologischen Längenschnitt des Projektes (Anm.: Årna liegt geografisch im Osten – in der Abbildung liegt der Nordpol unten). Der gesamte Tunnel verläuft im Fels, er durchquert dabei verschiedene Hartgesteine. Vom Ostportal beginnend (Årna) finden sich eine kurze Formation aus Granit, Syenit, Monzonit, Charnockit und Granulit. Nachfolgend eine Formationen aus Anorthosit und granitischem Gneis. Der Großteil des Tunnels liegt im Bereich Augengneis, gebänderter Gneis sowie migmatischer Gneis, dazwischen befindet sich eine Einschaltung aus Migmatit und migmatischem Gneis. Im Westen folgen Bereiche aus Quarzit und Quarzschiefer sowie Amphibolit, Gabbro und Grünschiefer. Der letzte Tunnelkilometer enthält die Hartgesteine Glimmerschiefer und mylonitischer Gneis. Aus den Vorerkundungen ergibt sich eine einachsiale Druckfestigkeit der Gesteine im Bereich von 80 MPa bis 250 MPa. Die Abrasivität auf das Bohrwerkzeug wird als hoch eingestuft, der CAI kann Werte bis zu 5,50 annehmen. Aus den Vorerkundungen ist abzuleiten, dass die Bedingungen generell gut sind, auch wenn es im Verlauf des Vortriebs mehrere stark geklüftete Bereiche gibt.⁶⁰

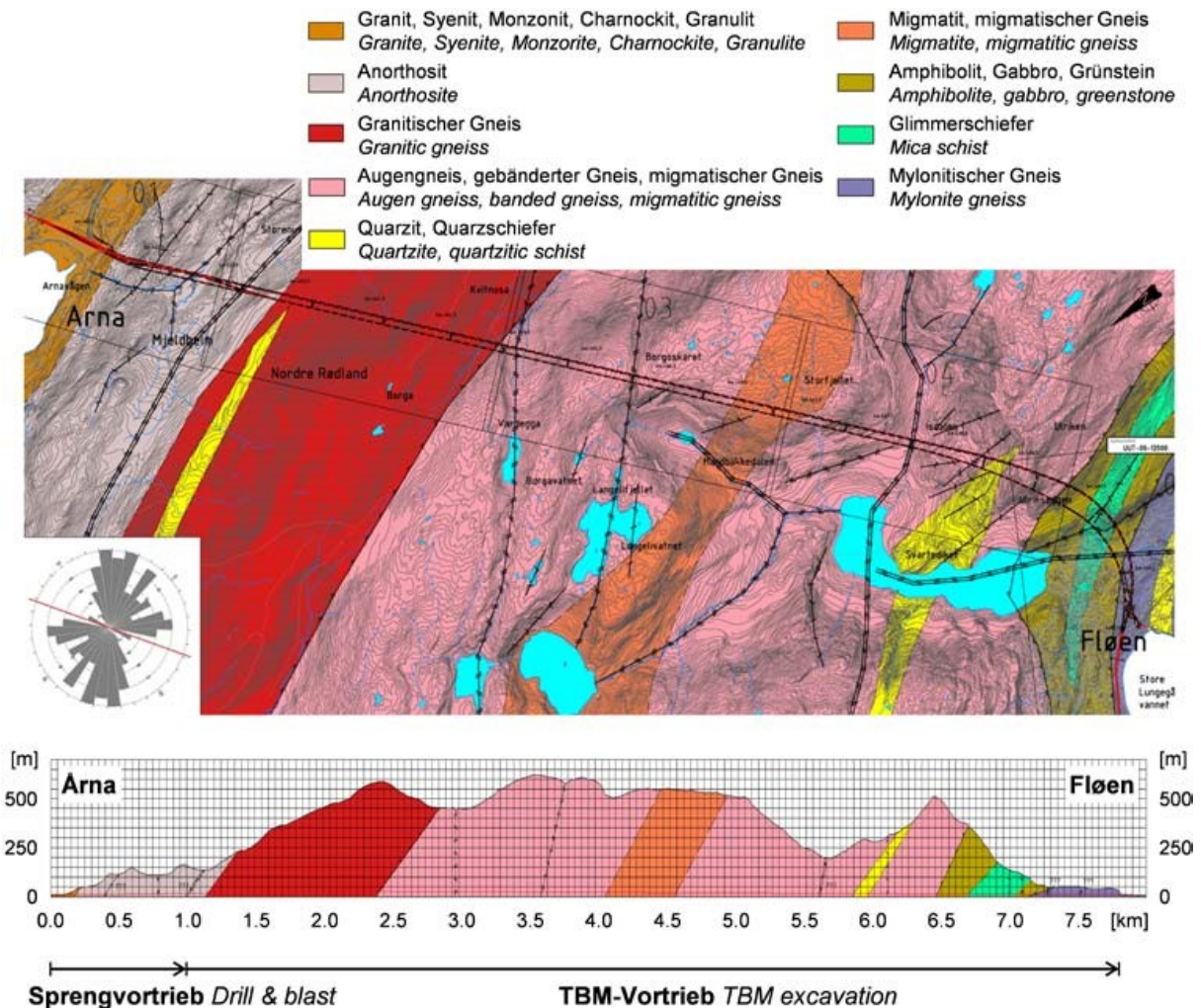


Abb. 3.5: Geologischer Grundriss und geologischer Längenschnitt – Projekt E (Quelle: Ramoni [38, S. 3])

3.5.3 Tunnelbohrmaschine

Für den kontinuierlichen Vortrieb kommt eine Hartgestein TBM-O mit einem Bohrdurchmesser von 9,30 m und einer maximalen Hublänge von 2,00 m zum Einsatz. Weitere wichtige Maschinendaten sind in Tab. 3.11 angegeben.⁶⁰

Tab. 3.11: Daten der TBM-O – Projekt E (Quelle: Ramoni [38, S. 5])

| Bezeichnung | Ausmaß |
|---------------------------|--------------|
| Bohrdurchmesser | 9.30 m |
| Bohrhub | 2,00 m |
| Vorschubkraft | 27,00 MN |
| Anpresskraft | 20,00 MN |
| Gripperkraft | 72,00 MN |
| Drehmoment | 10,00 MNm |
| Drehzahl | 0 – 6.40 rpm |
| Durchmesser Rollenmeissel | 19,00 Zoll |
| Anzahl Rollenmeissel | 62 Stück |

Für die Sicherungsmaßnahmen kommen 3,00 m – 4,00 m lange Felsanker in einem Raster von 1,50 m bis 2,00 m zum Einsatz. Diese werden mit einer bewehrten Spritzbetonschicht von 8,00 cm – 20,00 cm ergänzt. Außerdem können Tunnelbögen vom Profil TH 42 oder HEB 140 eingebaut werden. In der Tunnelsohle erfolgt der Einbau eines Sohlübbings, der als Gleisträger fungiert. Für Vorauserkundungsmaßnahmen und Abdichtungsinjektionen vor der Ortsbrust ist die TBM-O mit einem um 360° schwenkbaren Bohrgerät ausgestattet, welches über eine maximale Bohrlänge von 50 m verfügt.⁶⁰

3.6 Projekt F

Dieses Tunnelbauprojekt befindet sich in Israel, einem Staat in Vorderasien an der Ostküste des Mittelmeers. Es umfasst die Baumaßnahmen einer Trinkwasserversorgungsleitung für die Hauptstadt Jerusalem. Die Informationen für folgende Erläuterungen werden den Vertragsgrundsätzen von Projekt F entnommen, diese sind erstellt durch das Ausführende Unternehmen Projekt F [11].⁶¹

3.6.1 Projektparameter

Um den steigenden Wasserverbrauch Jerusalems zu decken, wird eine neue Wasserversorgungsleitung errichtet. Die Pipeline hat eine maximale Betriebskapazität von 500.000 m³ pro Tag, jährlich sollen durch diese Leitung 150 Millionen m³ Wasser fließen. Die Versorgungsleitung erstreckt sich von den inneren Küstenebenen Israels bis zu den Höhen Jerusalems. In dieser Diplomarbeit wird der 12,80 km lange Tunnelabschnitt dieses Projekts analysiert, welcher zwischen Kesalon und Ein Karem zu liegen kommt.⁶¹

⁶¹Vgl. [11] Ausführende Unternehmen Projekt F, S. 1 ff.

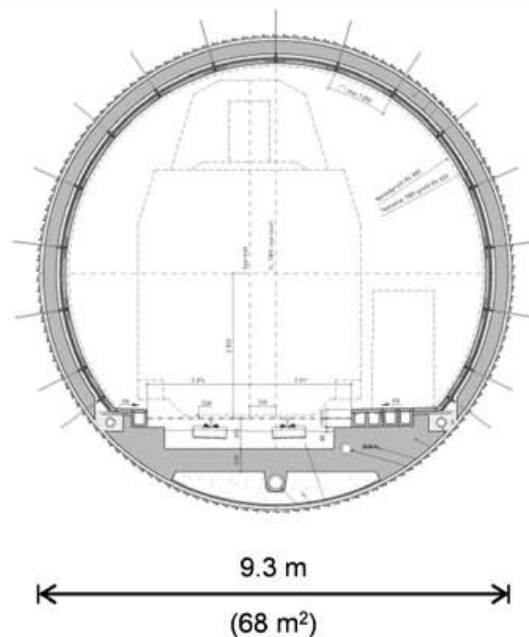


Abb. 3.6: Regelquerschnitt – Projekt E (Quelle: Ramoni [38, S. 10])

3.6.2 Geotechnisch relevante Parameter

Die Informationen zur geologischen Situation gegenständlichen Projektes entstammen aus dem geologischen Längenschnitt und dessen Beschreibung [21]. Das Gebirge besteht größtenteils aus einer Abfolge von Kalkstein- und Dolomit-Abschnitten. Dazwischen befinden sich Stör- und Faltungszonen mit verschiedensten Bestandteilen wie Sedimentquarzit, Ton und Brekzie. Die Faltungszonen werden dabei großteils auf ein Ausmaß von 10 – 20 m eingegrenzt. Außerdem geht aus den Erkundungsmaßnahmen hervor, dass sich über den gesamten Vortrieb Karsthöhlen im Baugrund befinden. In Abb. 3.7 werden die Auswertungen der Bohrproben mit deren RQD-Verteilung dargestellt. Auf Basis dieser Werte wird eine Einteilung des Vortriebes in RMR-Klassen vorgenommen. Nach diesen hat der Bieter seine Vortriebsleistungen zu kalkulieren.⁶²

3.6.3 Tunnelbohrmaschine

In Projekt F wird eine TBM-O mit einem Bohrdurchmesser von 3,90 m verwendet (siehe Tab. 3.12). Diese weist einen Bohrhubb von 1,50 m auf, der Bohrkopf ist mit 22 Rollenmeissel und vier Räumer ausgestattet.⁶³

Nach dem Gesteinsabbau werden im Sicherungsbereich A1 (3,00 – 6,00 m hinter dem Bohrkopf) Tunnelbögen, Spritzbeton und gegebenenfalls Felsanker eingebaut. Im Sicherungsbereich A2 (25 – 37 m hinter Bohrkopf) können zusätzlich Tunnelbögen, Bewehrungsmatten, Anker und Spritzbeton aufgebracht werden. Die Außenschale nimmt eine Stärke von rund 20 cm ein. Nachträglich wird eine Innenschale mit 40 cm betoniert, der Innendurchmesser des Wasserversorgungstunnels beträgt schlussendlich 3,30 m. Die Tunnelbohrmaschine ist außerdem mit einem Bohrgerät für Erkundungsbohrungen bestückt. Im Sohlbereich wird ein Sohlstein durch die TBM-O versetzt,

⁶²Vgl. [21] Ecolog Engineering Ltd., S. S. 1 ff.

⁶³Vgl. [12] Ausführende Unternehmen Projekt F, S. 5 ff.

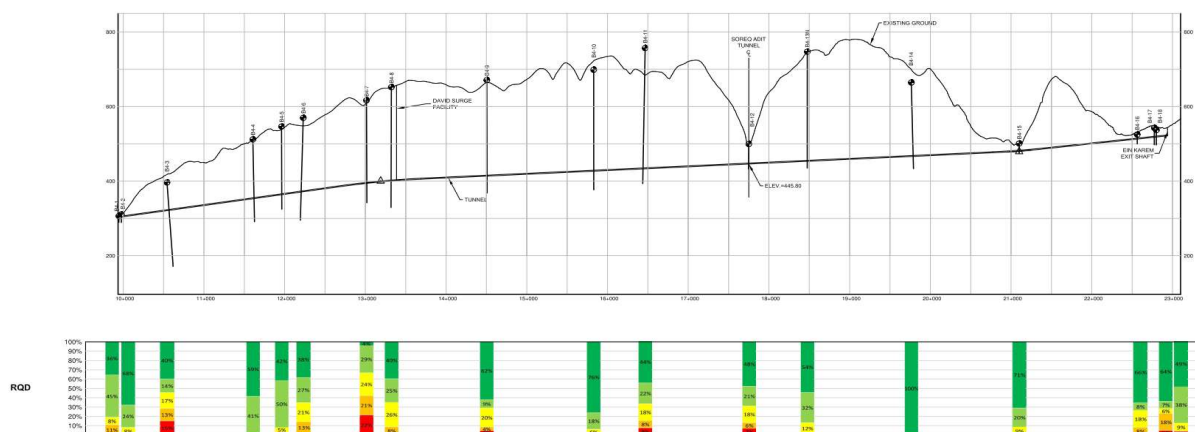


Abb. 3.7: Längenschnitt und RQD-Verteilung– Projekt F (Quelle: Ecolog Engineering Ltd. [21, Anhang])

Tab. 3.12: Daten der TBM-O – Projekt F (Quelle: Ausführende Unternehmen Projekt F [12, S. 5])

| Bezeichnung | Ausmaß |
|--------------------------|------------|
| Bohrdurchmesser | 3,90 m |
| Bohrhub | 1,50 m |
| Durchmesser Rollenmeißel | 19,00 Zoll |
| Anzahl Rollenmeißel | 22 Stück |

dieser dient als Gleisträger für die logistische Versorgung mittels Zug und wird in die fertige Tunnelinnenschale später mit eingebunden.⁶³

3.7 Gegenüberstellung Projektparameter

Abschließend soll zu diesem Kapitel eine gesamtheitliche Übersicht gegeben werden. Tab. 3.13 zeigt die einzelnen Projekte mit deren Ausbruchslängen, -durchmesser, Maschinentyp und grob eingeteilter Geologie auf. Insgesamt werden ca. 95 km Tunnelausbruch in dieser Diplomarbeit betrachtet. Die Baugründe bestehen vor allem aus Hartgestein mit projektspezifischen Besonderheiten. Zum Einsatz kommen vier Doppelschildmaschinen und vier offene Tunnelbohrmaschinen.

Tab. 3.13: Gegenüberstellung der analysierten Projekte

| Projekte | Länge [m] | D _N [m] | Typ | Geologie grob eingeteilt |
|-----------------------|--------------|-----------------------|-------|-------------------------------|
| Projekt A, Vortrieb 1 | 20.050 | 9,90 | DSM | Gneis, Glimmerschiefer |
| Projekt A, Vortrieb 2 | 17.850 | 9,90 | DSM | Gneis, Glimmerschiefer |
| Projekt B, TVM Süd | 12.075 | 6,50 | DSM | Kalkglimmerschiefer |
| Projekt B, TVM Nord | 9.416 | 6,50 | DSM | Kalkglimmerschiefer |
| Projekt C | 15.077 | 7,93 | TBM-O | Quarzphillit, Bündnerschiefer |
| Projekt D | 6.255 | 3,50 | TBM-O | Schiefer, Kalkstein |
| Projekt E | 6.893 | 9,30 | TBM-O | Granit, Gneis |
| Projekt F, Teil 1 | 7.490 | 3,90 | TBM-O | Kalksandstein, Dolomit |
| Summe | 95.106 | | | |

Kapitel 4

Bestimmung projektspezifischer Vortriebsleistungen anhand von Ausschreibungs- und Kalkulationsunterlagen

Im gegenständlichen Kapitel werden die vom AG ausgeschriebenen Abläufe eines maschinellen Tunnelvortriebes aufgezeigt. Diese ergeben, im Zusammenhang mit den Kalkulationen des Bieters, beziehungsweise des späteren AN, welche im Rahmen der Erstellung dieser Diplomarbeit übergeben worden sind, eine vertraglich festgeschriebene Leistung. Diese Festsetzungen entsprechen in der Diplomarbeit einer vereinbarten Ausgangslage, welche als **Soll** angesehen wird. Dem Leser werden dabei die ablaufenden Tätigkeiten eines Bohrhubes der verschiedenen Tunnelvortriebsmaschinen, im Weiteren als **Prozesse** bezeichnet, und deren Dauer veranschaulicht. Die Summe der Prozesse eines Bohrhubes ergibt die Hubzeit, differenziert nach Vortriebsklassen. Versehen mit den ausgeschriebenen Längen der VKL berechnet sich der Vorgang des Regelvortriebs. An der Errichtung eines Tunnels im kontinuierlichem Vortrieb sind eine Vielzahl weiterer Arbeitsabläufe beteiligt, diese werden im Weiteren als **Vorgänge** bezeichnet. Die Vorgänge sind für jeden Vortrieb mit deren Anteile am Gesamtprojekt dargestellt. Dies vermag dem Leser ein Gefühl zu geben, wie auftretende Arbeiten im Vortrieb im Verhältnis zueinander ausgeschrieben bzw. kalkuliert werden.

Auf Grund der großen Tradition des Tunnelbaus in Österreich beschäftigt man sich seit langem mit Möglichkeiten der Ausschreibung solcher Projekte. Für den maschinellen Tunnelbau gibt es hierzulande eine eigens dafür geschaffene Norm (ÖNORM B 2203-2) welche bereits unter Abschnitt 2.4 näher erläutert ist. Diese liefert Ausschreibungsansätze zu Leistungen im Regelvortrieb, Baustellengemeinkosten, Positionen des Ausbruchs, Erschwernissen, Regiepositionen aber auch Vortriebsunterbrechungen und Vortriebsstilliegen. Ebenfalls Einfluss nehmen die unterschiedlichen Varianten von Tunnelvortriebsmaschinen. Hinsichtlich der verschiedenen Leistungen ist in Österreich durch langjährige Verbesserungen gegenwärtig ein breites Spektrum abgedeckt. Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass sich die nationalen Ausschreibungsmethoden gut etablieren können. Für die laufende Weiterentwicklung der österreichischen Methoden zur Ausschreibung und Vergütung im Tunnelbau wird am Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement – Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik am Brückenschlag zwischen Vertrag und Vergütung geforscht. Wie Eingangs erwähnt, geht der Gedanke in Richtung eines *innovativen Vertrags- und Vergütungsmodells für den maschinellen Tunnelbau*.

4.1 Vortriebskalkulation – Projekt A

Die Informationen, mit denen dieser Abschnitt erarbeitet ist, entstammen den im Rahmen der Diplomarbeit übergebenen Unterlagen [6]. Die Ausschreibung von Projekt A beruht auf den Vorgaben der ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01 für die kontinuierlich aufgefahrene Tunnelröhren. Um ein Angebot abzugeben, muss der Bieter Überlegungen betreffend Bauzeitmodell und

Leistungswerte anstellen, welche in vorgefertigte Tabellen (im Bauvertrag enthalten) einzusetzen sind. Durch diese wird eine angebotene Bauzeit ermittelt, und im Falle der Beauftragung, vereinbart. Im Rahmen der Tabellenkalkulation sind bei einigen Leistungen Vorgabewerte des AG ausgeschrieben. Diese Werte werden immer als oberer- und unterer Grenzwert angegeben, somit kann der Bieter seine Vorgangsdauer nur innerhalb der festgesetzten Bandbreite abgeben. Für den kontinuierlichen Tunnelvortrieb dieses Projekts sind folgende Leistungen ausgeschrieben:

- Montage TVM
- Regelvortriebsleistungen nach Vortriebsklassen
- Zusatzzeiten
 - Zusatzzeiten aus Wassererschwernis
 - Zusatzzeiten aus erhöhter einachsialer Druckfestigkeit
 - Zusatzzeiten aus dem Bauprozess (aus diversen Maßnahmen während des Vortriebes)
- Vortriebsunterbrechungen
- Einarbeitungszeit
- Stillliegezeiten
 - Vortriebsstillliegen > 168 h
 - Stillliegezeiten aus Abgängen
- Demontage TVM

Die Auswertung wird dabei getrennt nach Vortrieb 1 und Vortrieb 2 vorgenommen. Aus ihrer parallelen Lage erhofft man sich, Rückschlüsse über die unterschiedlichen geologischen Situationen zweier benachbarter Röhren ziehen zu können.

Die Ausarbeitungen zum betreffenden Abschnitt in Form einer Analyse von Ausschreibung und Kalkulation der oben genannten Vorgänge werden in dieser Diplomarbeit nicht veröffentlicht. Sie sind in *Forschungsbericht – Leistungsanalyse ausgewählter Projekte im maschinellen Tunnelbau* [15] durch Bender und Bisenberger dargestellt und können dort eingesehen werden.

4.2 Vortriebskalkulation – Projekt B

Die in diesem Kapitel dargestellten Ausarbeitungen basieren auf den im Rahmen der Diplomarbeit übergebenen Daten zur Ausschreibung GKI – Gemeinschaftskraftwerk Inn [25]. Die Wiedergabe der kalkulierten Bauzeit erfolgt für Süd- und Nordtunnel separat. Die ausgeschriebenen Leistungsteile für die kontinuierlichen Vortriebe sind folgendermaßen aufgebaut:

- Aufbau und Montage der TVM
- Regelvortrieb laut Vortriebsklassen
- Wassererschwernisse
- Vortriebsunterbrechungen für Zusatzmaßnahmen
- Rückfahrt und Demontage der TVM

Auf die einzelnen Vorgänge wird im Folgenden genauer Bedacht genommen.

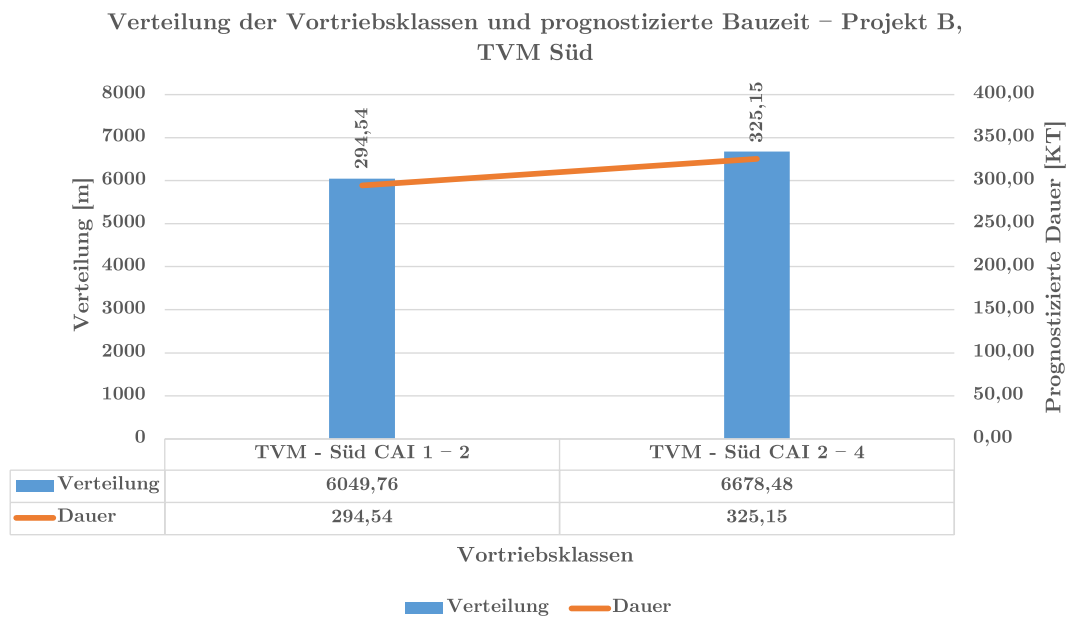


Abb. 4.1: Vortriebsklassenverteilung laut Ausschreibung (Soll) – Projekt B, TVM Süd

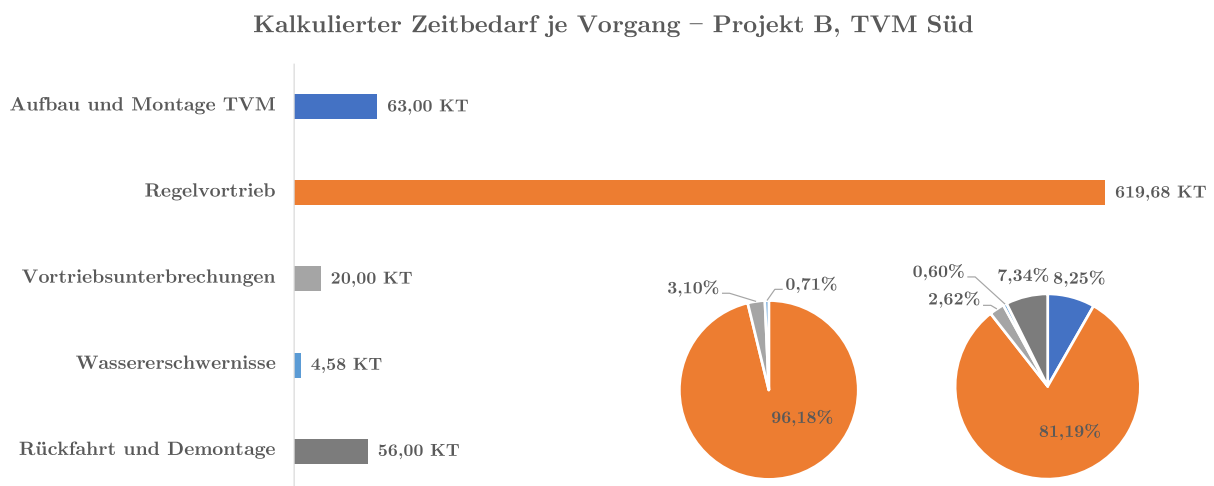


Abb. 4.2: Kalkulierter Zeitbedarf je Vorgang (Soll) – Projekt B, TVM Süd

4.2.1 TVM Süd

Für die beiden Vortriebsklassen wird seitens des AG eine Verteilung angegeben, der Bieter muss seine kalkulierte Regelvortriebsleistung bekannt geben, wodurch sich die Bauzeit je VKL ergibt. In Abb. 4.1 sind die Längen der Vortriebsklassen und deren Dauer dargestellt. Für die Klasse mit CAI 1 – 2 ergibt sich eine Dauer von 295 KT, für jene mit CAI 2 – 4 ergeben sich 325 KT. Insgesamt nimmt der Vorgang des Regelvortriebes ungefähr 620 Kalendertage in Anspruch. In Abb. 4.2 werden die einzelnen Vorgänge mit einander verglichen. Im rechten Kreisdiagramm finden alle Vorgänge Eingang, im Linken werden Montage und Demontage weggelassen, um die reinen Bauvorgänge gegenüber zu stellen. Der Regelvortrieb ist der deutlich längste Vorgang des Bauprojektes, er nimmt 81,19 % an der Gesamtdauer ein. Anschließend folgt der Aufbau und die Montage der TVM, der Zeitraum von 63 KT ist vom Bieter festgelegt.

Kurz danach liegt die Rückfahrt durch den ausgebrochenen Tunnel und Demontage der TVM mit 56 KT. Diese beiden Vorgänge haben Anteile von 8,25 % und 7,34 % an der Gesamtbauzeit. Die Vortriebsunterbrechungen sind seitens des AG mit 20 KT in der Ausschreibung vorgegeben. Die Berechnung der Wassererschwernisse erfolgt nach ähnlichem, bereits erläuterten, Schema des vorigen Projektes. Der AG gibt eine Anzahl an Kalendertagen vor, in denen Erschwernisse durch Wasserspenden auftreten. Der Bieter hat eine Leistungsminderung anzugeben, diese darf sich in einer Bandbreite von 0 % bis 20 % bewegen. Es kommen 4,58 KT an zusätzlicher Bauzeit zur Vergütung der verminderten Leistung zu Stande. Dies entspricht einem Anteil von 0,60 % an der Gesamtbauzeit.

Nun werden die einzelnen Vorgänge wieder aneinander gereiht, um eine mittlere Bauzeit berechnen zu können. Abb. 4.3 veranschaulicht die angedachte Bauzeit aus der Kalkulation. Die

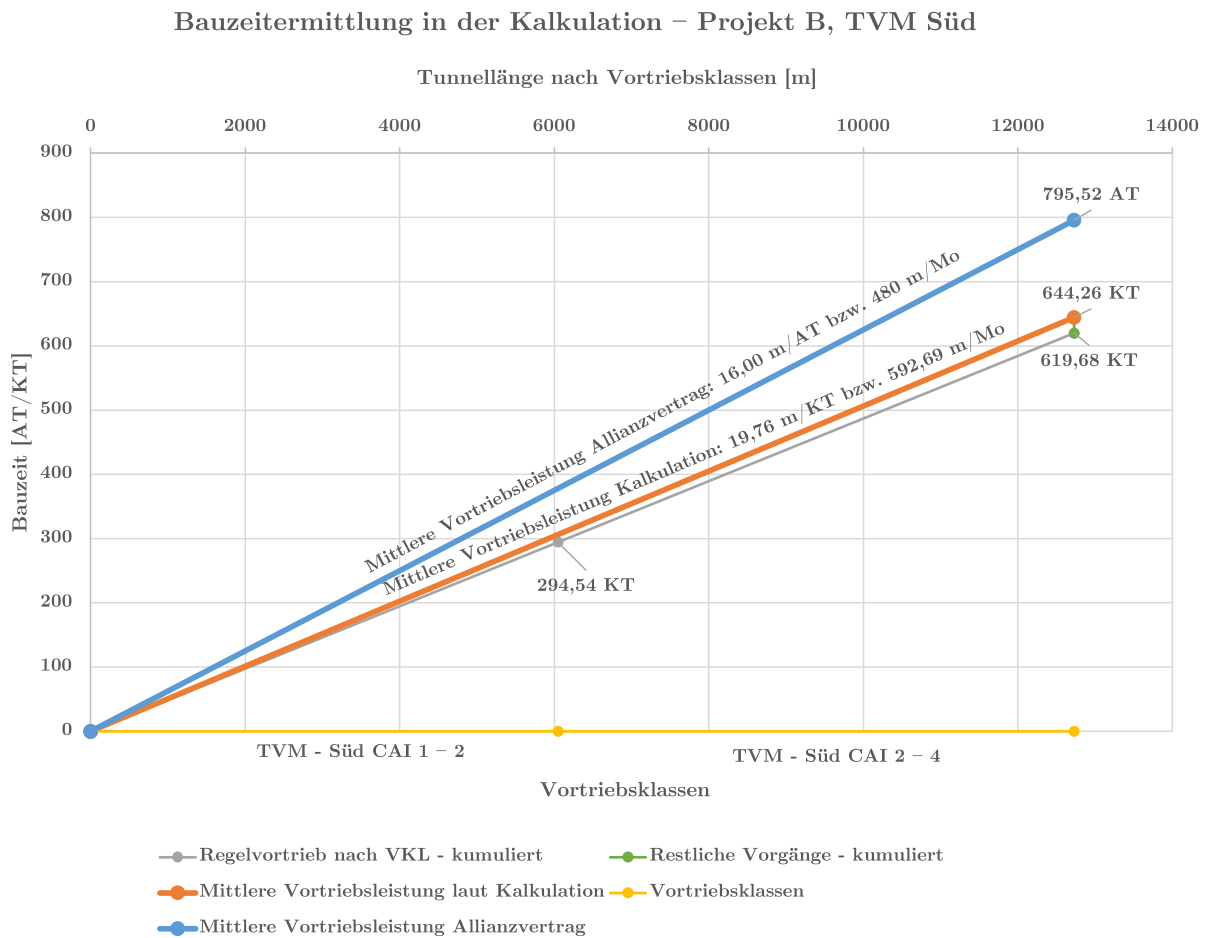


Abb. 4.3: Bauzeitplan (Soll) – Projekt B, TVM Süd

beiden VKL werden über ihre Ausschreibungslängen und den bewerteten Zeitdauern an einander gereiht. Dadurch ergeben sich 619,68 KT. Hinzu kommen die Vortriebsunterbrechungen und Wassererschwernisse, wodurch die Vortriebszeit auf 644,26 KT klettert. Über die 12.728,24 m an Tunnelvortrieb ergibt sich eine mittlere Vortriebsleistung in der Kalkulation zu 19,76 m/KT beziehungsweise 592 m/Mo. Dieses Gebot gewann die Ausschreibung, der Bieter wurde für den Auftrag bestellt. Kurz nach Baubeginn kam es jedoch zu einer Vertragsauflösung zwischen AG und AN, wodurch ein neuer AN bestellt werden musste. Auf Grund der Tatsache, dass die TVM bereits fertig montiert und Angefahren war, entschied man sich für einen Allianzvertrag zwischen

AG und neuem AN. In diesem ist eine mittlere Vortriebsleistung von 16,00 m/AT beziehungsweise 480 m/Mo vereinbart. Die gesamte Vortriebsdauer beläuft sich im Allianzvertrag auf 795,52 AT, nähere Angaben sind nicht vorhanden.

4.2.2 TVM Nord

Die Kalkulation für den Nordvortrieb verläuft nach dem selben Schema. In Abb. 4.4 wird die Verteilung der Vortriebsklassen dargestellt. Im Südvortrieb ist die Verteilung beider Klassen

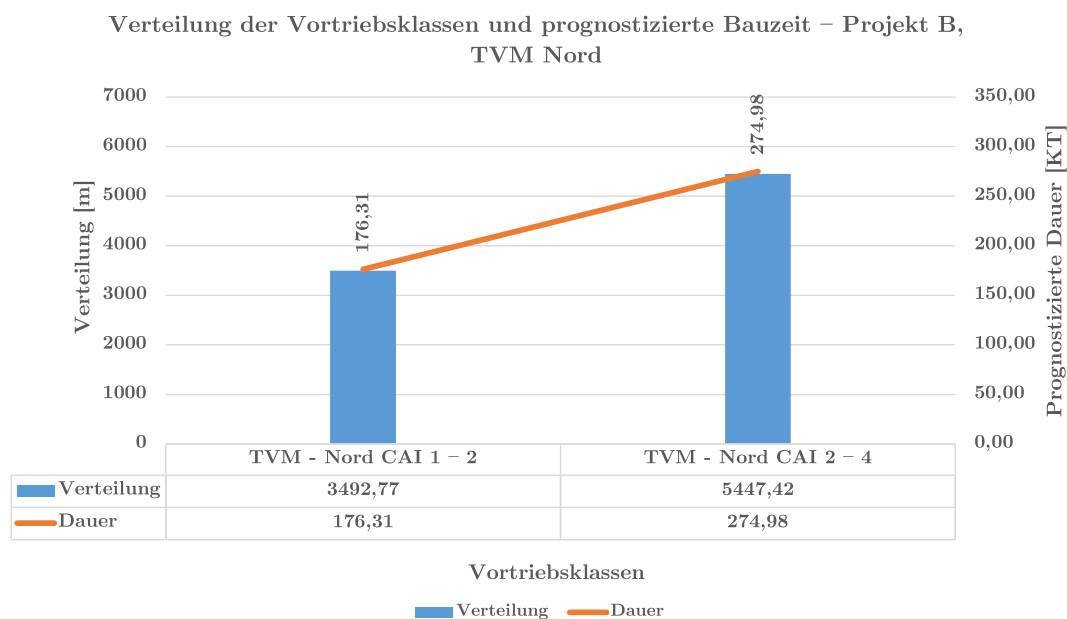


Abb. 4.4: Vortriebsklassenverteilung laut Ausschreibung (Soll) – Projekt B, TVM Nord

annähernd gleich, hier ist geologiebedingt mit größeren Vortriebslängen an hohem CAI zwischen 2 und 4 zu rechnen. Für die VKL CAI 1 – 2 ergibt sich eine Dauer von 176 KT und für die VKL CAI 2 – 4 eine Dauer von 275 KT. In Abb. 4.5 wird die Regelvortriebsdauer den anderen Vorgängen gegenüber gestellt. Aus beiden VKL ergeben sich in Summe für den Regelvortrieb

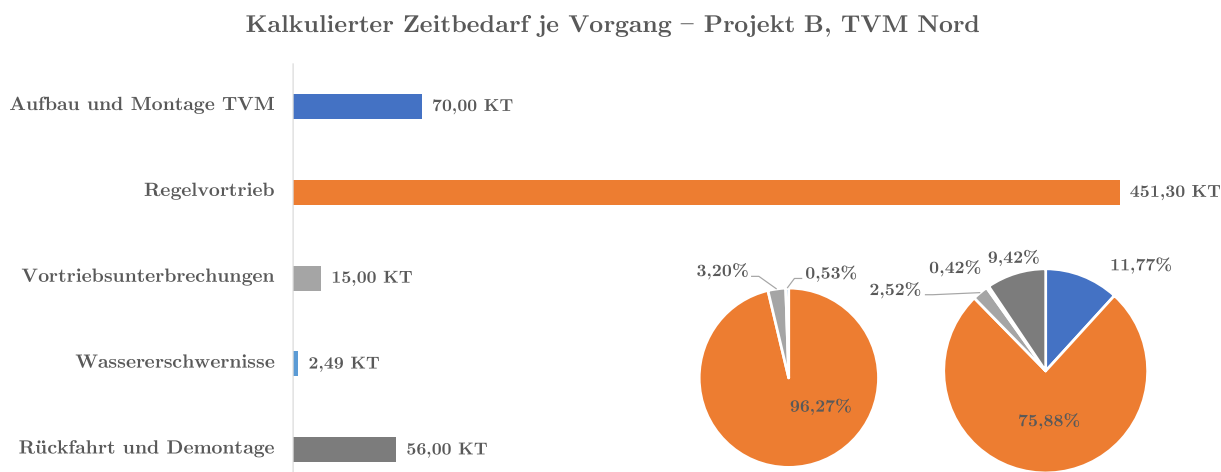


Abb. 4.5: Kalkulierter Zeitbedarf je Vorgang (Soll) – Projekt B, TVM Nord

451,30 KT, dies entspricht einem Anteil von 75,88 % an der Gesamtbauzeit. Der Aufbau und die

Montage der TVM werden vom Bieter mit 70 KT veranschlagt, die Rückfahrt und die Demontage mit 56 KT. Diese kommen auf Anteile von 11,77 % und 9,42 % der Gesamtbauzeit. Für den kürzeren der beiden Vortriebe sind vom AG in der Ausschreibung 15 KT an Vortriebsunterbrechungen vorgegeben, dies entspricht 2,52 %. Die Wassererschwernisse ist analog dem Südvortrieb berechnet. Es ergeben sich 2,49 KT beziehungsweise 0,42 %.

In Abb. 4.6 wird die Bauzeit aus der Kalkulation dargestellt. Die beiden Vortriebsklassen sind

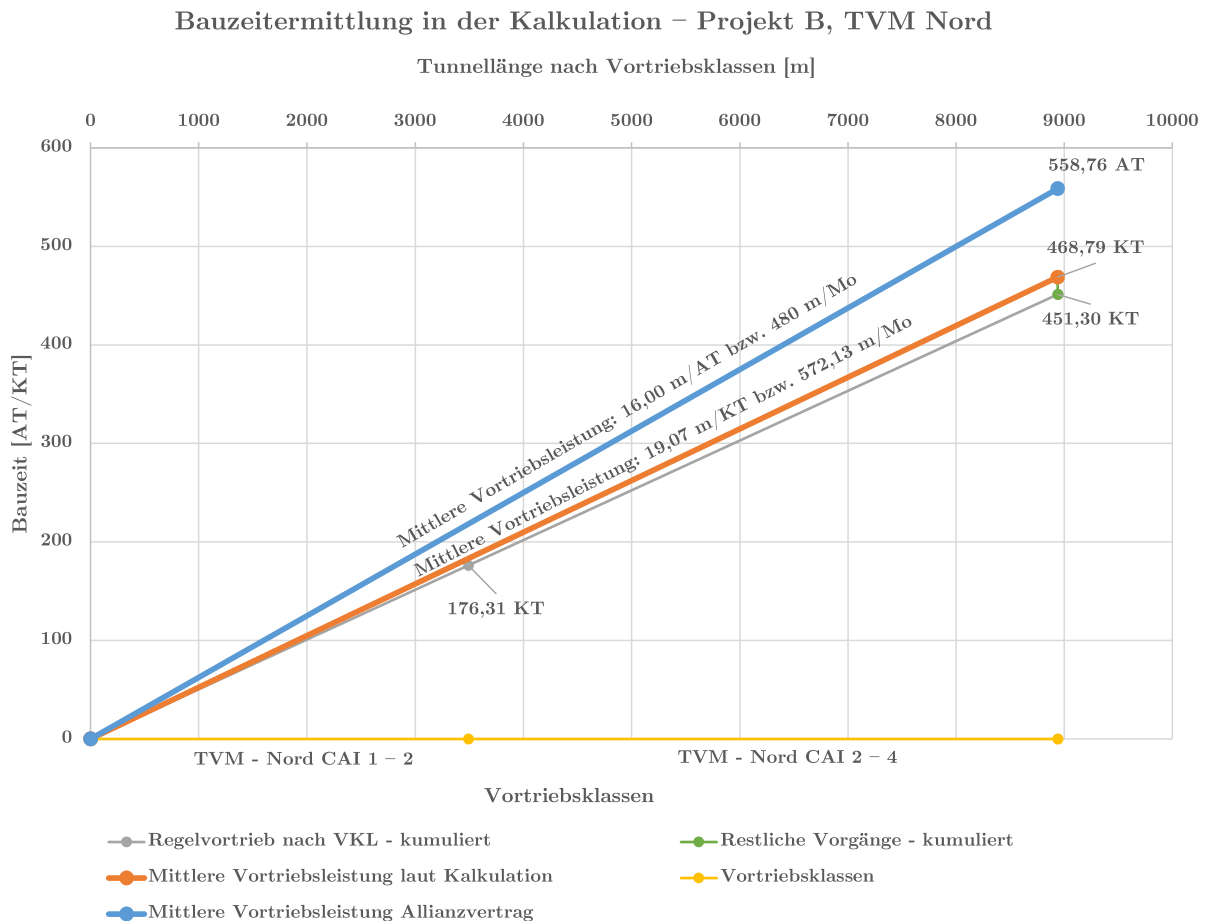


Abb. 4.6: Bauzeitplan (Soll) – Projekt B, TVM Nord

nach Länge und Dauer an einander gereiht. Für den Regelvortrieb des 8.940,19 m langen Tunnels ergibt sich ein Zeitbedarf von 451,30 KT. Hinzu gezogen werden Vortriebsunterbrechungen und Wassererschwernisse, was die kalkulierte Vortriebszeit auf 468,79 KT erhöht. Daraus ergibt sich eine angebotene mittlere Vortriebsleistung von 19,07 m/KT beziehungsweise 572,13 m/Mo. Da der Vertrag zwischen AG und AN für das Gesamtprojekt aufgelöst wurde, mussten auch für den Nordtunnel neue Leistungen vereinbart werden. Hier kommt ebenfalls der Allianzvertrag des gleichen AN zur Ausführung. Es ist eine mittlere Vortriebsleistung von 16,00 m/AT bzw. 480 m/Mo vereinbart, welche in einer Bauzeit von 558,76 AT mündet.

4.3 Vortriebskalkulation – Projekt C

Dieser Abschnitt ist mit Hilfe der übergebenen Daten für die Diplomarbeit [8] erstellt. Der gesamte Vortrieb setzt sich bei diesem Projekt aus folgenden Vorgängen zusammen:

- Montage TVM
- Regelvortriebsleistungen nach Vortriebsklassen
- Vortriebsunterbrechungen
- Erschwernisse
 - Minderung der Vortriebsleistung auf Grund erhöhter einachsialer Druckfestigkeit (UCS)
 - Minderung der Vortriebsleistung auf Grund eines erhöhten Cerchar-Abrasivitäts-Index (CAI)
 - Minderung der Vortriebsleistung durch Penetrationstests
 - Minderung der Vortriebsleistung durch Wasserzutritt oberhalb der Grenzwasserspende
- Zusätzliche Zeiten
- Einarbeitungszeit
- Stillliegezeiten
- Demontage TVM

Die durchgeführten Analysen zu diesem Abschnitt werden ebenfalls nicht in dieser Diplomarbeit veröffentlicht. Sie sind in *Forschungsbericht – Leistungsanalyse ausgewählter Projekte im maschinellen Tunnelbau* [15] dargestellt.

4.4 Vortriebskalkulation – Projekt D

Gegenständlicher Abschnitt ist auf Basis der übergebenen Daten für diese Diplomarbeit [9] erarbeitet. Für Projekt D erfolgt eine Aufteilung in Vortriebsabschnitte, dabei befinden sich drei davon am Festland (Onshore 1 – 3) und drei unter dem See (Offshore 1 – 3). In gegenständlichem Projekt wird zwischen Regelvortriebsleistungen, Erschwernissen, einem Vershub der TBM-O und den allfälligen Abgängen an Wochenenden und Feiertagen unterschieden. Die Arbeitszeit besteht in der Kalkulation aus einer fünf Tage Woche, in der die Baustelle Montags bis Freitags 24 Stunden pro Tag betrieben wird. Samstag, Sonntag und Feiertage sind arbeitsfrei.

Regelvortrieb

Der Regelvortrieb setzt sich aus folgenden Prozessen zusammen:

- Bohren
- Sichern
- Umsetzen
- Wartung/Reparatur
- Materialförderung

- Probebohrungen
- Sonstiges
- Erschwernisse

Für die sechs Vortriebsabschnitte werden die in Tab. 4.1 dargestellten Prozessdauern kalkuliert. Bohrzeit, Sicherungsaufwand und der Zeitbedarf für das Umsetzen der Maschine werden für den

Tab. 4.1: Kalkulierte Dauer der Einzelprozesse (Soll) – Projekt D

| Prozess | Einheit | Onshore | Onshore | Onshore | Offshore | Offshore | Offshore |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Bohren | [min/m] | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| Sichern | [min/m] | 11,43 | 11,43 | 11,43 | 11,43 | 11,43 | 11,43 |
| Umsetzen | [min/m] | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 |
| Wartung/Reparatur | [min/m] | 9,89 | 5,74 | 5,74 | 6,39 | 6,39 | 6,39 |
| Materialförderung | [min/m] | 2,86 | 2,86 | 2,86 | 2,86 | 2,86 | 2,86 |
| Probebohrungen | [min/m] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,20 | 3,20 | 3,20 |
| Sonstiges | [min/m] | 2,26 | 1,74 | 1,74 | 1,82 | 1,82 | 1,82 |
| Erschwernisse | [min/m] | 22,19 | 1,94 | 1,94 | 1,94 | 1,94 | 1,94 |
| Summe | [min/m] | 59,33 | 34,41 | 34,41 | 38,34 | 38,34 | 38,34 |

gesamten Vortrieb als einheitlich betrachtet, da sich dieser nur in einer geologischen Zone befindet. Die Dauern der Prozesse betragen 10,00 min, 11,43 min und 0,71 min pro vorgetriebenen Tunnelmeter. Für Wartungs- und Reparaturarbeiten werden pro Tag vier Stunden eingerechnet, aus den sich ergebenden unterschiedlichen Vortriebsgeschwindigkeiten der Vortriebsabschnitte folgt dadurch eine unterschiedliche Dauer dieses Prozesses pro Tunnelmeter. Die Materialförderung wird wieder in jedem Abschnitt gleich bewertet. Probebohrungen sollen nur in den Offshore-Abschnitten durchgeführt werden, hier wird mit einer Dauer von 3,20 min pro Vortriebsmeter gerechnet. Unter den Prozess Sonstiges fallen eine tägliche Sicherheitsbesprechung, Vermessungsarbeiten und weitere, nicht näher zu klassifizierende, Tätigkeiten. Für die verschiedenen Abschnitte ergibt sich eine Zeitbewertung von 1,74 – 2,26 min/m. Bei gegenständlichem Vortrieb sind weiters allfällige kontinuierlich auftretende Erschwernisse des ganzen Vortriebsabschnittes direkt auf die Vortriebsleistung aufgerechnet. In diesem Prozess finden sich folgende Einflüsse wieder:

- Erschwerter Vortrieb durch zerfallende Ortsbrust
- Überlastungen der Maschine aus geologischen Gründen, welche zu deren Ausfall führen
- Scherzonen im Baugrund

Die Scherzonen werden vor allem dem Abschnitt Onshore 1 zugewiesen, zusammen mit den weiteren zwei Erschwernissen ergibt sich hier eine Prozessdauer von 22,19 min/m. Für die restlichen Abschnitte werden 1,94 min/m aus geologischen Bedingungen in Rechnung gestellt. Es resultieren aus der Summe der Einzelprozesse Zeiträume von 34,41 – 59,33 min an Vortriebszeit für einen Tunnelmeter. In Abb. 4.7 sind die einzelnen Prozesse grafisch veranschaulicht, außerdem ist die kalkulierte tägliche Vortriebsleistung angegeben.

In Tab. 4.2 ist die Hubdauer im entsprechenden Vortriebsabschnitt angegeben, diese errechnet sich aus der Prozesssumme und einer Hublänge der TBM-O von 1,40 m. Über einen 24-Stunden

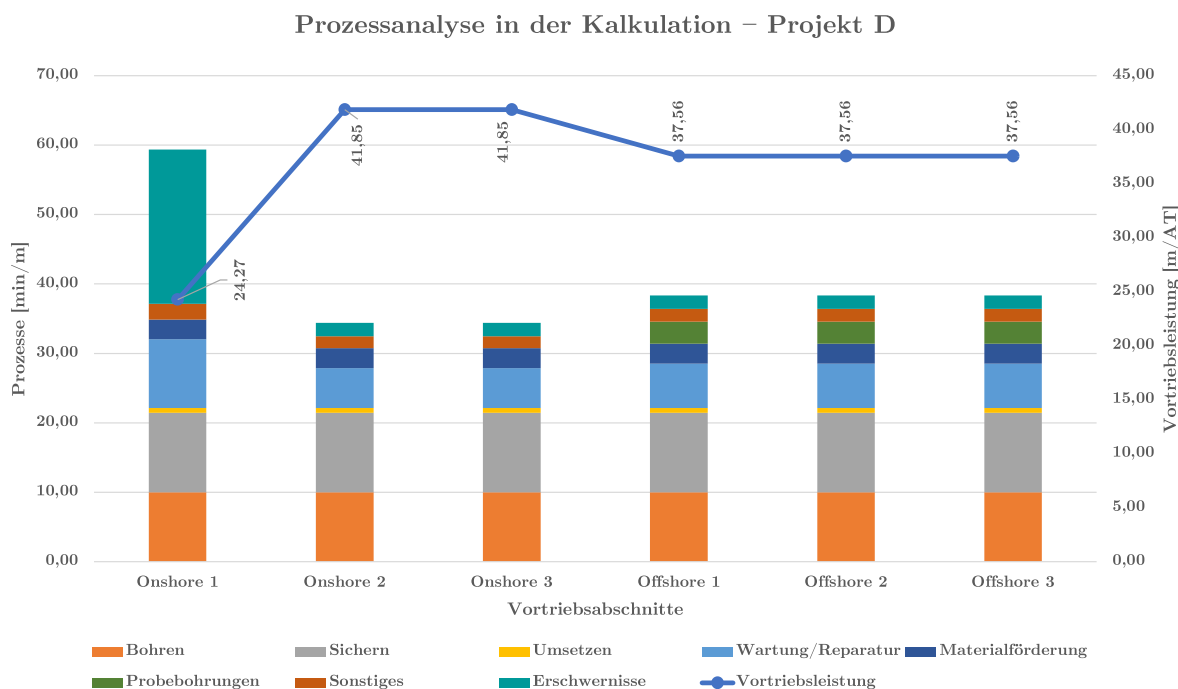


Abb. 4.7: Prozessanalyse in der Kalkulation (Soll) – Projekt D

Arbeitstag wird anschließend die Vortriebsleistung berechnet. Die geringste Leistung wird in Onshore 1 mit 24,27 m/AT kalkuliert. Anschließend folgen Offshore 1 – 3 mit 37,56 m/AT. In den Abschnitten Onshore 2 und Onshore 3 sollen pro Arbeitstag 41,85 m Tunnel vorgetrieben werden. Über die festgesetzte Längen der Vortriebsabschnitte ergibt sich daraus eine kalkulierte Vortriebsdauer je Abschnitt. Die Verteilung der Vortriebsabschnitte und deren Dauer wird in

Tab. 4.2: Verteilung der Vortriebsabschnitte und prognostizierte Dauer (Soll) – Projekt D

| Bezeichnung | Einheit | Onshore | Onshore | Onshore | Offshore | Offshore | Offshore |
|-------------------|-----------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Hubdauer | [min/Hub] | 83,07 | 48,18 | 48,18 | 53,68 | 53,68 | 53,68 |
| Vortriebsleistung | [m/AT] | 24,27 | 41,85 | 41,85 | 37,56 | 37,56 | 37,56 |
| Länge Abschnitt | [m] | 200,00 | 3.528,00 | 358,00 | 1.568,00 | 296,00 | 305,00 |
| Vortriebsdauer | [AT] | 8,24 | 84,31 | 8,55 | 41,75 | 7,88 | 8,12 |

Abb. 4.8 grafisch dargestellt. Für den Regelvortrieb resultiert eine kalkulierte Dauer von insgesamt 158,86 Arbeitstagen.

Erschwernisse

Für den Vortrieb sind lokal auftretende Erschwernisse extra angeführt. Hier handelt es sich um vier große Einzelmaßnahmen, welche dem Vortriebsabschnitt zugeschrieben werden, in dem sie auftreten. Die Lernkurve von TBM-O und Vortriebsmannschaft wird zur Gänze dem Vortriebsabschnitt Onshore 1 im Ausmaß von 4,90 KT zugeschrieben. In Onshore 2 liegt die Querung des CP-Schachtes, für diese wird ein Zeitraum von 0,87 AT kalkuliert. Offshore 2 beinhaltet eine logistische Erschwernis zufolge des Tunnelendes. Dieses wird mit 0,45 AT anberaumt. An letzter Stelle finden sich im Abschnitt Offshore 3 die Übergaberohre in den See. Erschwerte Vortriebsarbeiten und logistische Verzögerungen werden mit 5,22 AT kalkuliert. Die einzelnen

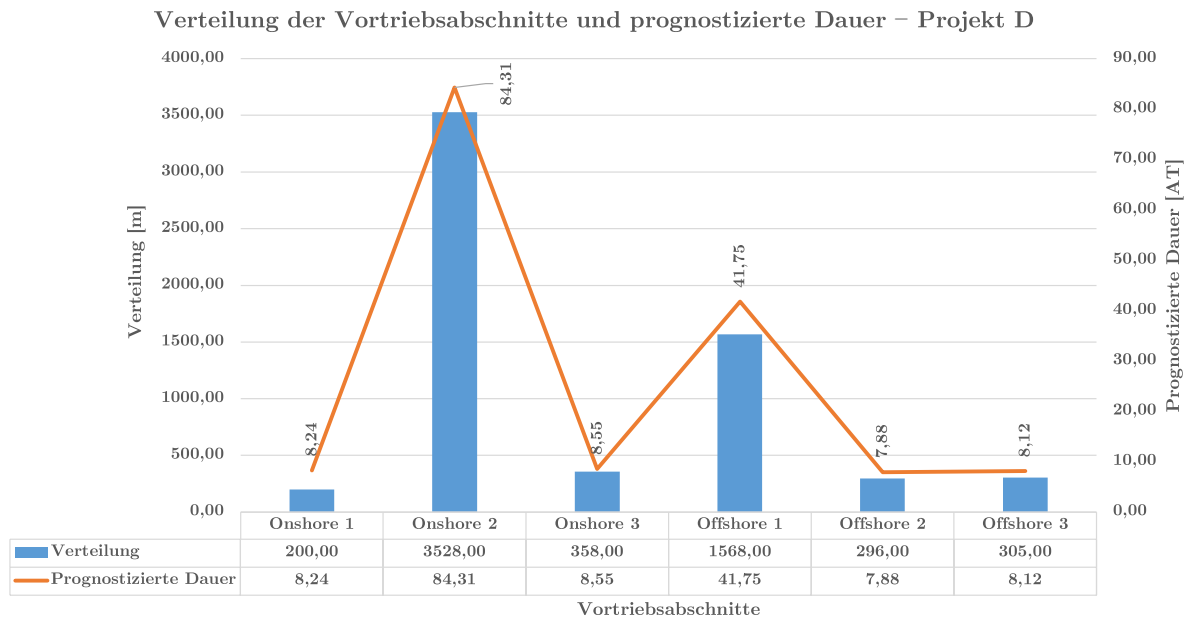


Abb. 4.8: Vortriebsabschnitte laut Ausschreibung (Soll) – Projekt D

Erschwernisse sind in Abb. 4.9 entsprechend der Vortriebsabschnitte dargestellt. Insgesamt ergibt sich durch diese ein Mehr an Arbeitszeit im Ausmaß von 12,14 AT.

Ein Verschiebung der TBM-O durch den CP-Schacht ist extra ausgewiesen. Hier wird die Maschine im Zuge der Querung des bereits hergestellten Schachts durch diesen geschoben. Dafür werden laut Kalkulation 12,00 AT benötigt.

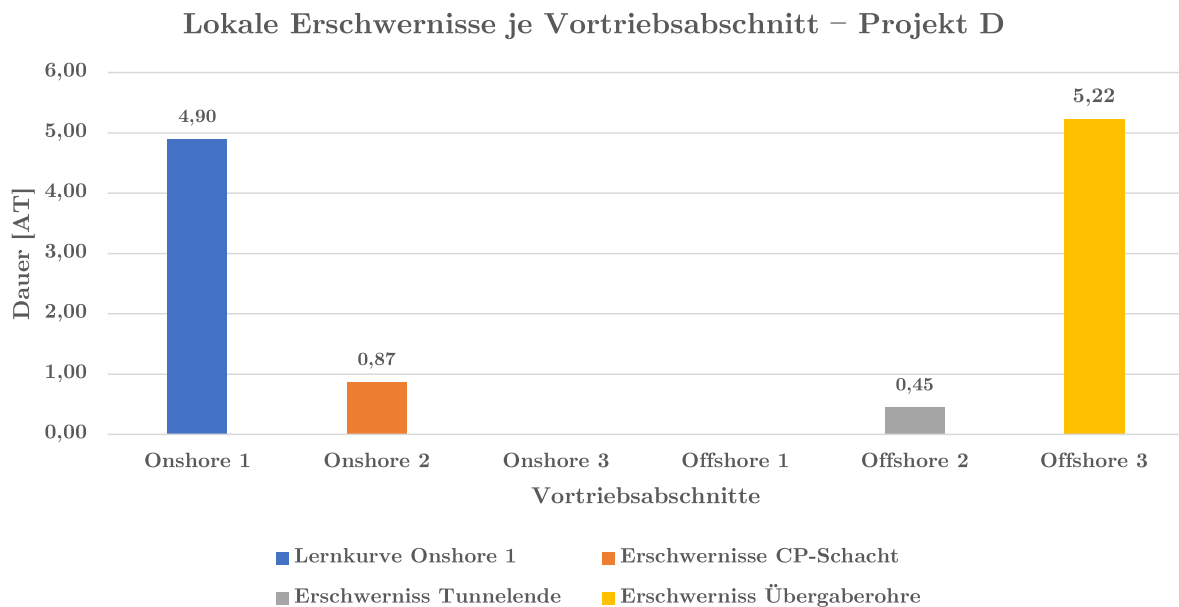


Abb. 4.9: Erschwernisse laut Ausschreibung (Soll) – Projekt D

Abgänge

Aus dem berechneten Regelvortrieb und den Erschwernissen ergibt sich eine Ausführungsdauer in Arbeitstagen. Aus einer Arbeitswoche im Ausmaß von 5 AT fallen somit 2 KT an Wochenende

an. Außerdem sind ab festgelegtem Baubeginn die Abgänge auf Grund von Feiertagen ebenfalls ausweisbar. Es ergeben sich 75 KT an Wochenende und arbeitsfreier Zeit, sowie 8 KT an Feiertagen.

Zusammenstellung

In der Zusammenstellung werden alle Vorgänge aus der Kalkulation einander gegenübergestellt. Die ermittelte Dauer des Regelvortriebes nimmt 59,72 % der Gesamtbauzeit ein. In deutlichem Abstand folgen die als Stillliege zu wertenden Wochenendabgänge im Ausmaß von 75 KT bzw. 28,20 %. Als nächstes gereiht sind die Erschwernisse mit 12,14 AT und der Verschub mit 12,00 AT. Diese entsprechen je einem Anteil von ca. 4,50 % am Gesamtvortrieb. Zuletzt folgen die Abgänge aus Feiertagen mit rund 3,00 %. Die einzelnen Vorgänge sind in Abb. 4.10 sowohl in Arbeits- bzw. Kalendertagen und prozentual angegeben.

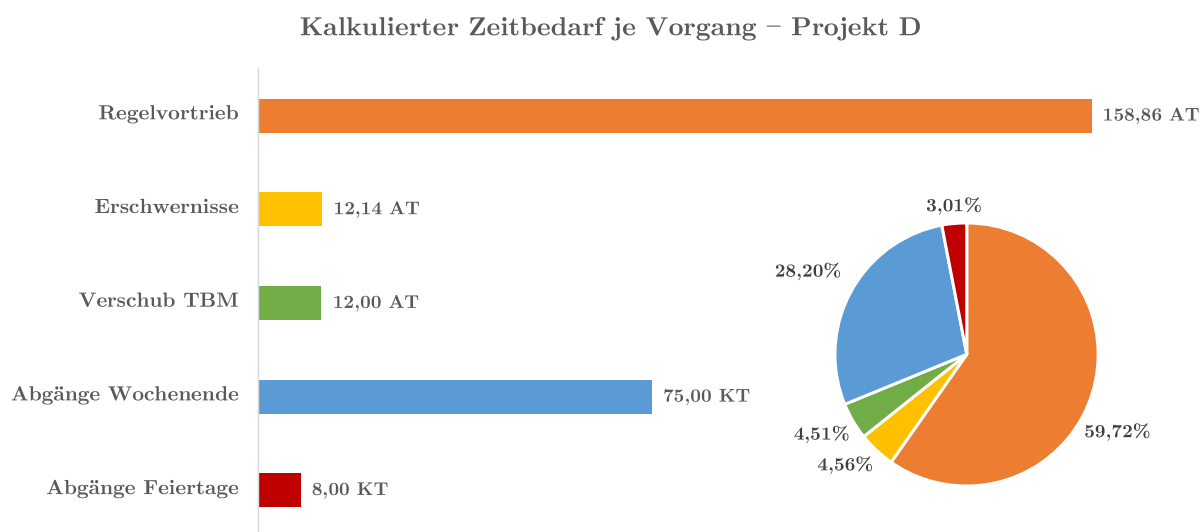


Abb. 4.10: Kalkulierter Zeitbedarf je Vorgang (Soll) – Projekt D

Bauzeitplanung

Für die Planung des Bauablaufes wird in erster Linie eine vertraglich vereinbarte Baseline aus den Kalkulationsunterlagen [9] herangezogen. Diese ist in Abb. 4.11 wiedergegeben. Die Baseline wird in Kalendertagen angegeben, sie beinhaltet bereits alle oben genannten Bestandteile des Bauprozesses. Im Bauzeitdiagramm werden die Vortriebsabschnitte entsprechend ihrer Länge und Dauer an einander gereiht. Zusätzlich der restlichen Vorgänge ergibt sich eine Bauzeit von 183 AT für den 6.255 m langen Tunnel. Dies entspricht einer mittleren Leistung von 34,18 m/AT. Werden die berechneten Abgänge in die Bauzeit miteinbezogen, ergibt sich eine Bauzeit von 266 Kalendertagen, dies geht in gleicher Weise aus der Baseline hervor. Für die Gesamtbauzeit errechnet sich somit eine mittlere Vortriebsleistung von 23,52 m/KT beziehungsweise 705,46 m/Mo.

4.5 Vortriebskalkulation – Projekt E

Für die Erstellung dieses Abschnittes sind die übergebenen Daten im Rahmen dieser Diplomarbeit [10] herangezogen. Die Ausschreibung von Projekt E beruht nicht auf den Vorgaben der ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01, da dieser Tunnel in Norwegen situiert ist. Für die Kalkulation dieses Projektes sind folgende große Leistungsgruppen definiert:

- Tunnelausbruch

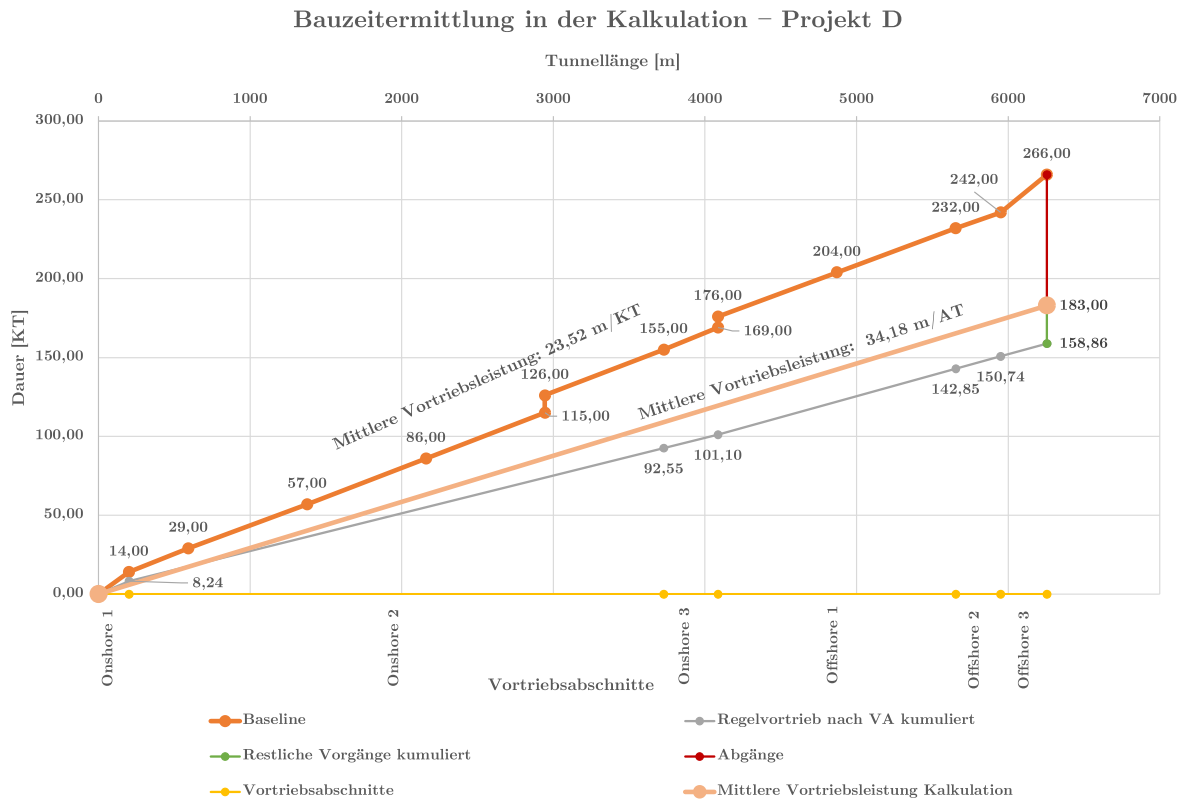


Abb. 4.11: Bauzeitplan (Soll) – Projekt D

- Erkundungsbohrungen, Kernbohrungen und Verpressen
- Zusatzzeiten Tunnelausbruch

Zuzüglich werden außerdem Abgänge, bestehend aus Feiertagen und Wochenenden, im Vorfeld über die kalkulierte Bauzeit definiert. Bei diesem Vortrieb wird von Montag – Freitag 24 Stunden pro Tag gearbeitet, am Samstag 15 Stunden. Restlicher Samstag und Sonntag liegen am Wochenendausgang.

Tunnelausbruch (Regelvortrieb)

In Abb. 4.12 werden die kalkulierten Vortriebsleistungen, über ihre Vortriebsklassen verteilt, dargestellt. Die Höchstwerte an Leistung liefern dabei die Klassen SK1 und SK2 mit Werten von 26,70 m/AT an Tunnelvortrieb. Die geringste Leistung liegt in der Klasse SK5 mit einem Wert von lediglich 3,45 m/AT. In Klasse SK4 beträgt der Leistungswert nur 6,15 m/AT. Die Klasse 3 mit ihren verschiedenen Abstufungen bewegt sich zwischen Leistungen von 25,05 – 12,95 m/AT. Die Vortriebsklassen sind anhand ihrer Ausbaumaßnahmen definiert, je geringer der Ausbau, desto höher die Leistung. In Tab. 4.3 sind, je nach Vortriebsklasse, Vortriebsleistung, die ausgeschriebene aufzufahrende Tunnellänge und die daraus errechnete prognostizierte Baudauer angegeben. In Abb. 4.13 werden die Längen der Vortriebsklassen und deren prognostizierte Baudauer grafisch veranschaulicht.

Die längste aufzufahrende Klasse ist SK2 mit 2843 m und einer daraus resultierenden Dauer von 106 Arbeitstagen. Mit einer Länge von 1546 m folgt anschließend die VKL SK1. Für diese ergeben sich prognostizierte 58 Vortriebstage. Die Klassen SK3A und SK3B weisen fast die selben Längen von ungefähr 783 m auf, aus den verschiedenen Leistungswerten ergeben sich für

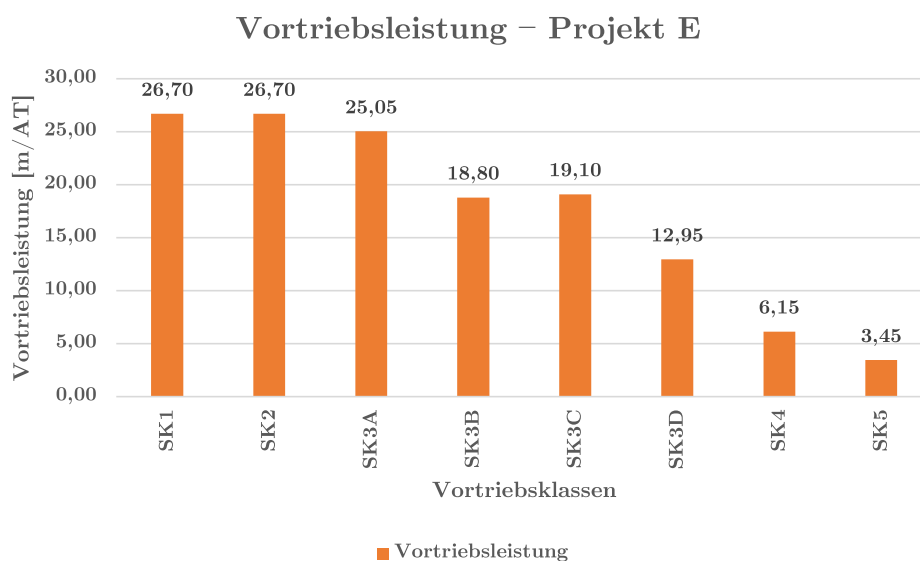


Abb. 4.12: Vortriebsleistung entsprechend VKL (Soll) – Projekt E

Tab. 4.3: Vortriebsleistung, Vortriebsverteilung und prognostizierte Dauer im Regelvortrieb (Soll) – Projekt E

| Bezeichnung | SK1 | SK2 | SK3A | SK3B | SK3C | SK3D | SK4 | SK5 |
|--------------------------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Vortriebsleistung [m/AT] | 26,70 | 26,70 | 25,05 | 18,80 | 19,10 | 12,95 | 6,15 | 3,45 |
| Länge VKL [m] | 1.546,00 | 2.843,00 | 783,00 | 782,00 | 377,00 | 350,00 | 182,00 | 30,00 |
| Progn. Dauer [AT] | 57,90 | 106,48 | 31,26 | 41,60 | 19,74 | 27,03 | 29,59 | 8,70 |

die Bauzeit 31 Tage und 42 Tage. SK3C und SK3D weisen wieder annähernd gleiche Längen auf, konkret 350 m und 377 m. Es resultieren aus deren Leistungen prognostizierte Bauzeiten von 20 AT und 27 AT. Die VKL SK4 liegt mit einer ausgeschriebenen Länge von 182 m an vorletzter Stelle. Aus ihrer geringen Leistung resultieren dadurch ca. 30 Tage an Baudauer. VKL SK5 weist die schlechtesten Randbedingungen, und dem geschuldet auch den geringsten Leistungswert, auf, jedoch sind in dieser Klasse lediglich 30 Tunnelmeter ausgeschrieben. Ihre Bauzeit soll laut Kalkulation ungefähr 9 Arbeitstage beanspruchen.

Gesamt ergibt sich für den Tunnelausbruch nach Vortriebsklassen eine prognostizierte Bauzeit von 322,29 Arbeitstagen (siehe Abb. 4.14).

Bohrungen und Verpressen

Für die Leistungsgruppe der Erkundungsbohrungen, Kernbohrungen und Verpressen werden die im Folgenden angeführten Leistungen am kritischen Weg unterschieden:

- Bohrungen durch den Bohrkopf
- Wiederverfüllen oder Verpressen von Erkundungsbohrungen
- Aufbau und Abbau der Bohrgeräte
- Verformungsmessungen
- Wartezeit während der Vermessung
- Wasserspendenmessungen

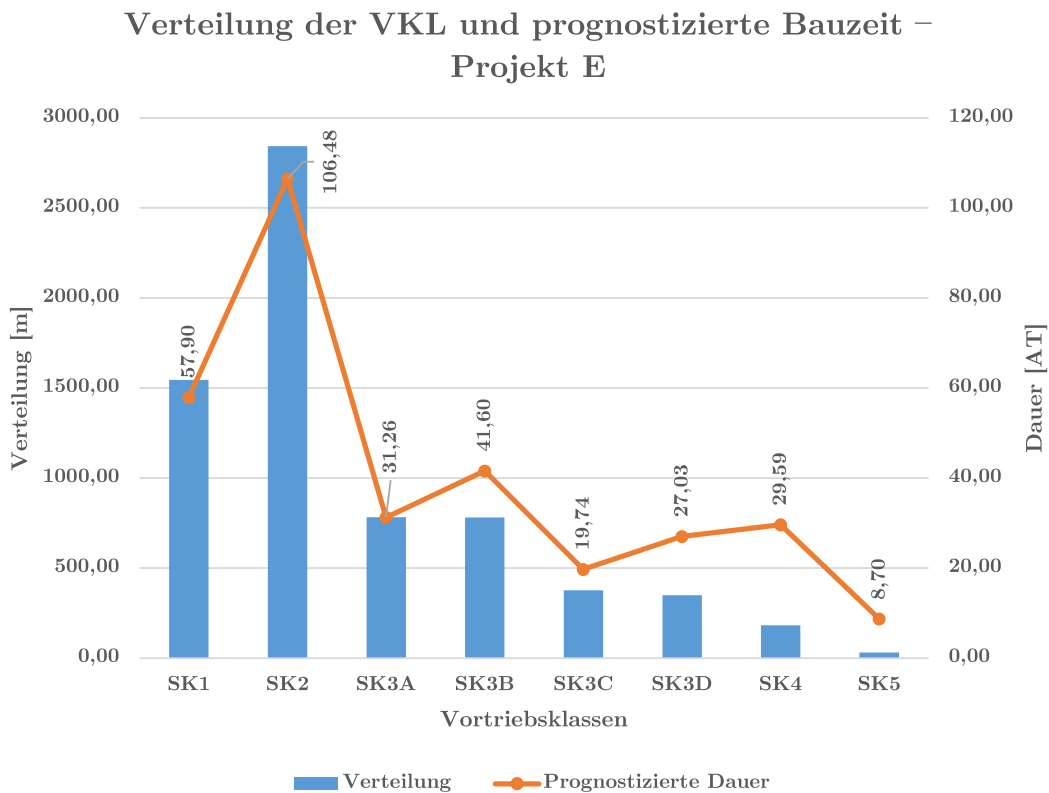


Abb. 4.13: Vortriebsklassenverteilung und prognostizierte Dauer (Soll) – Projekt E

- Bohren und Spülen von Injektions- und Kontrolllöchern
- Mobilisierung und Demobilisierung zum Verpressen
- Positionierung von Packer
- Injektionsarbeiten
- Leckagemessungen

Diese Leistungen sind in der Ausschreibung mit einer prognostizierten Menge durch den AG versehen. Der Bieter hat folglich einen Leistungswert für jede Tätigkeit bekannt zu geben, wodurch sich eine Ausführungsdauer ergibt. Für die Gesamtheit dieser Leistungsgruppe errechnet sich laut Angaben des AN eine Dauer von 91,21 Arbeitstagen, diese ist in Abb. 4.14 dargestellt.

Zusatzzeiten Tunnelausbruch

Die dritte Leistungsgruppe beinhaltet Arbeiten, welche im Zuge des Tunnelausbruches neben dem Regelvortrieb anfallen. Darunter fließen vor allem Zusatzzeiten bedingt durch Wasserspenden, Neigung des Tunnels, Stillstände der TBM-O und erschwerte Bedingungen beim Bohren ein. Eine Übersicht der definierten Zusatzzeiten des Tunnelausbruches, welche am kritischen Weg zu liegen kommen, wird im Folgenden gegeben:

- Bohren bergab
- Wasserspende beim Bohren – bergauf, 10 – 20 l/s
- Wasserspende beim Bohren – bergab, 5 – 10 l/s

- Wasserspende beim Bohren – bergab, 10 – 20 l/s
- Stillstand TBM: 0,50 Stunden – 1 Schicht
- Stillstand TBM: 1 – 2 Schichten
- Stillstand TBM: >2 Schichten
- TBM-Überhitzung
- Beginn des Vollprofilbohrens
- Bohren beim Durchschlag
- Durchschlag
- TBM-Wartung
- TBM-Einschränkungen (Nachtbohrverbot)
- Entschädigung für Bohren mit geringem Bruch

Auch hier waren die Ausschreibungsmengen des AG vom Bieter mit einem Leistungswert zu versehen. Für die Zusatzzeiten des Tunnelausbruches errechnen sich insgesamt 15,85 AT an kritischer Bauzeit.

Abgänge

Wie eingangs erwähnt, werden bei diesem Projekt die Abgänge im Vorfeld definiert. Über die angegebenen Leistungen des AN können dadurch 104,95 KT an Wochenendabgängen und 55,00 KT an norwegischen Feiertagen errechnet werden.

Zusammenstellung

In Abb. 4.14 werden die kalkulierten Vorgänge einander gegenüber gestellt. Den weit aus größten Anteil nimmt der Regelvortrieb nach Vortriebsklassen mit 322,29 AT in Anspruch. Dies entspricht einem Anteil von 54,69 % an der Gesamtdauer des Vortriebs. Anschließend liegen bereits die Abgangszeiten aus Wochenenden mit 104,95 KT, bzw. 17,81 %. Darauf folgen die Herstellungsarbeiten der Erkundungs- und Kernbohrungen beziehungsweise deren Verpressen mit 91,21 AT oder 15,48 %. Die 55 norwegischen Feiertage im Verlauf der Bauzeit entsprechen einem Prozentsatz von 9,33 %. Den geringsten Anteil mit 2,69 % an der Gesamtdauer, welche 15,85 AT entsprechen, nehmen die Zusatzzeiten des Tunnelausbruches in Anspruch.

Bauzeitplanung

Für Projekt E erfolgt die Darstellung der Bauzeit in Arbeitstagen und Kalendertagen. In Abb. 4.15 werden die kumulierten Vortriebsklassen angegeben, daraus ergeben sich rund 322 AT. Anschließend sind Zeiten für Bohrungen und Verpressen, sowie die Zusatzzeiten Tunnelausbruch hinzu gezählt, wodurch sich die reine Bauzeit von ca. 429 AT ergibt. Für den 6.893 m langen Tunnelausbruch wird eine mittlere Vortriebsleistung von 16,05 m/AT kalkuliert. Werden die Abgänge hinzu gerechnet, resultiert eine Baudauer von ungefähr 589 KT. Daraus ergibt sich eine mittlere Leistung von 11,70 m/KT an Tunnelvortrieb.

Kalkulierter Zeitbedarf je Vorgang – Projekt E

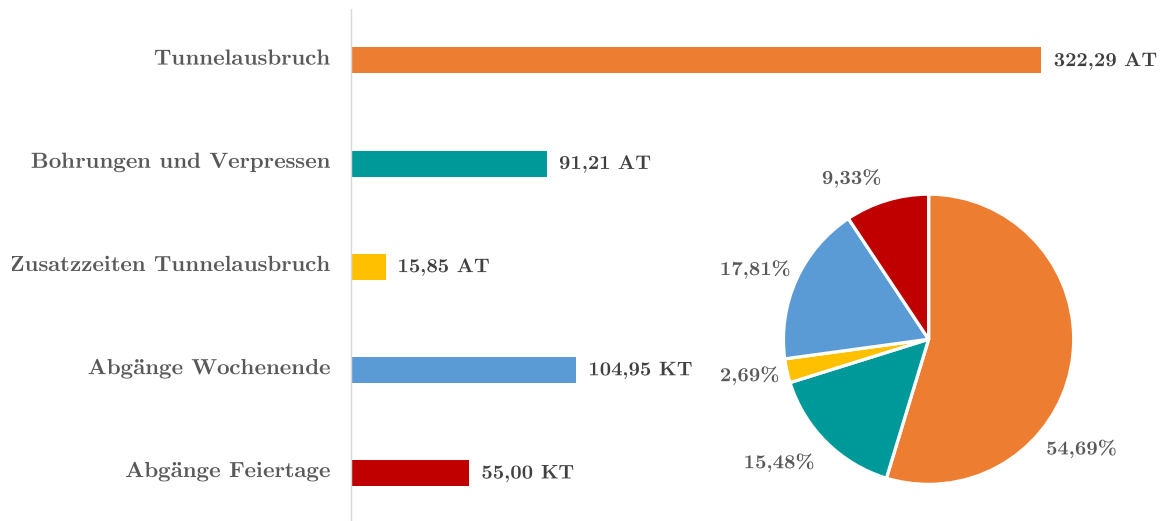


Abb. 4.14: Kalkulierter Zeitbedarf je Vorgang (Soll) – Projekt E

Bauzeitermittlung in der Kalkulation – Projekt E

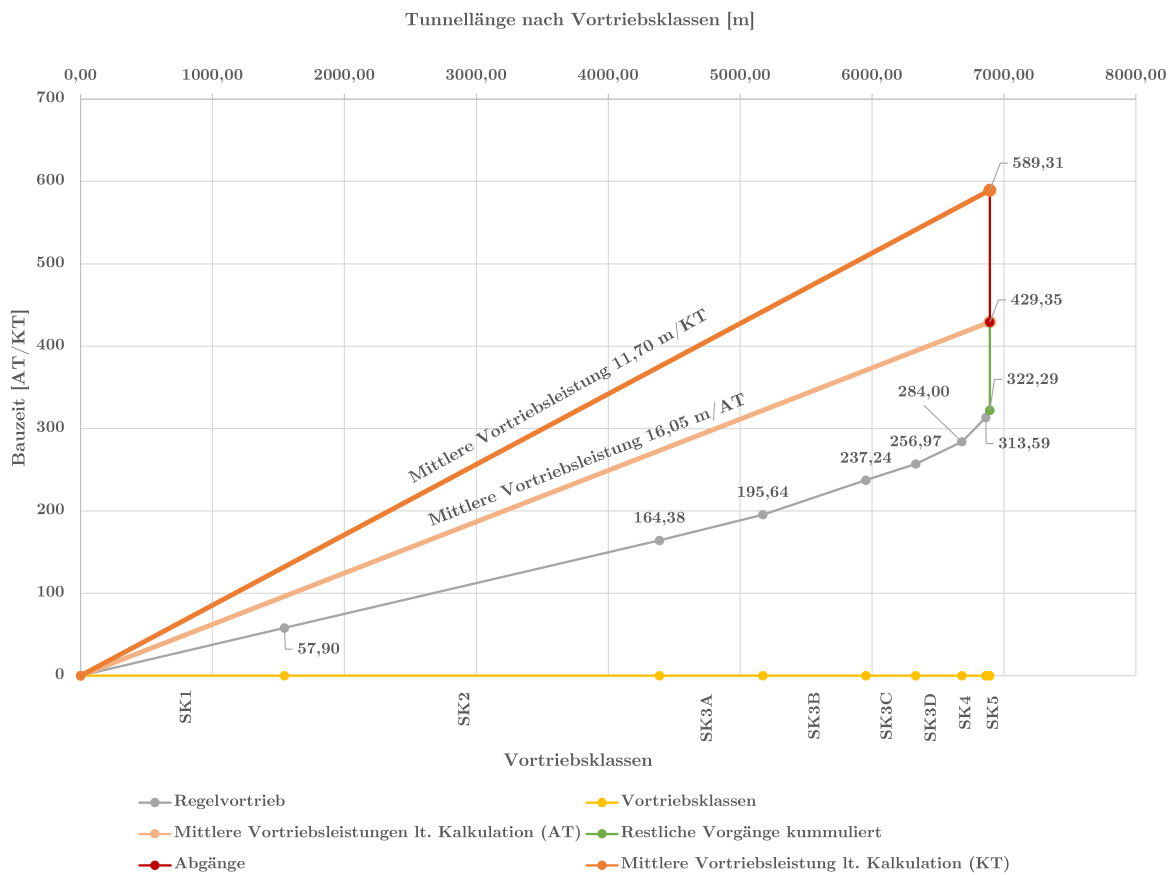


Abb. 4.15: Bauzeitermittlung laut Ausschreibung und Kalkulation (Soll) – Projekt E

4.6 Vortriebskalkulation – Projekt F

Den Angaben in diesem Abschnitt liegen die übergebenen Daten im Rahmen dieser Diplomarbeit [14] zu Grunde. In diesem Kapitel wird die Baseline-Bildung von Projekt F analysiert. Wesentlicher Parameter für die Klassifizierung der Vortriebsleistung ist die Rock Mass Rating (RMR). Diese wurde anhand von Bohrprofilen stichprobenartig im Verlauf des zukünftigen Tunnels bestimmt, und ist in *Projekt F – Contracting Principles for Tunnelling – TBM Advance Baselines* [11] festgelegt. Auf dieser Basis konnte der Bieter für die Klassen 1 – 5 eine Vortriebsleistung kalkulieren. In Tab. 4.4 wird auf diese RMR-Klassen eingegangen. Die Klassen 1 und 2 weisen sehr hohe Vortriebsleistungen von 34,10 m/AT auf. Klasse 3 liegt immer noch bei 33,70 m/AT. Die Klasse 4 liegt deutlich schlechter bei 9,90 m/AT, in Klasse 5 werden lediglich 4,50 m Tunnel pro Arbeitstag vorangetrieben. Die Tabelle gibt einerseits die Gesamtprognose für den Tunnel wieder, andererseits nur jene für Teil 1, welcher in dieser Diplomarbeit analysiert wird. Die Gesamtlänge des zweiteiligen Tunnels beträgt 12.612,00 m. Auf Teil 1 entfallen dabei 7.490,00 m, also knapp 60 % der Gesamtlänge. Der Anteil gibt jeweils die entsprechende RMR-Klasse am Gesamtprojekt beziehungsweise Projektteil wieder. In beiden Fällen erreicht Klasse 2 den größten Anteil mit 41 % bzw. 45 %. Den geringsten Anteil weist Klasse 5 mit 3 % bzw. 4 % auf. Mit Hilfe des prozentualen Anteils können die Längen je RMR-Klasse prognostiziert werden. Dividiert man diese durch die Vortriebsleistung, erhält man eine prognostizierte Dauer je Klasse. Außerdem wird eine Zeitdauer für den Einarbeitungseffekt im Sinne einer Lernkurve angegeben. Diese ist mit zusätzlichen 15 AT beziffert. Die Einarbeitungszeit wird vollständig dem ersten Teil des Tunnelvortriebs zugeschrieben. Für die gesamten Vortriebsarbeiten des Tunnels errechnet sich ein

Tab. 4.4: Vortriebsleistung, Vortriebsverteilung und prognostizierte Dauer (Soll) – Projekt F, Teil 1

| Klasse | Vortriebsleistung [m/d] | Gesamt | | | Teil 1 | | |
|-----------|----------------------------|-----------------|--------------|---------------|-----------------|--------------|---------------|
| | | Anteil [-] | Länge [m] | Dauer [AT] | Anteil [-] | Länge [m] | Dauer [AT] |
| Klasse 1 | 34,10 | 0,15 | 1.909,70 | 56,00 | 0,16 | 1.202,08 | 35,25 |
| Klasse 2 | 34,10 | 0,41 | 5.162,03 | 151,38 | 0,45 | 3.406,80 | 99,91 |
| Klasse 3 | 33,70 | 0,26 | 3.338,17 | 99,06 | 0,25 | 1.871,99 | 55,55 |
| Klasse 4 | 9,90 | 0,14 | 1.782,99 | 180,10 | 0,10 | 719,64 | 72,69 |
| Klasse 5 | 4,50 | 0,03 | 419,12 | 93,14 | 0,04 | 289,50 | 64,33 |
| Lernkurve | | | | 15,00 | | | 15,00 |
| Summe | | 1,00 | 12.612,00 | 594,68 | 1,00 | 7.490,00 | 342,73 |

Zeitraum von 594,68 Arbeitstagen. Auf den ersten Tunnelteil entfallen dabei 342,73 Arbeitstage, für Teil 2 werden 251,95 AT kalkuliert. In Abb. 4.16 sind die kalkulierten Vortriebsleistungen entsprechend der RMR-Klassen graphisch veranschaulicht. Abb. 4.17 zeigt die ausgeschriebenen Längen der RMR-Klassen für den ersten Teil des Projektes. Außerdem ist die prognostizierte Bauzeit veranschaulicht. Klasse 2 weist die größte Länge und auch Bauzeit mit prognostizierten 99,91 AT auf. Obwohl die Klassen 1 und 3 deutlich größere Längen als die Klassen 4 und 5 aufweisen, sind sie auf Grund ihrer hohen Vortriebsleistung zeitlich von kürzerer Dauer. Der Vortrieb in Klasse 4 nimmt 72,69 AT in Anspruch, dicht gefolgt von Klasse 5 mit 64,33 AT.

In Abb. 4.18 sind die drei Hauptvorgänge des Tunnelvortriebs einander gegenüber gestellt. Der Regelvortrieb im Ausmaß von 328 AT hat einen Anteil von 88,40 % an der Vortriebszeit.

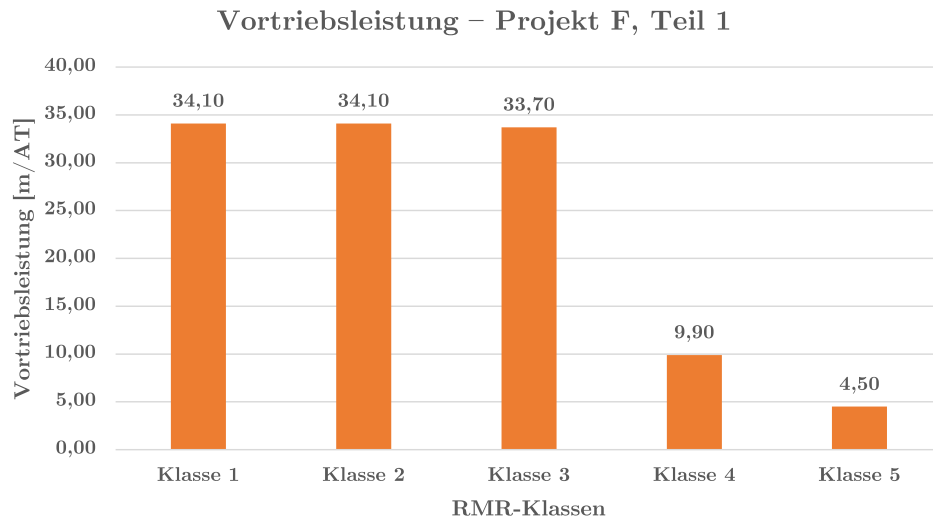


Abb. 4.16: Vortriebsleistung entsprechend Klassen (Soll) – Projekt F, Teil 1

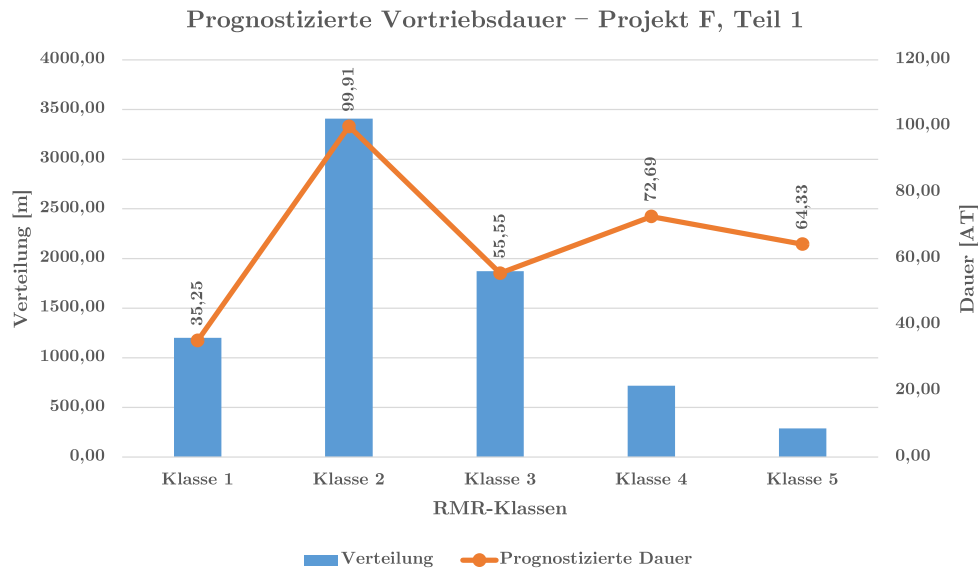


Abb. 4.17: Vortriebsklassenverteilung und prognostizierte Dauer (Soll) – Projekt F, Teil 1

Die Einarbeitung mit 15 AT nimmt 4,05 % ein. Zusätzlich sind für den Bauzeitverlauf 28 KT als israelische Feiertage ausgewiesen, diese Abgangszeiten nehmen 7,55 % der Gesamtbauzeit ein.

Die Bauzeitberechnung im Rahmen der Baseline wird von *Projekt F – TBM-Advance Analysis* [13] übernommen und ist in Abb. 4.19 dargestellt. Dabei haben die zwei orangen Bauzeitlinien folgende Bedeutung:

Hellorange Linie Stellt den Verlauf der kalkulierten Bauzeit in reinen Arbeitstagen dar. Dies entspricht den oben angeführten 342,73 AT.

Dunkelorange Linie Stellt den Verlauf der kalkulierten Bauzeit in Kalendertagen, das heißt Arbeitstage und Abgänge, dar. Die berechneten Feiertage für dieses Projekt belaufen sich auf 28 KT. Für die Gesamtvortriebsdauer errechnen sich somit ca. 371 Kalendertage.

Zusätzlich wird der oben beschriebene Regelvortrieb entsprechend RMR-Klassen über Länge und Dauer kumuliert. Daraus ergeben sich im Bauzeitplan 327,73 AT. Zuzüglich der restlichen

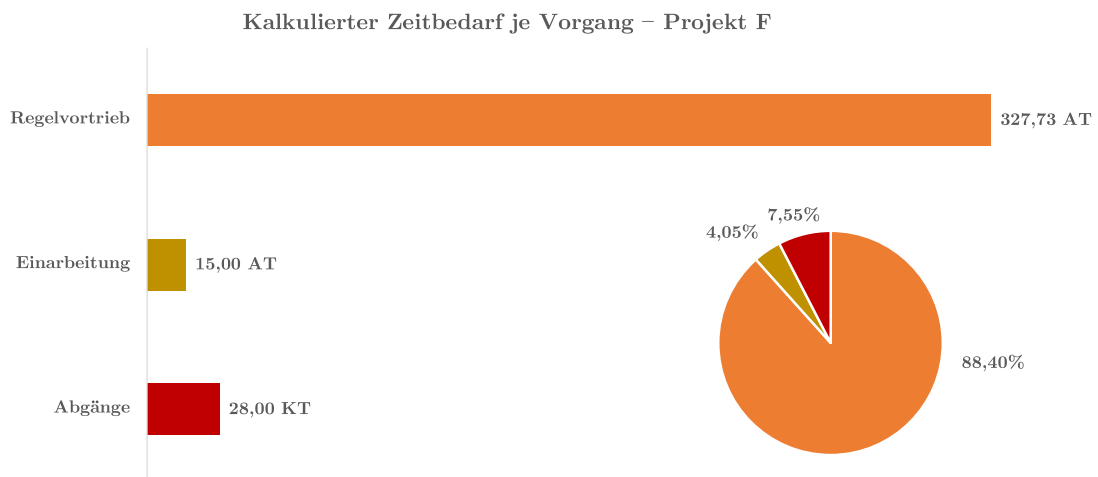


Abb. 4.18: Kalkulierter Zeitbedarf je Vorgang (Soll) – Projekt F, Teil 1

Zeitbewertungen in Arbeitstagen, was in diesem Falle nur der Lernkurve entspricht, klettert die Bauzeit auf 342,73 AT. Werden weiters auch die Abgänge berücksichtigt, ergibt sich eine Gesamtbauzeit von 370,73 KT.

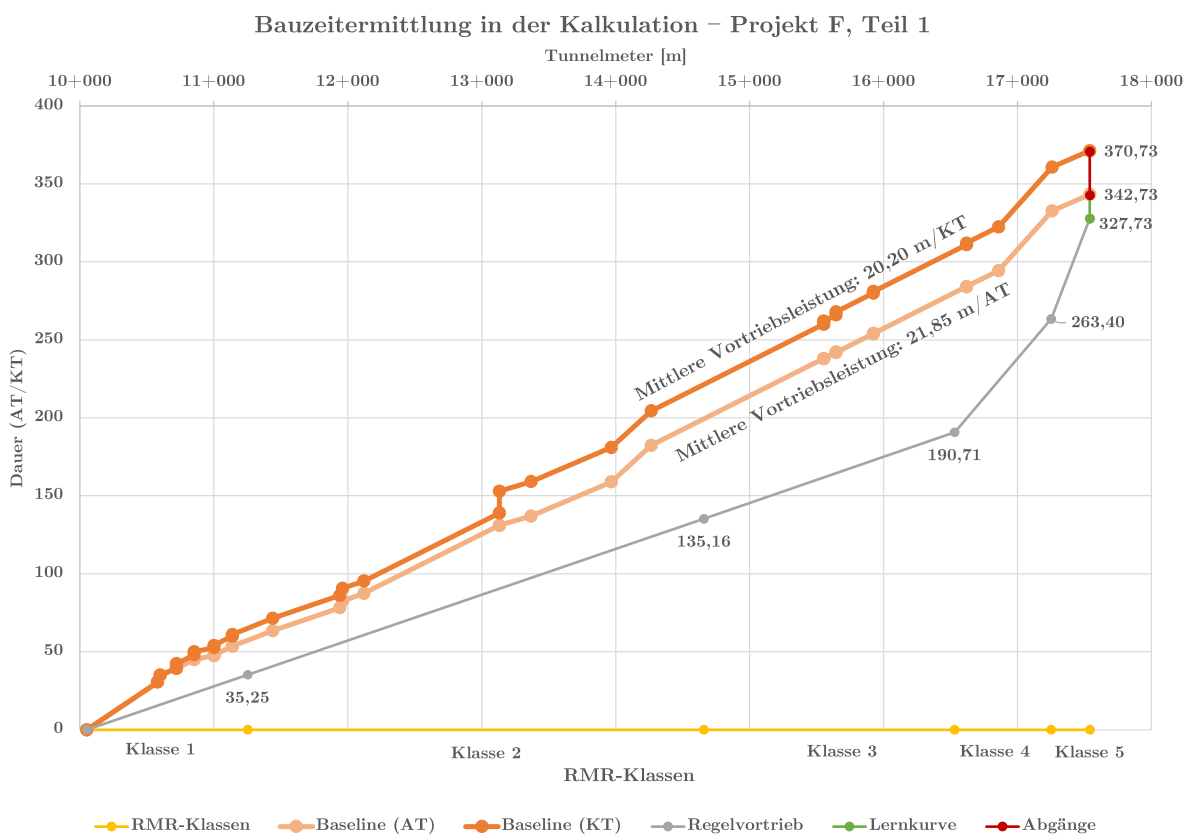


Abb. 4.19: Bauzeitermittlung laut Ausschreibung und Kalkulation (Soll) – Projekt F, Teil 1

Für die mittleren Vortriebsleistungen des 7.490,00 m langen Tunnels ergeben sich aus den berechneten Bauzeiten 21,85 m/AT beziehungsweise 20,20 m/KT.

4.7 Gegenüberstellung Ausschreibung/Kalkulation

Für dieses Kapitel wird ebenfalls ein abschließender Überblick gegeben. Tab. 4.5 zeigt die Gegenüberstellung der analysierten Projekte. Für drei Vortriebe werden die Ausschreibungsunterlagen auf Basis der vertraglich vereinbarten *ÖNORMEN* erstellt. Für diese Vortriebe wird die Bauzeit in Kalendertagen angegeben. Die restlichen Projekte basieren entweder auf den Normen der jeweiligen Länder, in denen diese errichtet werden, oder entstammen nicht öffentlichen österreichischen Auftraggebern, für welche die *ÖNORMEN* nicht verbindlich sind. Für jeden Vortrieb wird außerdem eine kalkulierte mittlere Vortriebsleistung unter Einbezug aller ausgeschriebenen Vorgänge wiedergegeben.

Tab. 4.5: Gegenüberstellung der analysierten Projekte in der Phase Ausschreibung/Kalkulation

| Projektgegenüberstellung | <i>ÖNORMEN</i> vereinbart | Bauzeit | mittlere Vortriebsleistung |
|--------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Projekt A, Vortrieb 1 | X | siehe <i>Forschungsbericht</i> [15] | |
| Projekt A, Vortrieb 2 | X | siehe <i>Forschungsbericht</i> [15] | |
| Projekt B, TVM Süd | | 795,52 AT | 16,00 m/AT |
| Projekt B, TVM Nord | | 558,76 AT | 16,00 m/AT |
| Projekt C | X | siehe <i>Forschungsbericht</i> [15] | |
| Projekt D | | 183,00 AT | 34,18 m/AT |
| Projekt E | | 429,35 AT | 16,05 m/AT |
| Projekt F, Teil 1 | | 342,73 AT | 21,85 m/AT |

Kapitel 5

Bestimmung projektspezifischer Vortriebsleistungen mittels Datenanalyse der Bauausführung

In diesem Kapitel werden die Leistungen während oder nach der Bauausführung analysiert, dies entspricht dem **Ist**. Es sollen der tatsächliche Bauzeitverlauf und, wenn möglich, die abgerechnete Bauzeit wiedergegeben werden. Diese Bauzeiten sind passend zu den Vorgängen aus Kapitel 4 aufbereitet, um sie vergleichbar zu machen. Der Analyseprozess ist dabei stark abhängig vom Detaillierungsgrad der übergebenen Daten und dem Projektfortschritt selbst. So können einzelne Projekte auf den Hub genau durchgearbeitet und aufbereitet werden, für andere ist nur eine tageweise Betrachtung möglich. Im Laufe des Projektes ergeben sich eine Vielzahl von Bedingungen, die von der Ausschreibung abweichen. Im Endeffekt sind diese Änderungen über Mehr- oder Minderkostenvereinbarungen zwischen AG und AN zu lösen. Um die Projekte dieser Arbeit ganzheitlich analysieren zu können, werden diese Vereinbarungen berücksichtigt, sofern sie vorliegen. Diese Diplomarbeit stellt dabei den reinen Zeitwert an Arbeits- bzw. Kalendertagen auf (Vorhalten von Baustelleneinrichtung, Personal und Maschinen), dies entspricht keiner Bewertung in Geldmittel. Mehr- oder Minderkosten der Bauverfahren, zum Beispiel erhöhter Bedarf an Spritzbeton, sind in diesen Zeitbewertungen demnach nicht umgelegt. Hinsichtlich der Analyseprojekte gilt folgender Grundsatz:

Projekte aus Österreich: Analyseprojekte aus Österreich (Projekt A – Projekt C) beziehen sich auf Bauzeiten, welche aus den vertraglichen Grundlagen errechnet werden können. Außerdem sind hier die Forderungen von Mehr- und Minderbedarf an Bauzeit in Form von *zusätzlichen Erschwernissen* enthalten. Bei einzelnen Projekten sind die Verhandlungen betreffend gesamt abzurechnender Bauzeit noch nicht abgeschlossen, in dieser Diplomarbeit werden deshalb die aktuellen Gegebenheiten angeführt. Die Bauzeit kann somit als vorläufig abgerechnete Bauzeit angesehen werden.

Internationale Projekte: Für die restlichen Projekte (Projekt D – Projekt F) wird zur Bewertung von *zusätzlichen Erschwernissen* die tatsächliche Bauzeit (Ist) herangezogen. Der Mehr- bzw. Minderbedarf an Bauzeit bezieht sich auf die Ist-Auswertung der TVM-Daten. Dieser Zeitbedarf stellt nicht die abgerechnete Bauzeit dar.

5.1 Benötigte Bauzeit – Projekt A

Die Auswertung des gegenständlichen Projektes beruht auf den Datenaufzeichnungen des AN und dessen vorläufiger Abrechnung inklusive der Nachträge zur Bauzeitverminderung bzw. -erhöhung. Als Grundlage dienen die übergebenen Daten im Rahmen der Diplomarbeit [6]. Einerseits wird dabei die tatsächliche Vortriebsklassenverteilung mit Hilfe von Aufzeichnungen aus dem Bauverlauf analysiert. Andererseits erfolgt eine genaue Auswertung der Vortriebscodes beider

DSM. Der tatsächliche Bauverlauf ist von den TVMs in Form eines Zyklusdiagramms Hub für Hub aufgezeichnet. Dabei werden die Arbeitsschritte, welche während eines Hubzyklus vorkommen, ihrem jeweiligen Code mit einer Dauer in Minuten zugewiesen. Unterteilt wird der Code in kritische Minuten, unkritische Minuten und die Summe der beiden. Der Abrechnung liegen die vertraglich vereinbarten Leistungswerte der Vortriebsklassen aus der Kalkulation zugrunde. Mit diesen, und den folgenden aufgezeichneten Gegebenheiten, wird eine Ist-Bauzeit ermittelt:

- tatsächliche Längen und Verteilung der Vortriebsklassen
- aufgetretene Wassererschwernisse nach Länge
- aufgetretene erhöhte einachsiale Druckfestigkeit nach Länge
- Vortriebsunterbrechungen
- Vortriebsstillliegen
- tatsächliche Zusatz- und Festzeiten
- Stillliegezeiten aus Abgängen
- Erlöse aus der Einarbeitung
- Prozessaufzeichnungen der DSM

Die Analysen zu diesem Abschnitt sind nicht in dieser Diplomarbeit veröffentlicht. Sie sind in *Forschungsbericht – Leistungsanalyse ausgewählter Projekte im maschinellen Tunnelbau* [15], ausgearbeitet durch Bender und Bisenberger, enthalten.

5.2 Benötigte Bauzeit – Projekt B

Der Datenanalyse für Projekt B liegen zwei Dokumente zu Grunde. Einerseits die *Vortriebsdokumentation – Projekt B* der Bernard Ingenieure ZT GmbH [16] (ÖBA), andererseits die *Vortriebsmeldungen – Projekt B* der Ausführende Unternehmen Projekt B [7] (AN). Die Vortriebsdokumentation nimmt Bezug auf den Ringbau der DSM, in dieser sind folgende Parameter dokumentiert:

- Datum (ohne Uhrzeit)
- Tunnelmeter
- Ringnummer
- Tübbingeinbau (Nummer, Position, Freigabe)
- Abstichmaß der Tübbinge
- Sohlmörteleinbringung
- Konformitätsprüfungen
- Perlkiesverblasung
- Bergwasserzutritt
- Ortsbruststabilität

- Blockigkeit

In den Vortriebsmeldungen des AN wird eher auf die Ausbruchsleistung der DSM eingegangen, hier finden sich diese Parameter wieder:

- Datum (entspricht einer Bauzeit von 24 Stunden je Kalendertag)
- Stationierung in Tunnelmeter (von – bis)
- Soll-Leistung
- Ist-Leistung
- Leistungsdifferenz
- Vortriebsstand in Prozent der Gesamtlänge
- verbale Beschreibung der Vorkommnisse während des gesamten Kalendertages

Aus diesen zwei Dokumenten konnte eine grundlegende Datenanalyse der Bauausführung vollzogen werden. Leider liegen im gegenständlichen Projekt noch keine Vortriebsdaten der DSM vor, wodurch eine Prozessanalyse nicht möglich ist. Es liegt auch keine Dokumentation der Vortriebsklassen und der Wassererschwernisse vor.

5.2.1 Ausführung TVM Süd

Die Berechnungen des tatsächlichen Zeitbedarfs stützen sich auf die Vortriebsprotokolle des AN. In Abb. 5.1 sind die einzelnen Vorgänge mit ihrem jeweiligen Zeitbedarf angegeben. Der

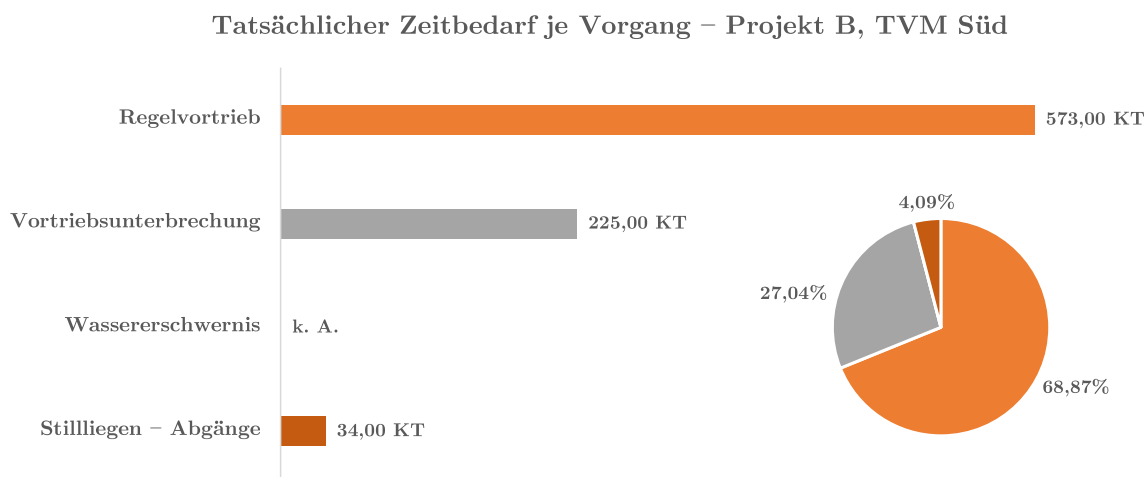


Abb. 5.1: Tatsächlicher Zeitbedarf je Vorgang (Ist) – Projekt B, TVM Süd

Regelvortrieb aus TVM Süd nimmt insgesamt 573 Kalendertage in Anspruch. Dies entspricht einem prozentualen Anteil von 68,87 % am Gesamtvortrieb. Die Vortriebsunterbrechungen ergeben einen Zeitraum von 225 Kalendertagen, was einem Anteil von 27,04 % entspricht. Für zusätzlichen Zeitbedarf durch Wassererschwernisse können keine Angaben gemacht werden. Den dritten Teil des 832 Kalendertage andauernden Vortriebs nehmen die Abgangszeiten ein. Aus drei Osterabgängen zu jeweils 4 KT und zwei Weihnachtsabgängen zu 10 KT und 12 KT, ergibt sich eine Gesamtdauer dieses Vorganges von 34 Kalendertagen. Die Abgänge nehmen 4,09 % des Gesamtvortriebs ein. In Abb. 5.2 werden der tatsächliche Bauzeitverlauf (rotbraune Linie)

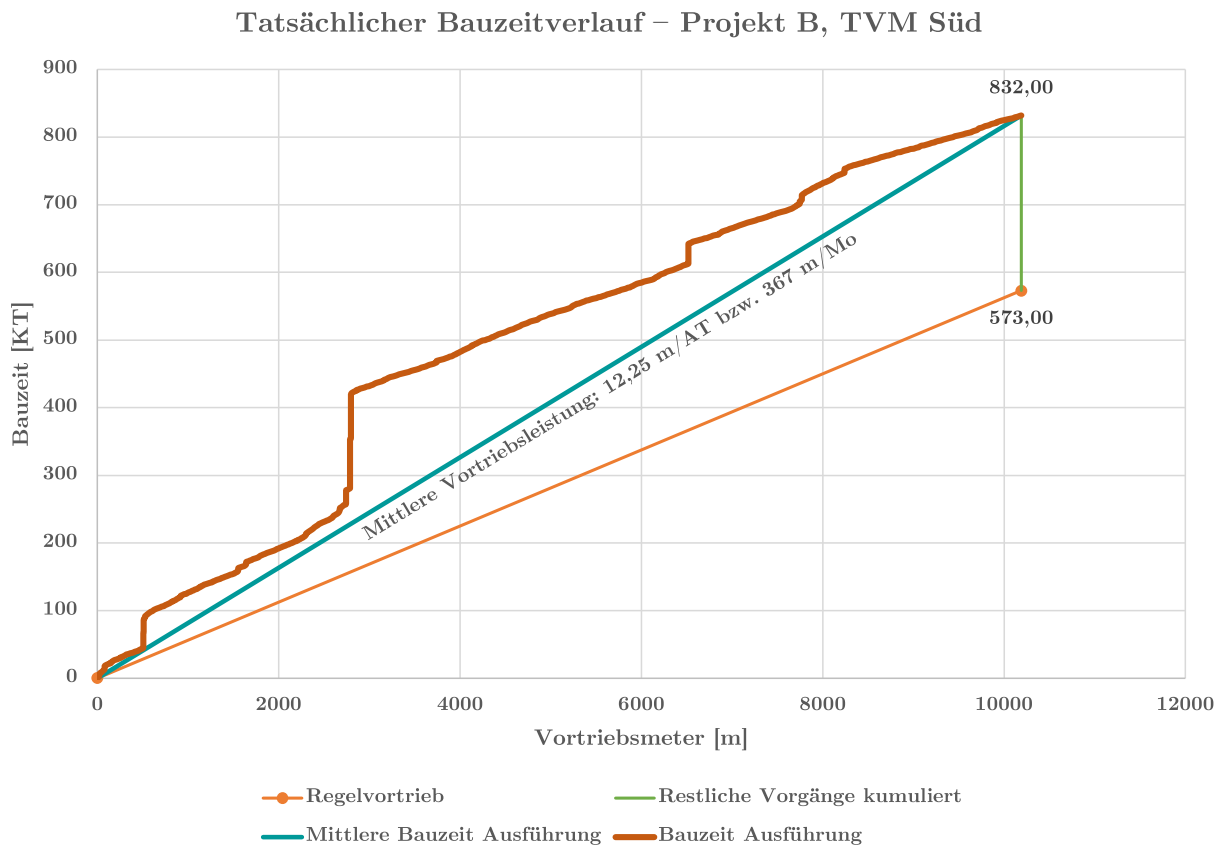


Abb. 5.2: Tatsächlicher Bauzeitverlauf (Ist) – Projekt B, TVM Süd

und die mittlere Bauzeit (blaugrüne Linie) dargestellt. Zum Regelvortrieb mit 573 KT werden die restlichen Vorgänge hinzu gefügt, wodurch sich die Bauzeit mit 832 Kalendertagen ergibt. Der Gesamtvortrieb mit DSM weist in der Bauausführung eine Länge von 10.190,79 m auf, in der Kalkulation ist für die TVM-Süd eine Vortriebslänge von 12.728,24 m vorgesehen. Es ergibt sich eine Längendifferenz von 2.537,45 m, welche im Sprengvortrieb ausgebrochen ist. Für die benötigten Kalendertage und die Tunnellänge des kontinuierlichen Vortriebs ergibt sich eine mittlere Vortriebsleistung von 12,25 m/AT beziehungsweise 367 m/Mo. Im tatsächlichen Bauzeitverlauf der Ausführung erkennt man deutlich drei große Vortriebsunterbrechungen an folgenden Stationierungen:

- Station 507,70 m: 38 KT
- Station 2.740,49 m: 141 KT – hinzu kommen im Diagramm 10 KT Weihnachtsabgang und 4 KT Osterabgang
- Station 6.520,10 m: 17 KT – hinzu kommen im Diagramm 12 KT Weihnachtsabgang

Auf die erreichten Regelvortriebsleistungen wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

5.2.2 Ausführung TVM Nord

Im Nordvortrieb werden die Berechnungen ebenfalls auf Basis der Vortriebsprotokolle des AN durchgeführt. Die einzelnen Vorgänge sind in Abb. 5.3 gegenübergestellt. Vor Beginn der Vor-

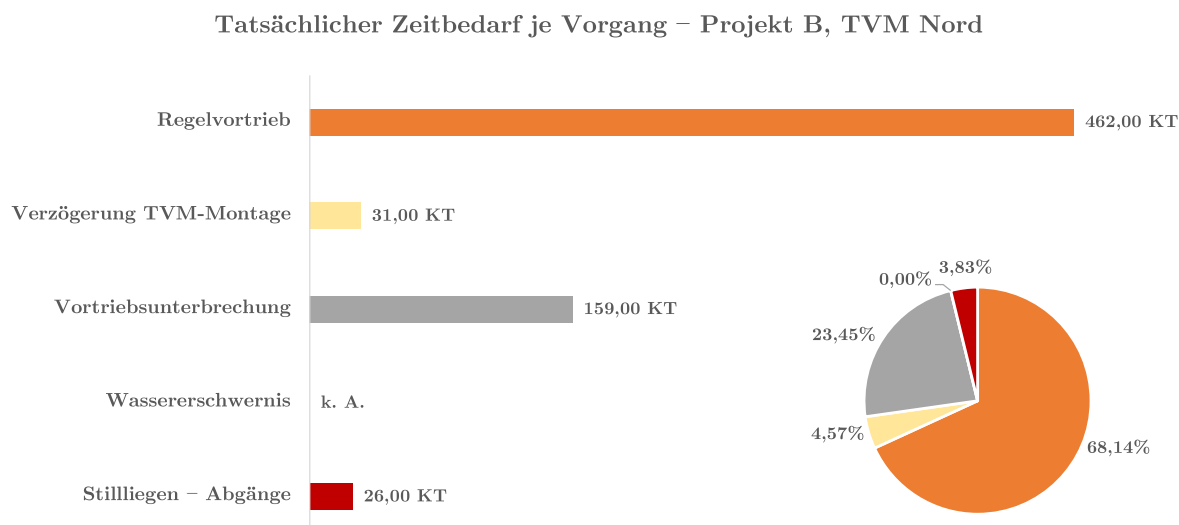


Abb. 5.3: Tatsächlicher Zeitbedarf je Vorgang (Ist) – Projekt B, TVM Nord

triebsarbeiten liegt eine Verzögerung durch eine Verlängerung der TVM-Montagezeit. Diese hat ein Ausmaß von 31 KT, wodurch sich der Vortriebsbeginn um einen Monat nach hinten verschiebt. Die Verzögerung wird deshalb als einzelner Vorgang ausgewiesen, da sie die Gesamtvortriebsdauer erhöht, jedoch nicht als Vortriebsunterbrechung beziehungsweise Abgang im laufenden Vortrieb klassifiziert werden kann. Ihr Anteil liegt bei 4,57 % an der Gesamtvortriebsdauer. Die Regelvortriebsarbeiten der TVM-Nord nehmen 462 KT in Anspruch. Es handelt sich auch bei diesem Projekt um den deutlich längsten Vorgang, auf ihn entfallen 68,34 % der Vortriebsdauer. Die Vortriebsunterbrechungen haben eine Gesamtdauer von 159 KT, ihr Anteil liegt bei 23,45 %. Die Erschwernisse durch eindringendes Bergwasser sind nicht ausweisbar. Zuletzt nehmen Abgänge von der Baustelle einen Zeitraum von 26 KT ein. Diese setzen sich aus zwei Weihnachtsabgängen zu 10 KT, beziehungsweise 12 KT und einem Osterabgang zu 4 KT zusammen. Der Anteil an der Gesamtbauzeit beträgt 3,83 %. In Abb. 5.4 wird wieder der tatsächliche Bauzeitverlauf als rotbraune Linie dargestellt. Die blaugrüne Linie entspricht einer linearen mittleren Bauzeitdarstellung. Zu Beginn bei Vortriebsmeter 0 werden die 31 KT an zusätzlicher Montagezeit verbraucht. Anschließend beginnen die Vortriebsarbeiten. Nach vollendetem Regelvortrieb erreicht die Darstellung einen Wert von 493 KT. Zu diesen werden die Vortriebsunterbrechungen und Abgänge hinzugezogen, wodurch sich der Gesamtwert von 678 Kalendertagen ergibt. Ohne die Verzögerung zu Beginn resultiert eine reine Bauzeit von 647 KT über eine Tunnellänge von 7.790 m. Dies entspricht einer mittleren Vortriebsleistung in der Ausführung von 12,04 m/KT beziehungsweise 361 m/Mo. Hier ergeben sich vier Unregelmäßigkeiten im Bauzeitverlauf. Diese haben folgende Stationierungen und Unterbrechungszeiten:

- Station 2.519,07 m: 51 KT – hinzu kommen im Diagramm 10 KT Weihnachtsabgang
- Station 2.776,10 m: 66 KT – hinzu kommen im Diagramm 4 KT Osterabgang
- Station 4.190,07 m und 4245,44 m: 7 KT und 7 KT
- Station 6.130,34 m: 5 KT – hinzu kommen im Diagramm 12 KT Weihnachtsabgang

Auf die erreichten Regelvortriebsleistungen im Nord-Vortrieb wird ebenfalls in Kapitel 6 näher eingegangen.

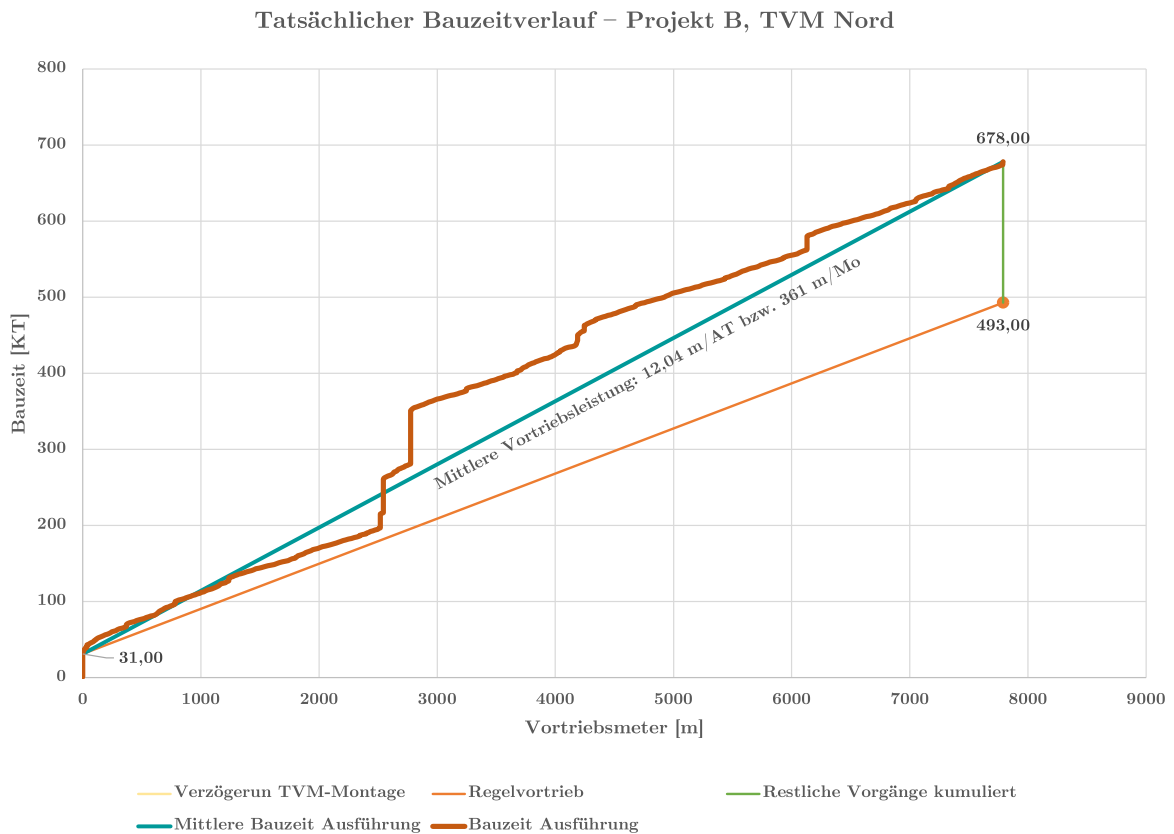


Abb. 5.4: Tatsächlicher Bauzeitverlauf (Ist) – Projekt B, TVM Nord

5.3 Benötigte Bauzeit – Projekt C

Die Auswertungen in diesem Abschnitt basieren auf den im Rahmen dieser Diplomarbeit übergebenen Daten [8]. Die Daten enthalten Aufzeichnungen zu:

- tatsächliche Längen und Verteilung der Vortriebsklassen
- aufgetretene Erschwernisse nach Länge oder Anzahl
- Vortriebsunterbrechungen
- Vortriebsstillliegen
- tatsächliche Zusatz- und Festzeiten
- Stilliegezeiten aus Abgängen
- Erlöse aus der Einarbeitung
- Prozessaufzeichnungen der TBM-O

Die Analysen zu diesem Abschnitt werden ebenfalls in *Forschungsbericht – Leistungsanalyse ausgewählter Projekte im maschinellen Tunnelbau* [15] veranschaulicht.

5.4 Benötigte Bauzeit – Projekt D

Für die Analyse der Bauausführung werden Abrechnungs- und Maschinendaten [9] kombiniert ausgewertet, diese sind im Rahmen der Diplomarbeit übergeben worden. Die Bauzeit setzt sich zusammen aus Regelvortrieb, lokale Erschwernisse und Ereignisse, kontinuierliche Erschwernisse und den Abgängen von der Baustelle.

Regelvortrieb

Für den Regelvortrieb werden in Abb. 5.5 die tatsächlichen Abschnittslängen dargestellt. Außer in den Abschnitten Onshore 1 und Onshore 3 ergeben sich nur geringfügige Abweichungen. Die Differenz in Onshore 1 beruht auf einer größeren Ausbruchslänge mittels Sprengvortrieb in der TBM-Anfahrstrecke. Die Abweichung in Onshore 3 ergibt sich ebenfalls aus einer größeren Ausbruchslänge mittels Sprengvortrieb im CP-Schacht. Durch diesen Schacht muss die Maschine geschoben werden. In Tab. 4.2 ist die Verteilung der Vortriebsabschnitte entsprechend der Bau-

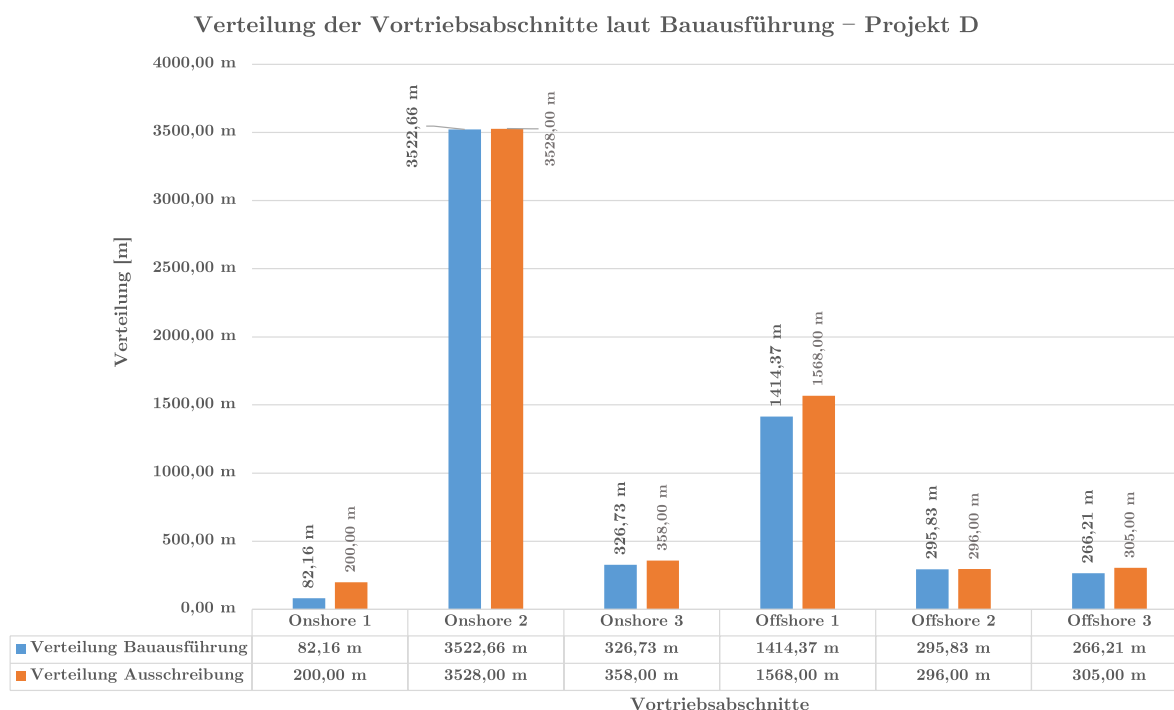


Abb. 5.5: Tatsächliche Verteilung der VKL (Ist) – Projekt D

ausführung angeführt. In Verbindung mit den Kalkulationsleistungen ergibt sich die Dauer des Regelvortriebes. Insgesamt resultieren daraus für eine Vortriebslänge von 5907,95 m 148 Arbeitstage. Zusätzlich wird auch die Länge des TBM-Verschubes mit 198,00 m angegeben. Für diese Strecke werden tatsächlich 24 AT benötigt, sie sind den lokalen Erschwernissen zugeschrieben.

Lokale Erschwernisse und Ereignisse

Im Rahmen des Vortriebes ergeben sich diverse Änderungen des Bauverlaufes und der geologischen Gegebenheiten im Vergleich zur Ausschreibung. Aus der Datenaufzeichnung der TBM-O können einige wichtige Erschwernisse bzw. Ereignisse herausgefiltert werden. Diese sind im Folgenden angegeben:

- Zusatzzeiten aus der TBM-Montage: 11,00 AT
- tatsächliche Einarbeitungsdauer im Abschnitt Onshore 1 (Lernkurve): 4,23 AT

Tab. 5.1: Vortriebsabschnitte und verrechenbare Dauer (Ist) – Projekt D

| Vortriebsabschnitte | Verteilung Bauausführung | Leistung Kalkulation | Dauer |
|----------------------|-----------------------------|-------------------------|--------|
| Onshore 1 | 82,16 | 24,27 | 3,39 |
| Onshore 2 | 3.522,66 | 41,85 | 84,18 |
| Onshore 3 | 326,73 | 41,85 | 7,81 |
| Offshore 1 | 1.414,37 | 37,56 | 37,66 |
| Offshore 2 | 295,83 | 37,56 | 7,88 |
| Offshore 3 | 266,21 | 37,56 | 7,09 |
| Verschub | 198,00 | | 24,02 |
| Summe Regelvortrieb | 5.907,95 | | 148,00 |
| Summe inkl. Verschub | 6.105,94 | | 172,02 |

- Installation einer California-Weiche im Abschnitt Onshore 2: 4,01 AT
- Verschub der TBM (bereits erwähnt): 24,02 AT

Diese Vorgänge umfassen eine Gesamtdauer von 43,26 AT.

Prozessauswertung

Mit den bisher genannten Vorgängen wird eine Bauzeit von 191,26 AT vergütet. Tatsächlich werden für den Tunnelvortrieb 347,48 AT benötigt. Daraus ergibt sich eine Differenz von 156,22 Arbeitstagen. Im gegenständlichen Unterkapitel erfolgt eine genauere Betrachtung der TBM-O-Daten, um diese Abweichung zu klassifizieren. Einerseits ergibt sich die hohe Differenz an Bauzeit aus Verformungen des bereits gesicherten Tunnels und aus einem Einsturz. Bei den Tunnelmetern 1.750 und 2.500 treten jeweils Verformungen des bereits gesicherten Tunnels auf, was die Prozesskette der bereits weiter vorangeschrittenen TBM-O jedoch verzögerte. Kurz vor dem Endtunnelmeter im letzten Abschnitt kommt es außerdem zu einem Wassereintritt, sodass der Vortrieb mittels TBM-O gestoppt wird. Diese Erschwernisse sind nicht direkt in der Vortriebsauswertung der TBM-O verzeichnet, da sie abgerückt von der Ortsbrust passierten. Andererseits führen kontinuierlich auftretende geologische Erschwernisse zu einer größeren Abweichung der Bauzeit.

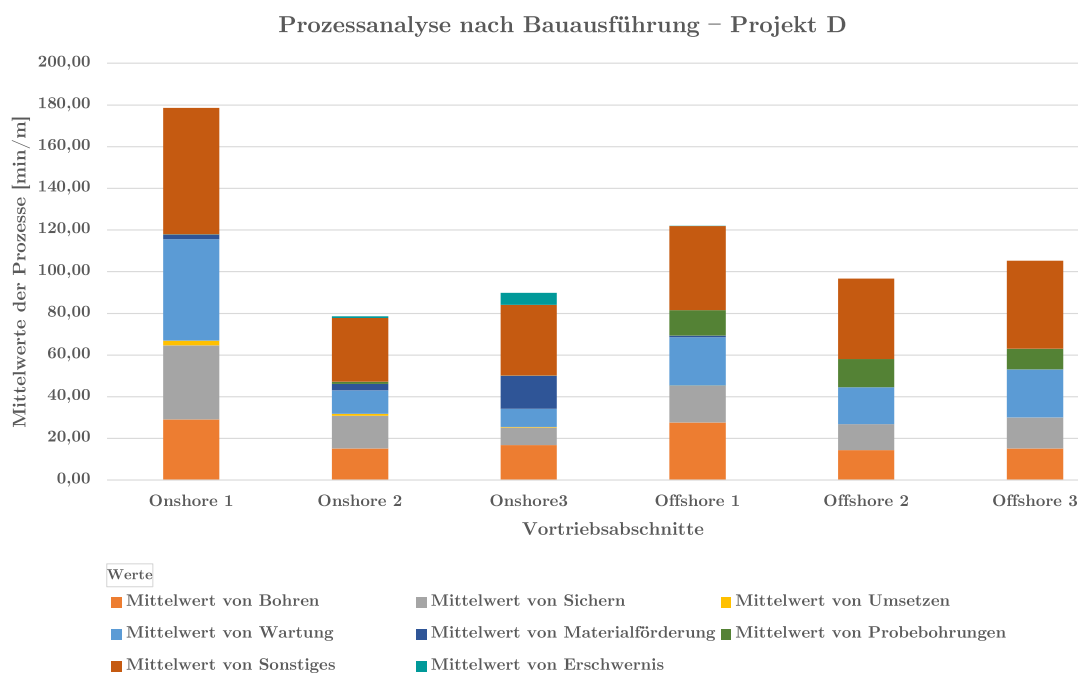
Gegenständliche Zyklusdiagramm der TBM zeichnet insgesamt 23 verschiedene Arbeiten am kritischen Weg auf. Diese Aufzeichnung passiert tageweise und nicht pro Hub. Zusammen mit den Zeitbewertungen aus Abgängen ergibt sich für jeden Kalendertag in Summe ein Zeitraum von 24 Stunden. Die 23 Codes können den acht Prozessen aus der Kalkulation im Groben zugeteilt werden. Jedoch entfällt auf den Prozess der Erschwernisse nur der Vortriebscode *Methan/Gas*, im Sinne einer Gashöhle. Die Erschwernisse aus geologischen Bedingungen und Tunnelverformungen sind nicht extra ausgewiesen, sie stecken in den restlichen Vortriebsprozessen. Eine Zuordnung der Codes ist in Tab. B.1 (Anhang) ersichtlich.

Mit Hilfe der Codezuweisung zu den Prozessen wird die mittlere Vortriebsleistung und deren Standardabweichung für jeden Vortriebsabschnitt berechnet. Die Mittelwerte der Prozessanalyse sind in Tab. 5.2 angegeben. Für die deutlich erhöhten Prozessdauern im kurzen Abschnitt Onshore 1 wird die Lernkurve im Ausmaß von 4,23 AT verantwortlich gemacht. Der Zeitbedarf für den Bohrprozess ist in Onshore 2 – 3 und Offshore 2 – 3 sehr ähnlich zwischen 14,38 – 16,83 min/m. Im Abschnitt Offshore 1 findet sich eine Erhöhung auf Grund der Schachtquerung. Für die Sicherungsmaßnahmen wird in Onshore 3 die kürzeste Durchschnittszeit mit 8,35 min/m verzeichnet. Die restlichen Abschnitte liegen zwischen 12,50 – 17,68 min/m. Beim Umsetzen

Tab. 5.2: Mittelwerte der Prozessanalyse nach Bauausführung (Ist) – Projekt D

| Bezeichnung | Bohrzeit | Sichern | Umsetzen | Wartung, Reparatur | Förderung | Probebohrung | Sonstiges | Erschwer-nisse |
|-------------|----------|---------|----------|--------------------|-----------|--------------|-----------|----------------|
| Einheit | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] |
| Onshore 1 | 29,06 | 35,63 | 2,15 | 48,71 | 2,32 | 0,08 | 60,60 | 0,00 |
| Onshore 2 | 15,17 | 15,73 | 0,89 | 11,22 | 3,06 | 1,14 | 30,51 | 0,81 |
| Onshore 3 | 16,83 | 8,35 | 0,35 | 8,65 | 15,87 | 0,09 | 33,87 | 5,74 |
| Offshore 1 | 27,64 | 17,68 | 0,04 | 23,11 | 0,88 | 12,28 | 40,29 | 0,03 |
| Offshore 2 | 14,38 | 12,50 | 0,00 | 17,68 | 0,00 | 13,43 | 38,65 | 0,00 |
| Offshore 3 | 15,15 | 14,90 | 0,00 | 23,11 | 0,00 | 9,89 | 42,16 | 0,00 |

befindet sich sehr wenig bis gar keine Zeit am kritischen Weg. Wartung und Reparatur sind auch bei diesem Projekt sehr durchwachsen. Die Zeiten bewegen sich zwischen 8,65 – 23,11 min/m. Die Materialförderung nimmt in allen Abschnitten, bis auf Ausnahme von Onshore 3 sehr wenig Zeit in Anspruch. Die Probebohrungen erfolgen gemäß Ausschreibung in den Offshore-Abschnitten, hier liegt der Zeitbedarf zwischen 9,89 – 13,43 min/m. In den Onshore-Abschnitten werden diese nur vereinzelt ausgeführt. Der Zeitbedarf für Sonstiges ist in beinahe allen Abschnitten der Höchste in der Prozesskette. Er erstreckt sich zwischen 30,51 – 60,60 min/m. Erschwer-nisse aus dem Anfahren von Gashöhlen treten nur in den Abschnitten Onshore 2 – Offshore 1 auf. Die Mittelwerte der Prozesse sind in Abb. 5.6 wiedergegeben.

**Abb. 5.6:** Mittelwerte der Prozessanalyse nach Bauausführung (Ist) – Projekt D

Hinsichtlich der berechneten Standardabweichungen aus Tab. 5.7 können Bohrzeit, Sichern, Umsetzen und Probebohrungen als eher eng gestuft angesehen werden. Für die Wartung und Reparatur ergeben sich Abweichungen von 9,91 min/m bis 71,60 min/m. Die Materialförderung verzeichnet in Onshore 3 einen großen Ausreißer von 60,17 min/m. Der Prozess Sonstiges ist

naturgemäß bedingt durch geologische Einflüsse sehr breit gestreut. Die Abweichungen liegen hier zwischen 24,37 min/m und 107,29 min/m. Auch die Erschwernisse aus Gashöhlen haben eher geringe bis mittlere Abweichungen ergeben. In Abb. 5.7 werden die Standardabweichungen

Tab. 5.3: Standardabweichung der Prozessanalyse nach Bauausführung (Ist) – Projekt D

| Bezeichnung | Bohrzeit | Sichern | Umsetzen | Wartung, Reparatur | Förderung | Probebohrung | Sonstiges | Erschwernisse |
|-------------|----------|---------|----------|--------------------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| Einheit | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] |
| Onshore 1 | 4,17 | 12,13 | 1,86 | 71,60 | 3,70 | 0,26 | 25,88 | 0,00 |
| Onshore 2 | 5,17 | 12,08 | 2,03 | 15,21 | 10,91 | 12,62 | 36,89 | 5,09 |
| Onshore 3 | 7,38 | 2,56 | 0,66 | 9,91 | 60,17 | 0,36 | 24,37 | 16,26 |
| Offshore 1 | 7,89 | 9,26 | 0,41 | 35,28 | 4,68 | 7,81 | 107,29 | 0,25 |
| Offshore 2 | 1,22 | 1,32 | 0,00 | 11,34 | 0,00 | 6,19 | 26,26 | 0,00 |
| Offshore 3 | 1,11 | 2,66 | 0,00 | 37,78 | 0,00 | 4,10 | 32,00 | 0,00 |

mittels Funktionsgebirge grafisch veranschaulicht. Die Unebenheiten über Wartung und Sonstiges sind deutlich erkennbar. Außerdem befindet sich der Ausschlag des Prozesses Materialförderung im Abschnitt Onshore 3 in Bildmitte.

Prozessanalyse nach Bauausführung – Projekt D

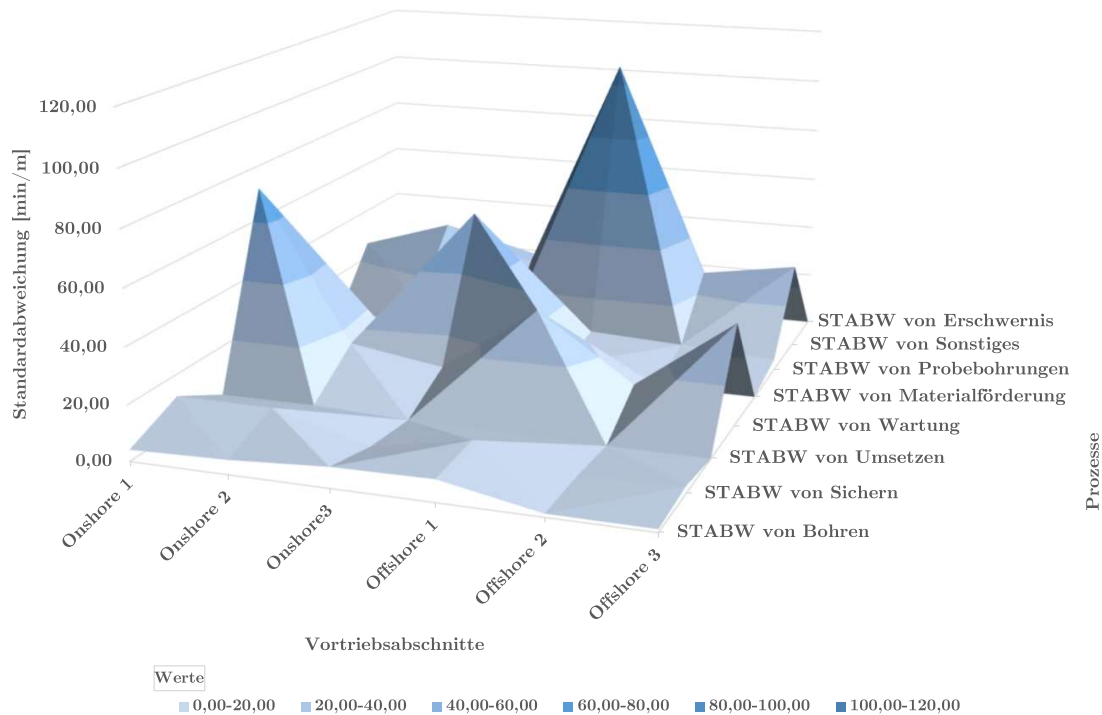


Abb. 5.7: Standardabweichung der Prozesse (Ist) – Projekt D

Zuzüglich zu der Prozessauswertung wird für jeden Vortriebsabschnitt eine mittlere Vortriebsdauer in Minuten pro Meter berechnet. Diese ist in Tab. 5.4 angegeben. Daraus errechnet sich eine tatsächliche mittlere Vortriebsleistung je Abschnitt, welche den Leistungen aus der Kalkulation gegenübergestellt wird. Für den längsten Abschnitt Onshore 2 ergibt sich die größte mittlere

Leistung zu 23,27 m/AT. Durch die hohe kalkulierte Leistung von 41,85 m/AT resultiert eine Leistungsdifferenz von 18,57 m/AT bzw. 67,17 AT. In Offshore 1, dem zweitlängsten Abschnitt wird eine mittlere Leistung von 14,43 m/AT erzielt. Aus den vereinbarten 37,56 m/AT ergibt sich eine Leistungsdifferenz von 23,12 m/AT oder 60,34 AT. Die restlichen Abschnitte sind hinsichtlich ihrer Vortriebslänge weitaus kürzer, sie haben daher einen viel geringeren Anteil an der Bauzeitdifferenz. In Onshore 1 muss wieder die Zusatzzeit aus der Lernkurve enthalten sein, die sich in diesem Abschnitt ergebende Fehlzeit wird daher vernachlässigt. Die Summe an Fehlzeiten der Abschnitte Onshore 2 – Offshore 3 ergibt 156,78 AT, dies entspricht ungefähr der noch fehlenden Bauzeit.

Tab. 5.4: Leistungsabweichung und Fehlzeiten nach Bauausführung (Ist) – Projekt D

| Vortriebsabschnitt | Mittelwert Vortriebsdauer [min/m] | Vortriebsleistung Ist [m/AT] | Vortriebsleistung Soll [m/AT] | Leistungs-differenz [m/AT] | Verteilung Ist [m] | Fehlzeit [AT] |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------|
| Onshore 1 | 0,37 | 8,82 | 24,27 | 15,45 | 82,16 | 5,93 |
| Onshore 2 | 0,97 | 23,27 | 41,85 | 18,57 | 3.522,66 | 67,17 |
| Onshore 3 | 0,85 | 20,36 | 41,85 | 21,49 | 326,73 | 8,24 |
| Offshore 1 | 0,60 | 14,43 | 37,56 | 23,12 | 1.414,37 | 60,34 |
| Offshore 2 | 0,65 | 15,57 | 37,56 | 21,99 | 295,83 | 11,12 |
| Offshore 3 | 0,65 | 15,66 | 37,56 | 21,90 | 266,21 | 9,91 |
| Summe Onshore 2 – Offshore 3 | | | | | 5.825,80 | 156,78 |

Abgänge

Aus der Maschinenauswertung ergeben sich Abgänge an Wochenenden im Ausmaß von 113,92 KT und an Feiertagen von 14,61 KT.

Zusammenstellung

Die Zusammenstellung der Einzelvorgänge wird in Abb. 5.8 dargestellt. Die abrechenbare Regelvortriebszeit beläuft sich auf 148 Arbeitstage. Das entspricht einem Anteil am Gesamtprojekt von 31,09 %. Der zweitlängste Vorgang mit 132 AT sind die kontinuierlichen zusätzlichen Erschwernisse des Regelvortriebes. Diese haben einen Anteil an der Gesamtbauzeit von 27,77 %. Arbeitsfreie Zeiten zufolge Wochenendabgänge nehmen einen Wert von 113 KT bzw. 23,93 % ein. Die beschriebenen, im Laufe des Vortriebes angefallenen, Erschwernisse im Ausmaß von 43 AT haben einen Anteil von 9,09 % an der Gesamtbauzeit. Der TBM-Verschub dauerte in der Bauausführung 24 AT, was einer prozentualen Bewertung von 5,05 % entspricht. Als kürzester Vorgang folgen zuletzt die Feiertagsabgänge mit rund 15 KT beziehungsweise 3,07 %.

Bauzeitplanung

In Abb. 5.9 werden die tatsächliche Bauzeit und die Summe der Einzelvorgänge aufgezeigt. Aus den Einzelvorgängen ergibt sich zu Beginn der Arbeiten eine Montageverzögerung von 11 Arbeitstagen. Anschließend wird im Diagramm die abrechenbare Regelvortriebszeit und der Zeitbedarf für den TBM-Verschub über die Tunnellänge kumuliert, was einen Wert von 183,02 AT ergibt. Zuzüglich den restlichen Vorgängen ergeben sich 215,28 AT. Mit den zusätzlichen Erschwernissen der Regelvortriebsleistungen schlussendlich 347,48 KT. Für den 6223,44 m langen Tunnel resultiert eine mittlere Vortriebsleistung von 17,91 m/AT. Werden die Abgänge aus Wochenende und Feiertagen hinzu gezogen, ergibt sich die Gesamtbauzeit von 476 Kalendertagen. Gemittelt über

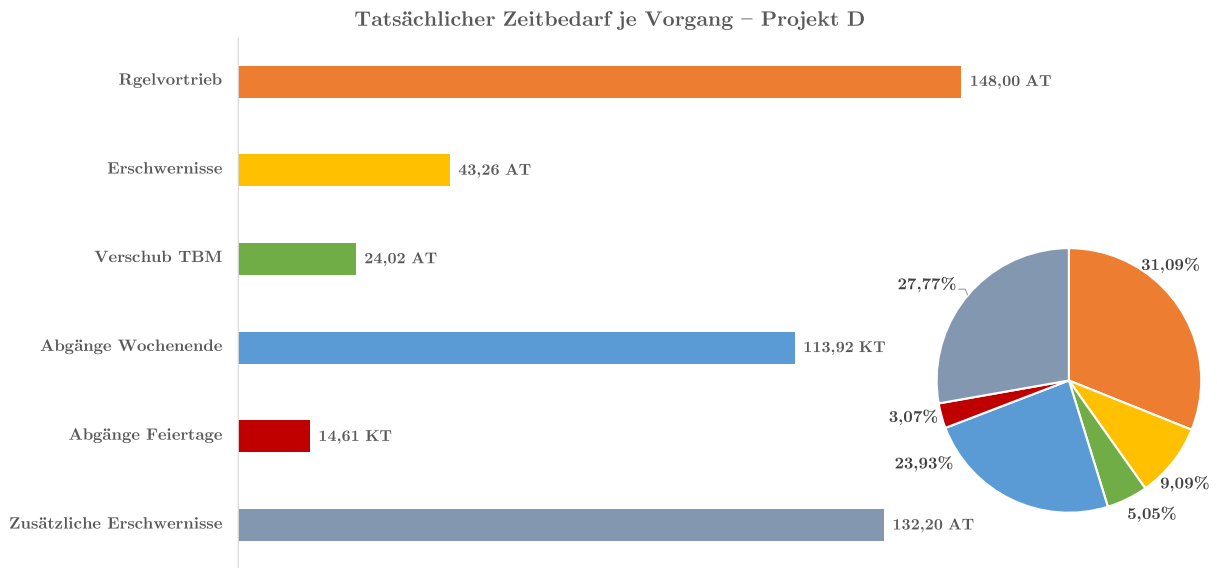


Abb. 5.8: Zeitbedarf je Vorgang laut Abrechnung (Ist) – Projekt D

diese liegt die mittlere Vortriebsleistung bei 13,07 m/KT. In rotbraun wird der tatsächliche Bauzeit der TBM-Auswertung dargestellt, hierin sind die Abgänge bereits enthalten.

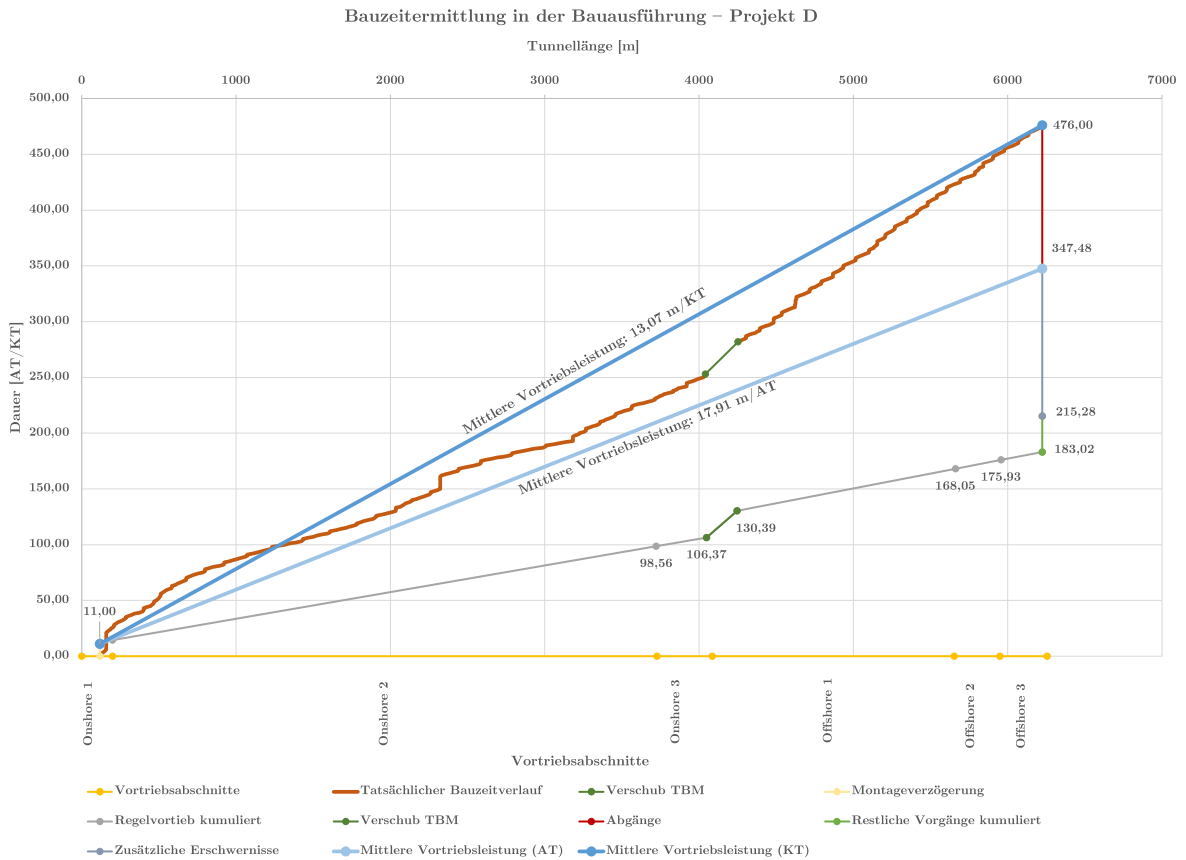


Abb. 5.9: Tatsächlicher Bauzeitverlauf (Ist) – Projekt D

5.5 Benötigte Bauzeit – Projekt E

Gegenständlichen Abschnitt liegen die übergebenen Daten im Rahmen dieser Diplomarbeit [10] zugrunde. Für die Analyse der Ausführung wird hier sowohl die Abrechnung als auch die Prozessauswertung der TBM-O herangezogen, da sich bei diesem Projekt ebenfalls eine große Differenz an abrechenbarer Arbeitszeit und tatsächlicher Dauer ergibt. Außerdem wird versucht, anhand der Maschinendaten eine Charakterisierung der Bauzeitabweichung wiederzugeben.

Tunnelausbruch (Regelvortrieb)

In Abb. 5.10 ist die tatsächliche Verteilung der Vortriebsklassen dargestellt. Es finden sich kleine bis große Abweichungen im Vergleich zur Kalkulation. Die Klasse SK1 wird lediglich in 60,94 m aufgeföhren. Die VKL SK2 ist sehr gut prognostiziert, hier wird nur eine kleine Abweichung im Vergleich zur Ausschreibung verzeichnet. In der Klasse SK3A sind 1.820 m an Tunnel ausgebrochen, das ist mehr als das Doppelte im Vergleich zur Ausschreibung. Die Vortriebsklassen SK3B und SK3C sind wieder gut prognostiziert. In Klasse S3D gibt es eine Abweichung um mehr als das Doppelte der Klassenlänge. SK4 wird nur auf 34 Tunnelmeter verwendet, das ist deutlich weniger als ausgeschrieben. In der Bauausführung kommt die Klasse SK5 nicht zur Anwendung.

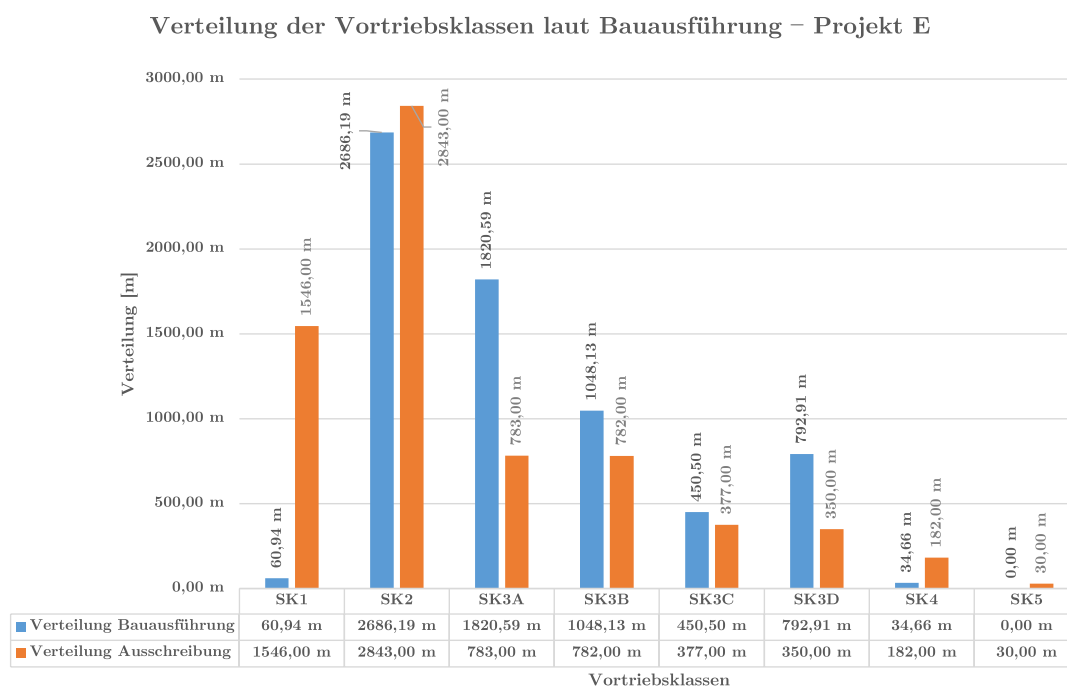


Abb. 5.10: Tatsächliche Verteilung der VKL (Ist) – Projekt E

Aus den tatsächlich verzeichneten VKL-Längen ergibt sich mit Hilfe der in der Kalkulation vom AN angegebenen Vortriebsleistungen eine abrechenbare Regelvortriebszeit. Die Berechnung wird in Tab. 5.5 dargestellt. Für die insgesamt 6893 Tunnelmeter ergeben sich 321,77 AT an abrechenbarer Regelvortriebszeit. In Abb. 5.11 wird die Zusammensetzung aus Vortriebsklassenverteilung und errechneter Dauer grafisch veranschaulicht.

Bohrungen und Verpressen

Für die Arbeiten aus gegenständlicher Leistungsgruppe sind lediglich 1,24 AT an kritischer Bauzeit verzeichnet. Den größten Anteil daran haben die Injektionsarbeiten im Ausmaß von rund 0,60 AT.

Tab. 5.5: Vortriebsklassenverteilung und verrechenbare Dauer (Ist) – Projekt E

| Bezeichnung | Verteilung Bauausführung [m] | Leistung Ausschreibung [m/AT] | Verrechenbare Dauer [AT] |
|-------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| SK1 | 26,70 | 60,94 | 2,28 |
| SK2 | 26,70 | 2.686,19 | 100,61 |
| SK3A | 25,05 | 1.820,59 | 72,68 |
| SK3B | 18,80 | 1.048,13 | 55,75 |
| SK3C | 19,10 | 450,50 | 23,59 |
| SK3D | 12,95 | 792,91 | 61,23 |
| SK4 | 6,15 | 34,66 | 5,64 |
| SK5 | 3,45 | 0,00 | 0,00 |
| Summe | | 6.893,91 | 321,77 |

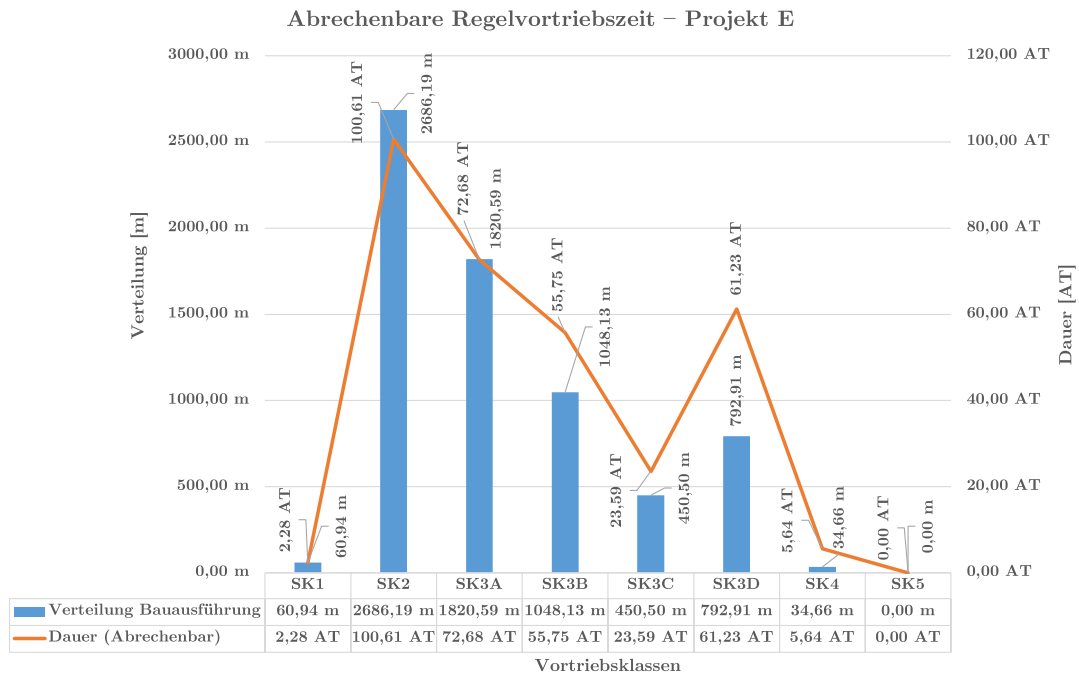


Abb. 5.11: Abrechenbare Regelvortriebszeit nach VKL (Ist) – Projekt E

Zusatzzeiten Tunnelausbruch

Aus den Zusatzzeiten ergibt sich ein verrechenbarer Zeitraum von 18,52 AT. Den größten Anteil daran haben Bohrkopfrevisionen im Gesamtausmaß von 14,00 AT. Alle anderen Leistungen sind deutlich geringer. Für Stillstände der TBM-O werden während des gesamten Vortriebs lediglich 0,73 AT verzeichnet.

Prozessanalyse

Aus den drei großen, oben beschriebenen, Leistungsgruppen ergibt sich eine abrechenbare Bauzeit von 341,52 AT. Tatsächlich werden 495,16 AT für den Tunnelausbruch benötigt, dies ergibt eine Differenz von 153,64 AT. Diese Abweichung wird im gegenständlichen Unterkapitel analysiert und in der Zusammenstellung den restlichen Vorgängen gegenübergestellt. In der Bauzeitbetrachtung

findet sie ebenfalls Eingang, um die Zusammensetzung der Gesamtbauzeit zu veranschaulichen. Für die Prozessanalyse werden die Vortriebscodes der TBM-O den sechs Hauptprozessen des kontinuierlichen Tunnelvortriebes zugewiesen. Die Einteilung ist in Tab. B.2 (Anhang) wiedergegeben.

Aus dieser Zuordnung sind die Vortriebscodes der Maschinen entsprechend ihrer VKL den Prozessen zugewiesen. Mit Hilfe einer Pivot-Tabelle werden Mittelwert und Standardabweichung des jeweiligen Prozesses herausgefiltert. In Tab. 5.6 sind die Mittelwerte der Prozesse entsprechend der verschiedenen Vortriebsklassen angegeben. Hinsichtlich der VKL SK4 ist erwähnenswert, dass diese lediglich über 34,66 m im Bereich einer Störzone angewendet ist. Die Bohrzeit bewegt sich bei den Klassen SK1 – SK3D zwischen 27,72 – 38,78 min/m. Für SK4 werden hier im Durchschnitt 72,15 min/m verzeichnet. Das Sichern liegt in VKL SK1 bei 0 Minuten, da hier keine Sicherungsmaßnahmen notwendig sind, und erstreckt sich bis 18,73 min/m in Klasse SK3C. Der Höchstwert liegt in VKL SK4, hier werden im Mittel 918,97 min/m für das Sichern in der Störzone gebraucht. Der Zeitbedarf für Umsetzen bewegt sich zwischen 2,74 min/m und 5,15 min/m. Die Arbeiten für Wartung und Reparatur sind in den Klassen SK1 – SK3D relativ einheitlich bezüglich ihrer Zeitdauer, in SK4 werden hier im Durchschnitt 149,29 min/m verbraucht. Der Prozess des Meisselwechsels scheint im Wesentlichen proportional zur Vortriebsgeschwindigkeit der jeweiligen Klasse, in SK1 liegt der Zeitbedarf bei 13,74 min/m, in SK4 nur mehr bei 1,19 min/m. Die Materialförderung beansprucht in den VKL SK1 – SK3D zwischen 0,28 min/m und 4,65 min/m an kritischer Bauzeit. In der Klasse SK4 ist diese mit 7,50 min/m wieder deutlich erhöht. Für sonstige Arbeiten sind in SK1 – SK3D Zeiträume von 12,07 – 27,64 min/m aufgetreten. In SK4 fallen durchschnittlich 213,46 min/m in der Störzone an.

Tab. 5.6: Mittelwerte der Prozessanalyse nach Bauausführung (Ist) – Projekt E

| Bezeichnung | Bohrzeit | Sichern | Umsetzen | Wartung, Reparatur | Meissel- wechsel | Förderung | Sonstiges |
|-------------|----------|---------|----------|-----------------------|---------------------|-----------|-----------|
| Einheit | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] |
| SK1 | 38,78 | 0,00 | 2,81 | 15,73 | 13,74 | 0,28 | 14,69 |
| SK2 | 37,73 | 1,66 | 3,05 | 18,10 | 8,72 | 2,39 | 27,64 |
| SK3A | 36,30 | 2,49 | 3,54 | 14,79 | 5,96 | 1,59 | 17,91 |
| SK3B | 31,45 | 10,31 | 2,76 | 12,41 | 3,96 | 1,08 | 12,97 |
| SK3C | 27,72 | 18,73 | 2,74 | 11,78 | 4,76 | 0,87 | 12,07 |
| SK3D | 37,84 | 14,11 | 3,03 | 17,23 | 6,36 | 4,65 | 20,94 |
| SK4 | 72,15 | 918,97 | 5,15 | 149,29 | 1,19 | 7,50 | 213,46 |

In Abb. 5.12 sind die Prozesszeiten grafisch veranschaulicht, auf die Darstellung der VKL SK4 wird hier jedoch verzichtet, da diese die Abbildung unkenntlich verzerrt.

In Tab. 5.7 sind passend zu den Mittelwerten die jeweiligen Standardabweichungen dargestellt. Über die gesamte VKL SK4 finden sich in beinahe jedem Prozess besonders große Abweichungen, einzig das Umsetzen und der Meisselwechsel sind als geringer zu werten, jedoch ist deren Zeitbedarf eher kurz. Für das Sichern wird in dieser Klasse eine Abweichung von 1.408 min/m und für Sonstige Arbeiten eine Abweichung von 400 min/m errechnet. In den restlichen Klassen ergeben sich eher größere Unregelmäßigkeiten für die Prozesse Sichern, Wartung/Reparatur und Sonstiges.

In Abb. 5.13 wird das Funktionsgebirge für die Standardabweichungen der Prozesse entsprechend ihrer Vortriebsklassen grafisch veranschaulicht. Auch hier wird auf die Darstellung der VKL SK4 verzichtet.

Aus der Codeauswertung ist ebenfalls eine mittlere tatsächliche Vortriebsdauer der verschiedenen Vortriebsklassen berechnet. Diese wird in Tab. 5.8 dargestellt. Daraus kann eine mittlere

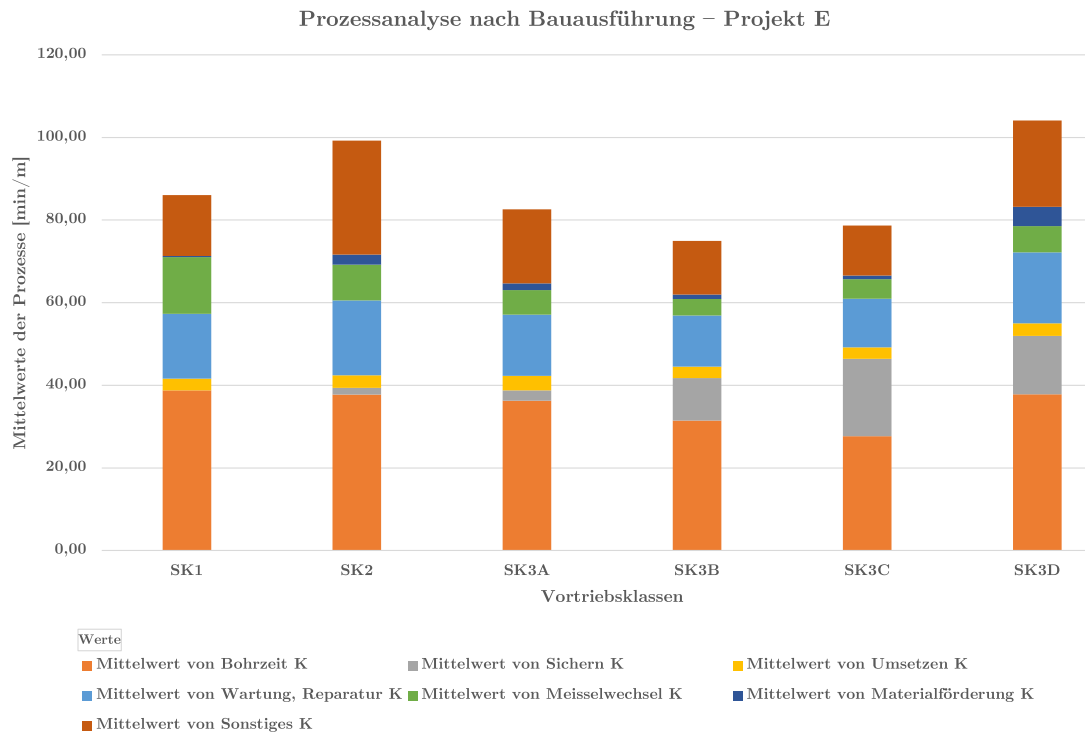


Abb. 5.12: Mittelwerte der Prozessanalyse nach Bauausführung (Ist) – Projekt E

Tab. 5.7: Standardabweichung der Prozessanalyse nach Bauausführung (Ist) – Projekt E

| Bezeichnung | Bohrzeit | Sichern | Umsetzen | Wartung, Reparatur | Meissel- wechsel | Förderung | Sonstiges |
|-------------|----------|----------|----------|-----------------------|---------------------|-----------|-----------|
| Einheit | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] | [min/m] |
| SK1 | 8,50 | 0,00 | 2,22 | 44,43 | 42,10 | 1,53 | 43,26 |
| SK2 | 20,10 | 17,46 | 2,95 | 77,99 | 29,85 | 13,63 | 128,98 |
| SK3A | 26,58 | 15,42 | 6,86 | 46,63 | 15,46 | 11,76 | 58,09 |
| SK3B | 25,90 | 26,26 | 3,33 | 35,85 | 10,86 | 5,08 | 32,69 |
| SK3C | 6,81 | 51,96 | 2,59 | 30,74 | 12,27 | 3,86 | 29,14 |
| SK3D | 28,89 | 55,83 | 3,21 | 40,19 | 15,77 | 32,02 | 57,62 |
| SK4 | 54,91 | 1.408,82 | 6,64 | 260,26 | 4,52 | 20,30 | 400,60 |

tatsächliche Vortriebsleistung errechnet werden, welche der Soll-Leistung gegenüber zu stellen ist. Daraus resultiert einerseits die Leistungsdifferenz aus aufgetretenen kontinuierlichen Erschwernissen im Regelvortrieb. In den Klassen SK1 – SK3A bewegt sich diese in einer Bandbreite zwischen 7,61 –12,19 m/AT. In der Klasse SK3B liegt man um 0,42 m/AT, in der Klasse SK3D um 0,87 m/AT über den Erwartungen der Kalkulation. Für SK3C errechnet sich eine um 0,80 m/AT erschwerte Leistung. In der kurzen SK4 ergibt sich schlussendlich noch einmal eine Leistungsabweichung von 5,10 m/AT. Andererseits kann auf Basis der Leistungsdifferenz und der tatsächlichen Vortriebsklassenverteilung eine Fehlzeit zufolge der Erschwernisse ausgedrückt werden. Daraus leiten sich insgesamt 140,91 AT ab. Dieser Zeitbedarf wird den geologischen Abweichungen zwischen Ausschreibung und Ausführung zugeschrieben. Erwähnenswert ist hierbei, dass in den Bereich der Störzone alleine 33,66 AT an Fehlzeit fallen. Darin beinhaltet sind 34,66 m

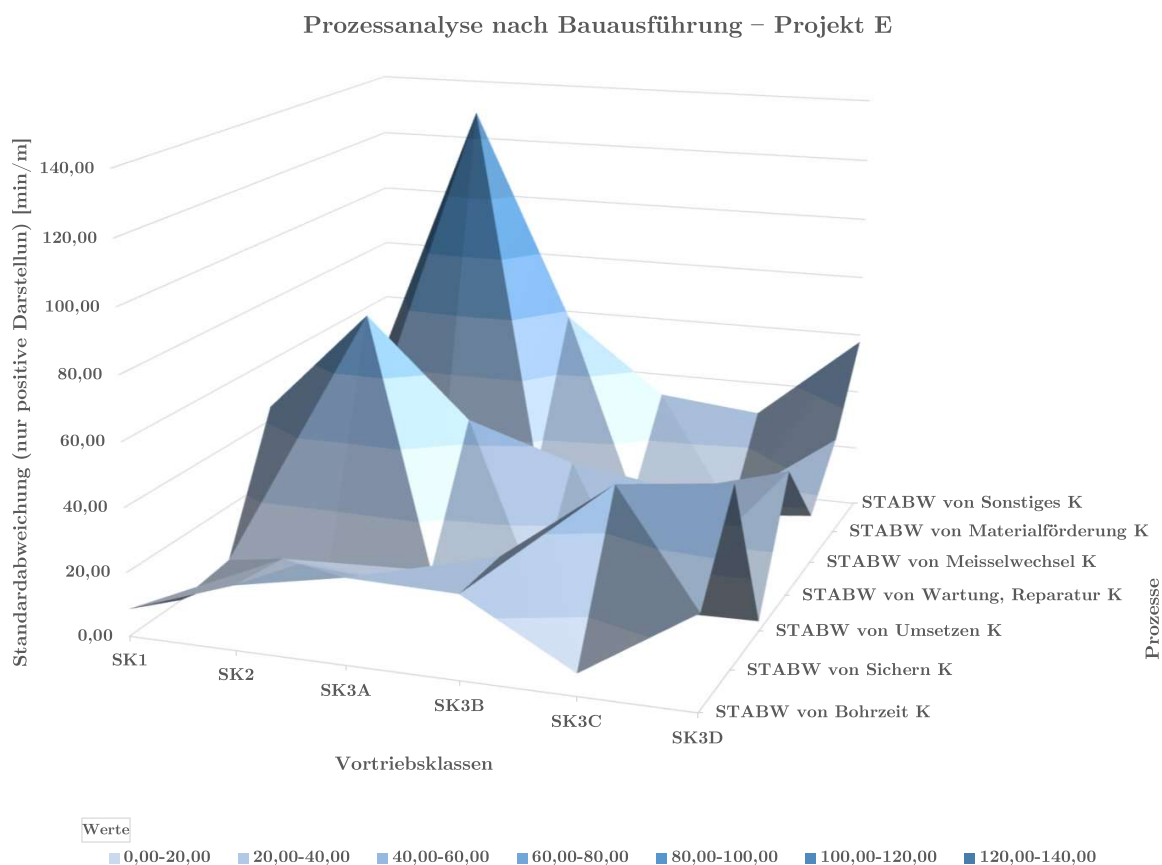


Abb. 5.13: Standardabweichung der Prozesse (Ist) – Projekt E

der SK4 mit 27,28 AT und die Bereiche vor und nach der Störzone mit insgesamt 366 m in der VKL SK3A mit einem Zeitraum von 6,38 AT

Tab. 5.8: Klassifizierung des erschwerten Vortriebs nach Bauausführung (Ist) – Projekt E

| Vortriebs- klasse | Mittelwerte Vortriebs- dauer [min/m] | Vortriebs- leistung Ist [m/AT] | Vortriebs- leistung Soll [m/AT] | Leistungs- differenz [m/AT] | Verteilung Ist [m] | Fehlzeit [AT] |
|----------------------|---|---|--|-----------------------------------|--------------------------|------------------|
| SK1 | 86,03 | 16,74 | 26,70 | 9,96 | 60,94 | 1,36 |
| SK2 | 99,27 | 14,51 | 26,70 | 12,19 | 2.686,19 | 84,58 |
| SK3A | 82,59 | 17,44 | 25,05 | 7,61 | 1.820,59 | 31,74 |
| SK3B | 74,94 | 19,22 | 18,80 | -0,42 | 1.048,13 | -1,21 |
| SK3C | 78,67 | 18,30 | 19,10 | 0,80 | 450,50 | 1,03 |
| SK3D | 104,16 | 13,82 | 12,95 | -0,87 | 792,91 | -3,87 |
| SK4 | 1.367,70 | 1,05 | 6,15 | 5,10 | 34,66 | 27,28 |
| Summe | | | | | 6.893,91 | 140,91 |

Weiters wird im Zuge der Analyse eine Bauzeitabweichung im Ausmaß von 5,27 AT im Rahmen eines Nachtbohrverbotes festgestellt. Die restliche Fehlzeit von 7,46 AT ist einer Vielzahl kurzer Ereignisse im Verlauf des Vortriebs zugeschrieben, welche nicht den vorherigen Klassifizierungen

zugeordnet werden können. Hierin sind vor allem außerordentliche mechanische Defekte der Prozesskette enthalten.

Abgänge

Aus der Bauzeitverlängerung ergibt sich ebenfalls eine andere Anzahl an Wochenenden und Feiertagen. Für die tatsächliche Bauzeit sind folgende Zeiten verzeichnet:

- Abgänge Wochenende: 120,91 KT
- Abgänge Feiertage: 66,00 KT

Zusammenstellung

In Abb. 5.14 werden die Einzelvorgänge einander gegenüber gestellt. Den Großteil am Vortrieb nimmt der Tunnelausbruch, welcher im Sinne dieser Diplomarbeit als Regelvortrieb klassifiziert wird, in Anspruch. Es ergeben sich hier 321,77 AT, bzw. 47,18 % an der Gesamtbaudauer. Als nächstes folgen die, im Rahmen der Analyse bewerteten, geologisch bedingten Abweichungen des Regelvortriebes mit 140,91 AT, was einem Anteil von 20,66 % entspricht. Abgänge an Wochenenden nehmen 17,73 %, Abgänge an Feiertagen 9,68 % am Gesamtvortrieb in Anspruch. Der nächstgelegene Vorgang, mit deutlichem Abstand, sind die Zusatzzeiten des Tunnelausbruches im Ausmaß von 18,52 AT oder 2,71 %. Alle weiteren Vorgänge sind im Vergleich zum Tunnelausbruch verschwindend gering.

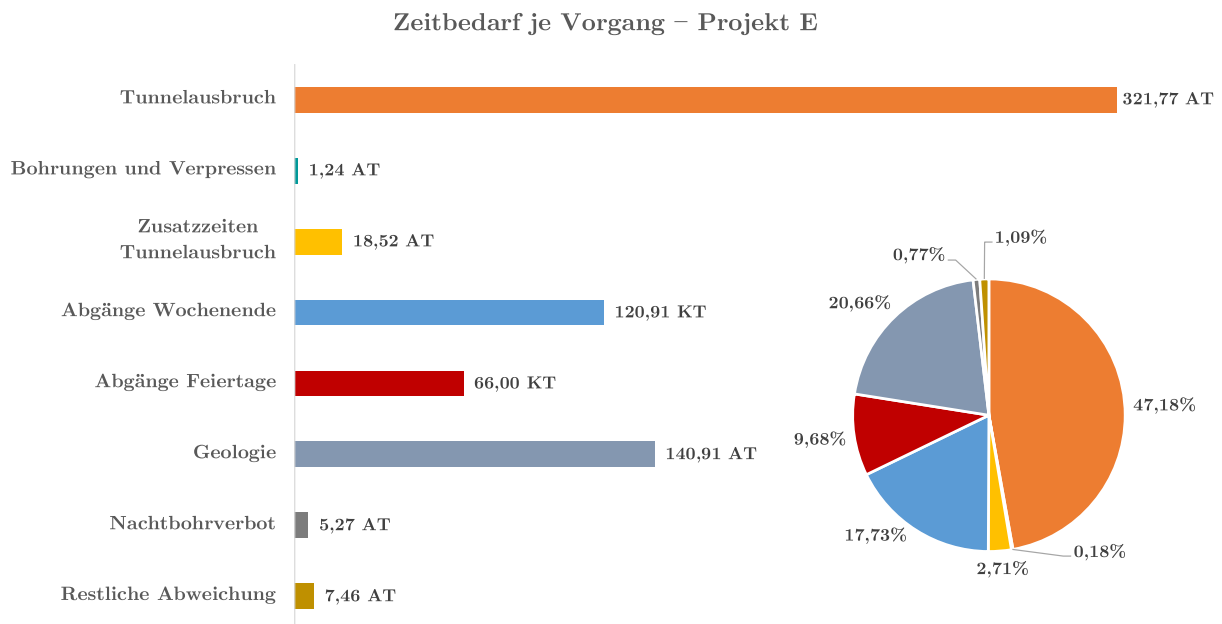


Abb. 5.14: Zeitbedarf je Vorgang laut Abrechnung (Ist) – Projekt E

Bauzeitermittlung

Für die Betrachtung der Bauzeit werden die Regelvortriebsklassen nach Länge und Dauer kumuliert. Des Weiteren sind am Ende die restlichen Vorgänge, mit Ausnahme der geologisch bedingten Verzögerung, angefügt. Dies ergibt eine abrechenbare Bauzeit von 341,52 AT. Mit den Fehlzeiten aus den geologisch erschwerten Bedingungen klettert der Wert auf die tatsächliche Ausführungsdauer von 495,16 AT. Dies entspricht über die 6.893 Vortriebsmeter einer mittleren Leistung von 12,90 m/AT. Werden die Abgänge hinzu gezählt, erhält man eine Gesamtbaudauer von 682,07 KT, welche einer mittleren Leistung von 11,70 m/KT entspricht.

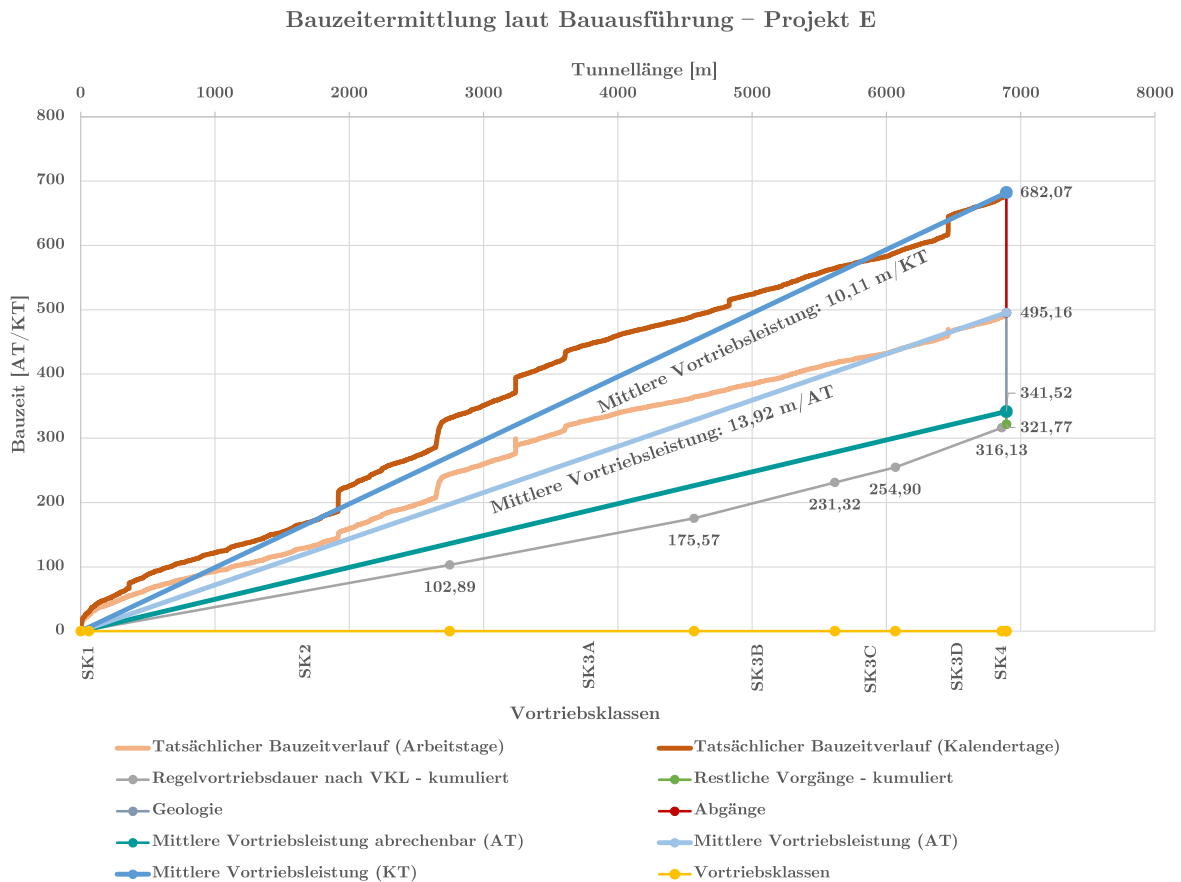


Abb. 5.15: Tatsächlicher Bauzeitverlauf (Ist) – Projekt E

5.6 Benötigte Bauzeit – Projekt F

Für die Analyse der Bauausführung von Projekt F werden *Projekt F – TBM-Advance Analysis* [13] und die *Unterlagen aus der Bauausführung – Projekt F* [14] herangezogen.

Regelvortrieb und Einarbeitung

Da es in diesem Projekt keine explizit ausgeschriebenene Vortriebsklassen gibt, werden in erster Linie die RMR-Klassen betrachtet. Deren tatsächliche Verteilung ist in Abb. 5.16 dargestellt, dem gegenüber steht die ursprüngliche Verteilung der Baseline.

Klasse 2 hat den höchsten Anteil an der Tunnellänge mit rund 5.197 m, im Vergleich dazu steht die Ausschreibungslänge bei ca. 3.407 m. Am zweitlängsten tritt Klasse 3 mit 1.718 m auf, deren Länge wird im Vorfeld sehr treffend prognostiziert. Die Klassen 1, 2 und 3 weisen lediglich Längen von 229 m, 129 m und 217 m auf. Aus der tatsächlichen Verteilung errechnet sich mit Hilfe der vertraglich vereinbarten Leistung je Klasse eine abrechenbare Bauzeit für den Regelvortrieb. Tab. 5.9 gibt den Anteil der Klassen an der Gesamtlänge, Längenverteilung und verrechenbare Dauer wieder. Den höchsten Zeitbedarf weist Klasse 2 mit 152 AT auf. Klasse 3 mit großer Länge und hoher Leistung verzeichnet mit rund 51 AT in etwa den gleichen Zeitbedarf wie Klasse 5 mit sehr kurzer Länge und geringer Leistung. Klasse 4 nimmt schließlich nur mehr 13 AT, Klasse 1 ca. 7 AT in Anspruch.

Für den 7.490 m langen Tunnelvortrieb ergeben sich 271 AT an verrechenbaren Regelvortriebsleistungen. Im ersten Tunnelteil werden die vertraglich vereinbarten 15 AT zufolge des Einarbeitungseffektes ebenfalls in Rechnung gestellt.

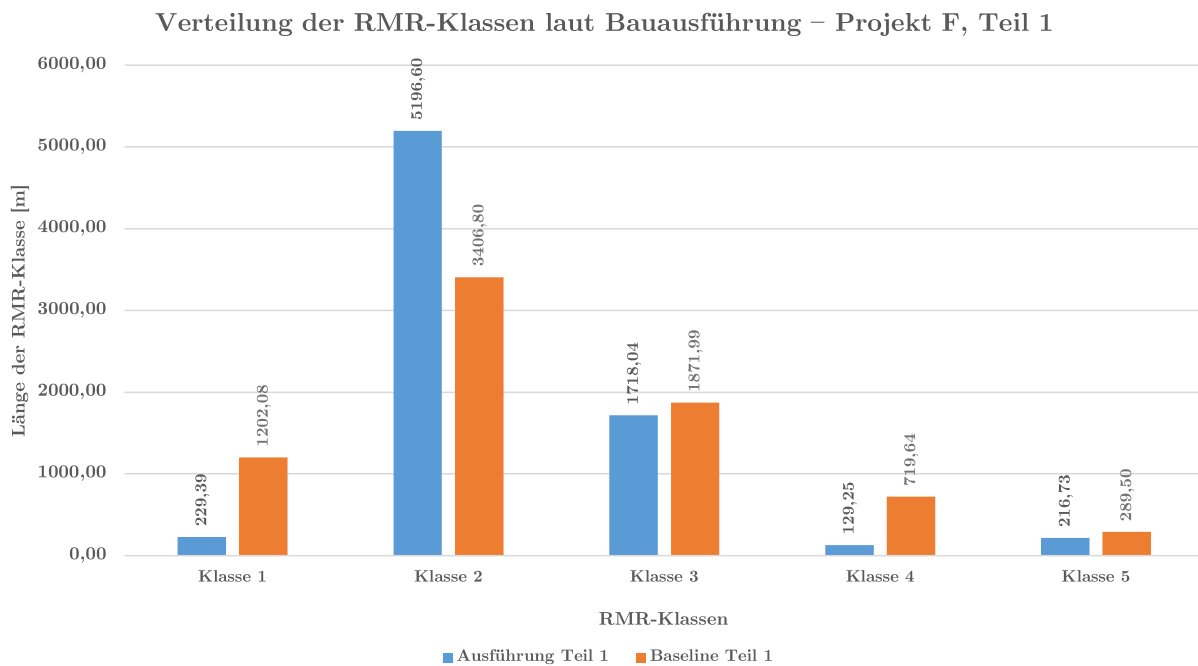


Abb. 5.16: Tatsächliche Verteilung der RMR-Klassen (Soll) – Projekt F, Teil 1

Tab. 5.9: Verteilung der RMR-Klassen und verrechenbare Dauer (Ist) – Projekt F, Teil 1

| Klasse | Leistung Vertrag [m/AT] | Anteil an Gesamtlänge [%] | Länge [m] | Verrechenbare Dauer [AT] |
|----------|-------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|
| Klasse 1 | 34,10 | 3,06 | 229,39 | 6,73 |
| Klasse 2 | 34,10 | 69,38 | 5.196,60 | 152,39 |
| Klasse 3 | 33,70 | 22,94 | 1.718,04 | 50,98 |
| Klasse 4 | 9,90 | 1,73 | 129,25 | 13,06 |
| Klasse 5 | 4,50 | 2,89 | 216,73 | 48,16 |
| Summe | | 100,00 | 7.490,00 | 271,32 |

Vortriebsunterbrechungen

Der Regelvortrieb wird durch zahlreiche geologische Störungen unterbrochen. Einen Überblick deren Abfolge und Dauer gibt Tab. 5.10. Die Karsthöhlen und Höhlen werden dabei folgendermaßen kategorisiert:

Karsthöhle Kategorie 1: Der Durchmesser der Höhle bewegt sich zwischen 0,50 x Bohrkopfdurchmesser bis 1,00 x Bohrkopfdurchmesser. Das Gesamtvolumen umfasst weniger als 30 m³.

Karsthöhle Kategorie 2: Der Höhlendurchmesser reicht von 1,00 x Bohrkopfdurchmesser bis zu 8,00 m. Das Volumen der Höhle beträgt maximal 500 m³.

Höhlen: Höhlen die nicht durch Karsterscheinungen entstehen und deren Durchmesser- und Volumenbegrenzungen überschreiten können.

Tab. 5.10: Vortriebsunterbrechungen (Ist) – Projekt F, Teil 1

| Vortriebsunterbrechung | Dauer [AT] |
|------------------------|------------|
| Höhle Nr. 1 | 119,60 |
| Große Faltungszone | 31,35 |
| Moza-Formation | 69,53 |
| Karsthöhle Kategorie 2 | 4,51 |
| Karsthöhle Kategorie 1 | 5,14 |
| Faltungszone | 36,65 |
| Karsthöhle Kategorie 1 | 0,90 |
| Karsthöhle Kategorie 2 | 0,90 |
| Höhle Nr. 2 | 16,10 |
| Karsthöhle Kategorie 2 | 0,08 |
| Karsthöhle Kategorie 2 | 0,08 |
| Karsthöhle Kategorie 1 | 3,15 |
| Karsthöhle Kategorie 2 | 2,96 |
| Karsthöhle Kategorie 1 | 0,85 |
| Karsthöhle Kategorie 2 | 2,00 |
| Faltungszone | 2,03 |
| Quellender Ton | 13,50 |
| Verbruch | 4,67 |
| Karsthöhle Kategorie 1 | 0,00 |
| Karsthöhle Kategorie 1 | 4,95 |
| Karsthöhle Kategorie 1 | 1,97 |
| Karsthöhle Kategorie 2 | 0,00 |
| Karsthöhle Kategorie 1 | 0,42 |
| Faltungszone | 7,29 |
| Karsthöhle Kategorie 1 | 2,04 |
| Summe | 330,66 |

Im Verlauf des Vortriebes werden neun Karsthöhlen der Kategorie 1 und sieben der Kategorie 2 angefahren. Außerdem müssen zwei Höhlen mit der TBM-O durchquert werden. Neben der Moza-Formation sind vier weitere Faltungszone zu durchhörtern. Für die Bewältigung der gesamten Vortriebsunterbrechungen resultieren zusätzliche 330,66 AT.

Zusätzliche Erschwernisse und sonstige Verzögerungen

Für den gesamten Vortrieb werden 692,78 AT benötigt. Mit den bisherigen Vorgängen können 616,98 AT erlöst werden, die Differenz zum Ist ergibt 75,80 AT. Diese werden aufgeteilt in zusätzliche Erschwernisse und sonstige Unterbrechungen. Für die sonstigen Unterbrechungen können 13,08 AT ausgewiesen werden, diese resultieren vor allem aus Maschinendefekten und stammen aus der Sphäre des AN. Demzufolge bleiben für zusätzliche Erschwernisse 62,72 AT übrig. In diesen sind Wiedereinarbeitungseffekte nach diversen Vortriebsunterbrechungen und andere geologische Bedingungen, als im Vertrag vereinbart, abgegolten.

Abgänge

Durch die deutliche Bauzeitverlängerung sind im Verlauf der Arbeiten zusätzliche Feiertage, gegenüber den Vereinbarungen der Baseline, aufgetreten. Insgesamt belaufen sich die Abgänge auf 59,92 KT.

Zusammenstellung

In der Zusammenstellung aus Abb. 5.17 sind die beschriebenen Vorgänge einander gegenüber gestellt. Den größten zeitlichen Bedarf haben die zahlreichen Vortriebsunterbrechungen mit ca. 331 AT. Dies entspricht einem Anteil an der Gesamtbauzeit von 43,93 %. Der abrechenbare Regelvortrieb nimmt 271 AT bzw. 36,05 % ein. Die zusätzlichen Erschwernisse des Regelvortrieb haben einen Anteil von 8,33 % an der Bauzeit, Abgänge belaufen sich auf 7,96 %. Die 15 AT Einarbeitung zu Vortriebsbeginn nehmen 1,99 % an der Bauzeit in Anspruch, sonstige Verzögerungen schlussendlich noch einmal 1,74 %.

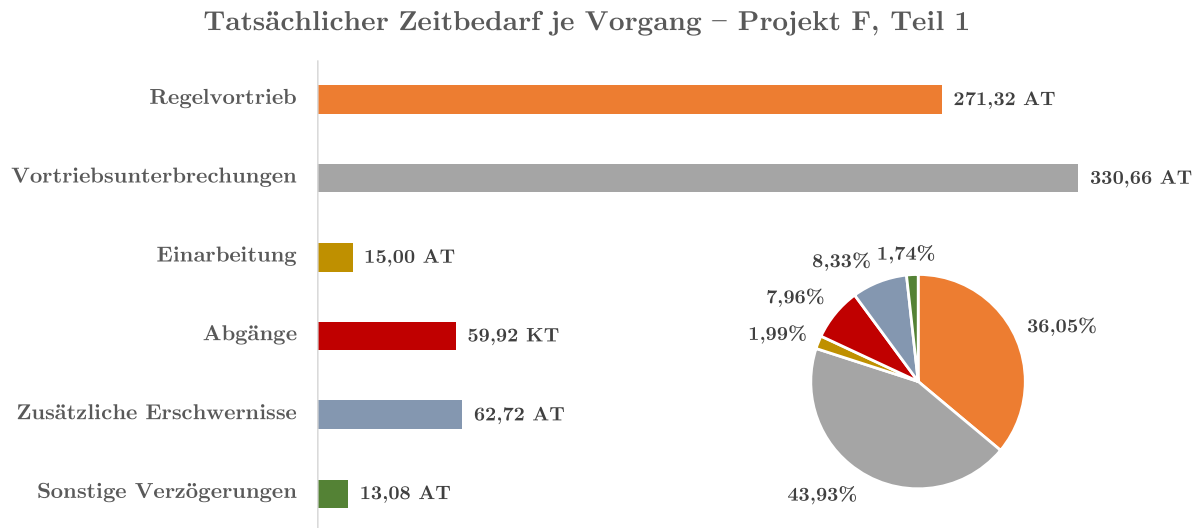


Abb. 5.17: Zeitbedarf je Vorgang laut Abrechnung (Ist) – Projekt F, Teil 1

Bauzeitermittlung

Im Bauzeitplan aus Abb. 5.18 sind die Regelvortriebsleistungen entsprechend der RMR-Klassen kumuliert. Daraus ergeben sich rund 271 AT. Zuzüglich Vortriebsunterbrechungen, Einarbeitungszeit und sonstige Verzögerungen klettert die Bauzeit auf 630 AT. Um die tatsächliche Ausführungszeit von ca. 693 AT zu erreichen, werden noch die zusätzlichen Erschwernisse hinzu gerechnet. Die Bauzeitlinie inklusive aller Abgänge ergibt die Gesamtbauzeit von ca. 753 KT. Für den 7.490 m langen Tunnel wird eine mittlere Vortriebsleistung von 10,81 m/AT erreicht. Fliesen in die Bewertung auch die Abgangszeiten mit ein, so ergibt sich eine Vortriebsleistung von 9,95 m/KT.

Abschnittseinteilung und Prozessauswertung

Zufolge der großen Bauzeitdifferenz auf Grund zahlreicher Vortriebsunterbrechungen wird der Vortrieb von Seiten des AN in vierzehn Abschnitte eingeteilt. Diese richten sich in etwa nach den einzelnen Unterbrechungen, um diese genauer einzugrenzen. Dadurch wird eine bessere Auswertung der Bauzeitabweichungen und deren Ursachen ermöglicht. In Tab. 5.11 sind die 14 Abschnitte aufgezeichnet. Über die Tunnelmeter ergibt sich eine entsprechende Abschnittslänge. Für diese wird aus der Baseline eine Soll-Bauzeit in Arbeitstagen errechnet. Dem gegenüber steht die tatsächliche Ausführungsbauzeit im Ist. Aus der Differenz bildet sich der Mehr- bzw. Minderverbrauch an Bauzeit im entsprechendem Abschnitt. In Summe resultiert die gesamte Bauzeitabweichung von ca. 352 AT. Im Folgenden sind die Abschnitte und deren Bauzeitdifferenzen genauer beschrieben:

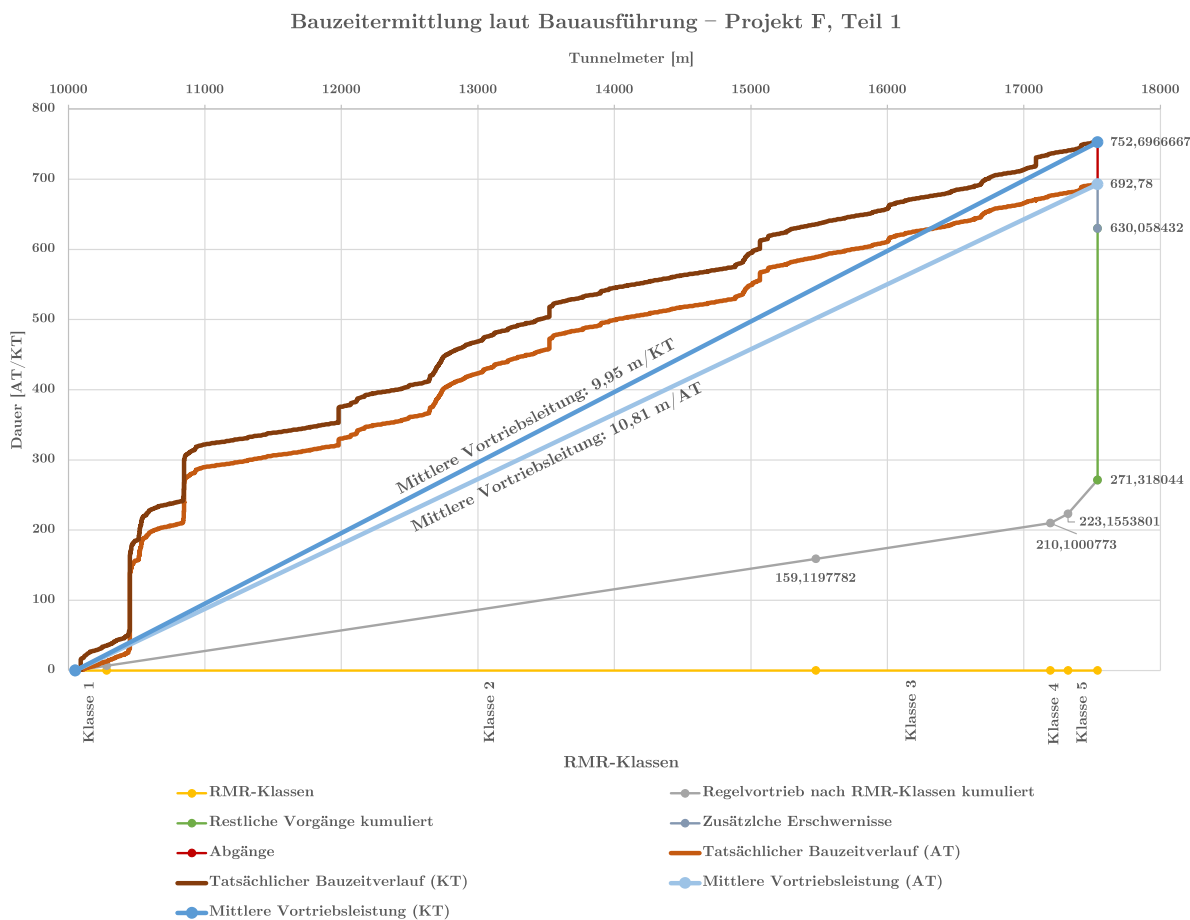


Abb. 5.18: Bauzeitplan (Ist) – Projekt F, Teil 1

Tab. 5.11: Vortriebsabschnitte und deren Zeitbedarf – Projekt F, Teil 1

| Abschnitt | Tunnelmeter | | Länge [m] | Soll | Ist (Ausführung) | Delta [AT] |
|-----------|-------------|---------|--------------|--------------------|------------------|---------------|
| | von [m] | bis [m] | | (Baseline) [AT] | [AT] | |
| 1 | 10+089 | 10+439 | 350,36 | 20,22 | 25,50 | 5,28 |
| 2 | 10+439 | 10+516 | 76,60 | 4,42 | 134,00 | 129,58 |
| 3 | 10+516 | 10+637 | 120,93 | 9,46 | 41,00 | 31,54 |
| 4 | 10+637 | 10+838 | 201,00 | 6,43 | 10,00 | 3,57 |
| 5 | 10+838 | 10+969 | 131,54 | 3,89 | 78,00 | 74,11 |
| 6 | 10+969 | 11+980 | 1.010,53 | 36,54 | 32,00 | -4,54 |
| 7 | 11+980 | 12+643 | 662,97 | 24,93 | 47,00 | 22,07 |
| 8 | 12+643 | 13+352 | 708,94 | 28,22 | 82,00 | 53,78 |
| 9 | 13+352 | 13+683 | 331,79 | 12,21 | 34,00 | 21,79 |
| 10 | 13+683 | 14+887 | 1.203,40 | 60,67 | 46,00 | -14,67 |
| 11 | 14+887 | 15+138 | 251,23 | 10,85 | 45,00 | 34,15 |
| 12 | 15+138 | 16+005 | 867,30 | 37,45 | 36,68 | -0,77 |
| 13 | 16+005 | 16+680 | 674,38 | 29,12 | 34,00 | 4,88 |
| 14 | 16+680 | 17+540 | 860,29 | 56,62 | 47,60 | -9,02 |
| Summe | | | 7.451,26 | 341,03 | 692,78 | 351,75 |

Abschnitt 1: Der Mehrverbrauch an Bauzeit resultiert vor allem aus länger andauernden Einarbeitungseffekten am Beginn des Vortriebes.

Abschnitt 2 – Höhle Nr. 1: Die größte Abweichung weist gegenständlicher Abschnitt mit rund 130 AT auf. In diesem kurzen Tunnelbereich befindet sich Höhle Nr. 1, welche die längste Vortriebsunterbrechung verursacht hat. Die angetroffene Geologie führt zu einem Stillstand der Maschine und erheblichen Sicherungsaufwand. Nach der ausgedehnten Vortriebsunterbrechung werden zusätzliche Wiedereinarbeitungseffekte spürbar.

Abschnitt 3 – Große Faltungszone: Unmittelbar nach der ersten Höhle liegt eine Störzone. Die Durchörterung nimmt insgesamt 41 AT in Anspruch, dem gegenüber stehen 9,46 AT in der Baseline. Das Delta von 31,54 AT ist vor allem den zusätzlichen Sicherungsarbeiten geschuldet.

Abschnitt 4: Hier liegen keine großen Unterschiede der geologischen Bedingungen zwischen Baseline und Ausführung vor, dementsprechend ergibt sich eine kurze Bauzeitdifferenz.

Abschnitt 5 – Moza-Formation: Im gegenständlichen Abschnitt wird die Moza-Formation durchfahren. Hier sind ebenfalls geologisch bedingte Maschinenstillstände und Sicherungsmaßnahmen erforderlich. Dies verursacht die zweitgrößte Abweichung der Abschnitte von 74 AT auf lediglich 132 Tunnelmeter.

Abschnitt 6 – Analysestrecke 1: Für den 1010 m langen Tunnelabschnitt werden 32 AT verbraucht, daraus ergibt sich eine Unterschreitung des Sollwertes von rund 4,50 AT. Eine genauere Betrachtung folgt in Kap. 6.

Abschnitt 7: Hier werden zwei Karsthöhlen angetroffen, wodurch sich eine Bauzeitabweichung von 22 AT ergibt.

Abschnitt 8 – Faltungszone: Im achten Abschnitt liegt wieder eine Störungszone vor. Das Delta von 53,78 AT ergibt sich aus den schwierigen geologischen Bedingungen und deutlich erhöhtem Sicherungsaufwand.

Abschnitt 9 – Höhle Nr. 2: Hier wird die zweite große Höhle angefahren. Das Durchfahren gelingt wesentlich unproblematischer als in Höhle Nr. 1. Die zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen resultieren in einer Bauzeitdifferenz von ca. 22 AT.

Abschnitt 10 – Analysestrecke 2: Unproblematische Vortriebsbedingungen über 1.203 m führen zu einer Bauzeitdifferenz von ca. -15 AT.

Abschnitt 11: In diesem Abschnitt finden sich wieder durchwachsene geologische Bedingungen. Hier kommen etliche Karsthöhlen zu liegen und zusätzlich ein Bereich aus quellendem Ton. Von Seiten der TBM gibt es einen Motorschaden zu verzeichnen, die Reparatur nimmt eine Dauer von 7 AT in Anspruch. Insgesamt resultiert aus diesen Umständen eine Bauzeitabweichung von 34,15 AT.

Abschnitt 12 – Analysestrecke 3: In diesem Abschnitt kann wieder eine sehr gute Leistung erbracht werden. Insgesamt sind für den 867 m langen Abschnitt 36,68 AT notwendig. Die Vortriebsleistung entspricht der Baseline.

Abschnitt 13: Im Zuge des Vortriebes werden insgesamt 4 Karsthöhlen vorgefunden. Die Bauzeitdifferenz beträgt rund 5 AT.

Abschnitt 14 – Analysestrecke 4: Im letzten Abschnitt ist nochmals eine Karsthöhle zu verzeichnen. Trotz der Erschwernisse kann der AN für den 860 m langen Abschnitt das Soll um 9 AT unterschreiten.

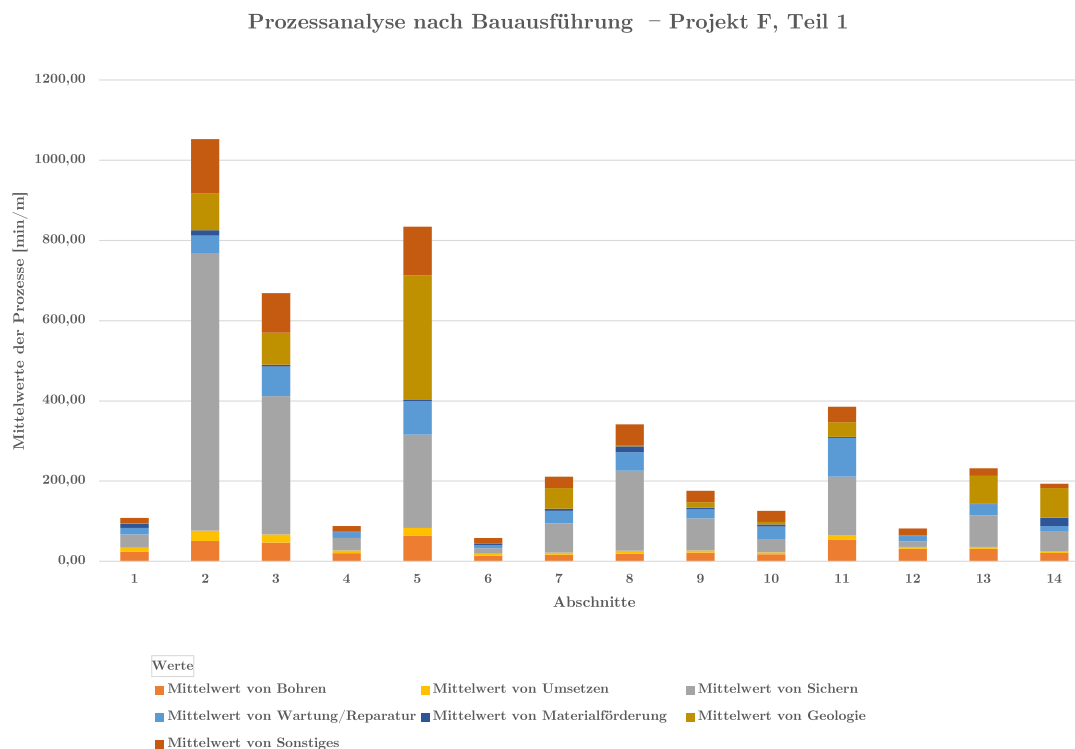


Abb. 5.19: Mittelwerte der Prozessanalyse nach Bauausführung (Ist) – Projekt F, Teil 1

Für die beschriebenen Abschnitte werden die einzelnen Prozesse der TBM-O ausgewertet. Die Mittelwerte sind in Tab. 5.12 wiedergegeben und werden in Abb. 5.19 veranschaulicht. Klar erkennbar sind die problematischen Abschnitte 2, 3, 5, 8 und 11. Meist sind in diesen Abschnitten schon die Bohr- und Umsetzzeit erhöht gegenüber den Abschnitten 6, 10, 12 und 14 (Analysestrecken). Beim Sicherungsprozess kommt der erhöhte Zeitbedarf besonders deutlich zur Geltung. Der Höchstwert liegt in Abschnitt 2 mit einem durchschnittlichen Aufwand von 692 min/m. In den Abschnitten 3, 5, 8 und 11 werden ebenfalls zwischen 146,91 min/m und 344,87 min/m verbraucht. Dem gegenüber steht der kürzeste Bedarf in Abschnitt 6 mit 13,02 min/m. Die Mittelwerte der Wartung und Reparatur sind ebenfalls unregelmäßig. Der Zeitbedarf bewegt sich zwischen 8,12 – 95,92 min/m. Materialförderungen belaufen sich auf einen Zeitbedarf von 1,34 min/m bis 21,47 min/m. Für den extra ausgewiesenen Prozess der geologisch bedingten Stillstände sind vor allem in den Abschnitten 2, 3, 5, 7, 13 und 14 große Zeitdauern zu verzeichnen. Der Höchstwert liegt bei 311,30 min/m. Für den Prozess Sonstiges gibt es großen Zeitbedarf in den Abschnitten 2, 3, 5 und 8, dort bewegen sich die Werte zwischen 53,58 – 135,51 min/m. Die restlichen Abschnitte nehmen 10,36 min/m bis 38,85 min/m in Anspruch.

Schlussendlich sind in Tab. 5.13 die Standardabweichungen der einzelnen Prozesse dargestellt. Die passende grafische Veranschaulichung als Funktionsgebirge liefert Abb. 5.20.

Tab. 5.12: Mittelwerte der Prozessanalyse nach Bauausführung (Ist) – Projekt F, Teil 1

| Abschnitt | Bohren [min/m] | Umsetzen [min/m] | Sichern [min/m] | Wartung/Rep. [min/m] | Material- förderung [min/m] | Geologie [min/m] | Sonstiges [min/m] |
|-----------|-------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 24,62 | 9,82 | 32,49 | 16,40 | 10,41 | 0,39 | 14,67 |
| 2 | 51,28 | 25,56 | 692,00 | 43,56 | 13,47 | 91,32 | 135,51 |
| 3 | 46,67 | 20,64 | 344,87 | 73,52 | 4,18 | 80,48 | 98,19 |
| 4 | 20,34 | 7,23 | 30,75 | 14,24 | 2,21 | 0,00 | 13,23 |
| 5 | 64,41 | 19,04 | 232,02 | 84,21 | 2,30 | 311,30 | 120,92 |
| 6 | 14,34 | 4,97 | 13,02 | 8,12 | 3,69 | 0,07 | 14,11 |
| 7 | 16,11 | 5,76 | 73,04 | 30,85 | 5,45 | 51,38 | 28,46 |
| 8 | 18,72 | 7,79 | 199,30 | 46,14 | 14,49 | 1,74 | 53,58 |
| 9 | 21,79 | 5,76 | 79,37 | 22,05 | 4,92 | 13,57 | 28,28 |
| 10 | 17,56 | 5,04 | 32,95 | 30,72 | 5,40 | 6,50 | 27,57 |
| 11 | 53,17 | 11,57 | 146,91 | 95,92 | 2,82 | 36,60 | 38,85 |
| 12 | 30,97 | 4,94 | 13,92 | 13,54 | 1,34 | 0,48 | 16,82 |
| 13 | 31,09 | 4,89 | 78,51 | 27,44 | 2,32 | 69,14 | 18,24 |
| 14 | 21,20 | 4,99 | 48,00 | 13,51 | 21,47 | 73,93 | 10,36 |

Prozessanalyse nach Bauausführung – Projekt F, Teil 1

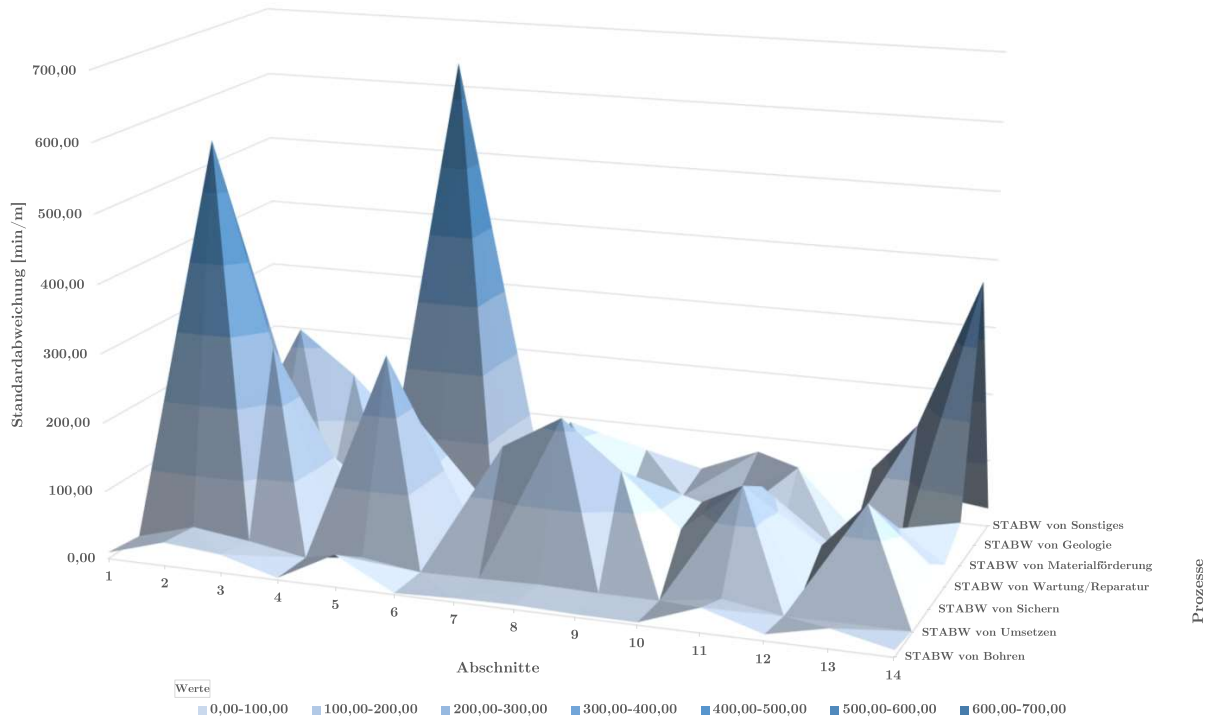


Abb. 5.20: Standardabweichung der Prozesse (Ist) – Projekt F, Teil 1

Die Abweichungen des Bohrprozesses belaufen sich auf 2,07 – 47,37 min/m. Für das Umsetzen ergeben sich Werte zwischen 1,06 – 27,47 min/m. Der Sicherungsprozess weist über fast alle Abschnitte große Unregelmäßigkeiten auf. Das Maximum liegt bei 573,34 min/m, das Minimum bei 3,89 min/m. Wartung und Reparatur verzeichnen deutliche Ausschläge in den Abschnit-

Tab. 5.13: Standardabweichung der Prozessanalyse nach Bauausführung (Ist) – Projekt F, Teil 1

| Abschnitt | Bohren [min/m] | Umsetzen [min/m] | Sichern [min/m] | Wartung/Rep. [min/m] | Material- förderung [min/m] | Geologie [min/m] | Sonstiges [min/m] |
|-----------|-------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 9,38 | 3,55 | 21,63 | 24,06 | 13,85 | 1,60 | 9,53 |
| 2 | 34,36 | 27,47 | 573,34 | 56,54 | 26,96 | 225,84 | 134,39 |
| 3 | 27,16 | 16,48 | 278,36 | 126,11 | 8,06 | 162,19 | 69,46 |
| 4 | 3,04 | 1,70 | 20,47 | 24,58 | 2,06 | 0,00 | 8,25 |
| 5 | 47,37 | 12,45 | 282,46 | 170,06 | 5,89 | 652,79 | 143,51 |
| 6 | 2,07 | 1,06 | 13,02 | 18,39 | 3,17 | 0,41 | 38,97 |
| 7 | 5,51 | 2,25 | 166,75 | 79,43 | 5,47 | 122,50 | 39,67 |
| 8 | 6,69 | 4,26 | 217,00 | 128,75 | 37,51 | 5,96 | 61,49 |
| 9 | 4,27 | 2,38 | 149,59 | 33,65 | 8,66 | 26,30 | 41,10 |
| 10 | 3,79 | 2,12 | 74,78 | 84,67 | 17,86 | 43,23 | 76,90 |
| 11 | 35,57 | 15,65 | 147,25 | 117,70 | 6,03 | 88,89 | 51,93 |
| 12 | 9,28 | 1,90 | 3,89 | 40,73 | 2,67 | 1,54 | 69,10 |
| 13 | 28,77 | 2,48 | 141,45 | 73,93 | 3,27 | 171,01 | 37,71 |
| 14 | 9,91 | 2,51 | 65,21 | 33,57 | 64,70 | 390,00 | 27,04 |

ten 3, 5, 8 und 11. Die Materialförderung verläuft überwiegend erwartungsgemäß, der größte Ausschlag findet sich in Abschnitt 14 mit 64,70 min/m. In diesem Abschnitt wird für gegenständlichen Prozess auch ein erhöhter Mittelwert verzeichnet, dem gegenüber steht jedoch, wie oben beschrieben, eine Bauzeitverkürzung um 9 AT auf eine Länge von 860 m. Es wird demnach von Einzelereignissen ausgegangen, die den Durchschnitt stark heben. Der Geologie-Prozess ist naturgemäß sehr unregelmäßig. Die Bandbreite der Standardabweichung reicht von 0,00 min/m bis 652,79 min/m. Für sonstige Arbeiten werden Werte zwischen 8,25 min/m und 143,51 min/m berechnet.

5.7 Zwischenresümee zur Bauausführung

Auf die Vielzahl der gewonnenen Erkenntnisse aus diesem Kapitel wird in den nächsten beiden Kapiteln tiefer eingegangen. In diesem Zuge ist eine Gegenüberstellung mit den kalkulierten Leistungen aus Kapitel 4 ausgearbeitet. Abschließend sollen hier für gegenständliches Kapitel die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst werden:

- Bei praktisch jedem Analyseprojekt kommt es zu einem veränderten Auftreten von Vortriebsklassen in der Bauausführung gegenüber der Kalkulation (mit Ausnahme der genau festgelegten Vortriebsabschnitte in Projekt D)
- Vortriebsunterbrechungen müssen von Seiten des AG anerkannt sein, deren Höhe ist also von den Abrechnungsmethoden des Bauherrn abhängig. Vortriebsunterbrechungen sind demnach projektspezifisch zu betrachten, was bei einem AG einer Vortriebsunterbrechung entspricht, ist bei anderen Bauherren eine Mehr- bzw. Minderkostenforderung oder resultiert in der Definition einer neuen Vortriebsklasse.
- Zur Verdeutlichung der schwierigen Prognosen hinsichtlich Zeitansätze im maschinellen Tunnelvortrieb sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Prozesse berechnet und grafisch aufbereitet. Vor allem die Standardabweichungen veranschaulichen, dass es in

einigen Prozessen große Streuungen der Zeitdauern je Hub gibt. Dies soll verdeutlichen, dass die Kalkulation der Prozesse eine sehr komplexe und herausfordernde Tätigkeit ist, die keinesfalls allen Unvorhersehbarkeiten im Laufe eines Tunnelvortriebs Rechnung tragen kann.

- Um auf die Bandbreite der Leistungswerte von Tunnelvortriebsmaschinen genauer einzugehen, wird im folgenden Kapitel eine statistische Auswertung bezüglich Maximal- und Durchschnittsleistungen vollzogen.

Kapitel 6

Leistungsanalyse und Soll – Ist-Leistungsvergleich

In diesem Kapitel sollen die Leistungen der Bauausführung spezifischer betrachtet werden. Im Hinblick auf den Bauzeitplan werden einzelne Analysestrecken, in denen keine bis minimale Vortriebsunterbrechungen bzw. Stillliegen vorkommen, festgelegt und genauer betrachtet. Daraus können Rückschlüsse auf die Maschinenleistungen im Regelvortrieb gezogen werden. Zusätzlich erfolgt eine statistische Auswertung von Leistungen pro Arbeitstag (m/AT) bzw. Leistungen pro Stunde (m/h). Die Auswertungen richten sich nach den vorliegenden Unterlagen der Vortriebsaufzeichnungen, je nach Maschine sind diese unterschiedlich und müssen daher extra betrachtet werden. Die Leistungen in Meter pro Stunde dürfen nicht auf einen gesamten Arbeitstag umgelegt werden, da hier oft Zwischenzeiten nicht ausweisbar sind, und somit zu gut bewertete Leistungen resultieren würden.

Über die Leistungsbetrachtungen hinaus nimmt dieses Kapitel Bezug auf die Abweichungen der Vorgangzeiten eines TVM-Vortriebes zwischen Ausschreibung/Kalkulation und Bauausführung. Hierbei sind die Vorgangsdauern immer auf die ausgeschriebene Länge im Soll (Ausschreibung) und die tatsächlich vorgetriebene Länge im Ist (Bauausführung) bezogen. Dadurch wird mit unter die Bauzeit von verschiedenen Längen verglichen, jedoch nimmt man Abstand von einer fiktiven Bauzeit, welche auf die tatsächliche Ausführungslänge bezogen wird, da für diese die Vorgänge (z.B. Regelvortrieb und Vortriebsunterbrechungen) nicht zu gleichen Verhältnissen verkürzt bzw. verlängert werden sollen. Auf diese Weise generiert sich keine Bezugs-Bauzeit, welche mit unter spezifischen geologischen Verhältnissen, zum Beispiel Störstellen in Abschnitten die durch die Anpassung weg fallen, keine Rechnung trägt. Aus den berechneten Abweichungen wird ebenfalls die Verantwortung der Einzelvorgänge an der Gesamtabweichung dargestellt.

Mit Hilfe der Analysen von Differenzen zwischen Soll und Ist wird verdeutlicht, wie komplex die Planung und Ausführung großer Tunnelbauprojekte ist. Zum heutigen Zeitpunkt ist es nur begrenzt möglich, treffende Prognosen, die der späteren Ausführung entsprechen, in hinreichend genauem Maße zu erstellen. Diese Diplomarbeit soll mit unter auch zukünftigen Ausschreibenden ein Grundgefühl über die Wichtigkeit von dem Bauablauf vorgelagerten Arbeiten, wie Vorerkundungen und Vortriebseinteilung, vermitteln. Den Ausführenden Tunnelbauern werden Ihre Leistungen veranschaulicht. Einerseits mit den Regelvortriebsleistungen im ungestörten Bereich, andererseits sind die Projekte ganzheitlich zu betrachten, und so müssen auch Vortriebsunterbrechungen und andere arbeitserschwerende Vorkommnisse der Betrachtung hinzu gezogen werden.

6.1 Leistungsanalyse – Projekt A

Die gesamte Leistungsanalyse der zwei Vortriebe aus Projekt A wird in *Forschungsbericht – Leistungsanalyse ausgewählter Projekte im maschinellen Tunnelbau* [15] separat dargestellt. In diesem Abschnitt werden nur Analysestrecken zu den vollbrachten Vortriebsleistungen angegeben,

mit denen sich diese Diplomarbeit grundsätzlich beschäftigt. Dadurch soll eine Übersicht der Leistungen von Doppelschildmaschinen geboten werden.

6.1.1 Vortrieb 1

In Abb. 6.1 ist der tatsächliche Bauzeitverlauf dargestellt. Es werden sieben Analysestrecken definiert, zu diesen können genauere Vortriebsleistungen auf entsprechend aussagekräftigen Streckenabschnitten angegeben werden. Hierbei wird darauf geachtet, dass die Analysestrecken frei von größeren Vortriebsunterbrechungen bzw. Abgängen und Stillliegen sind. Kurze Vortriebsunterbrechungen sind für die Berechnung der mittleren Leistung in Tab. 6.1 von der Dauer [AT] abgezogen. Die Betrachtung bezieht sich auf die reine Regelvortriebszeit über die entsprechende Strecke.

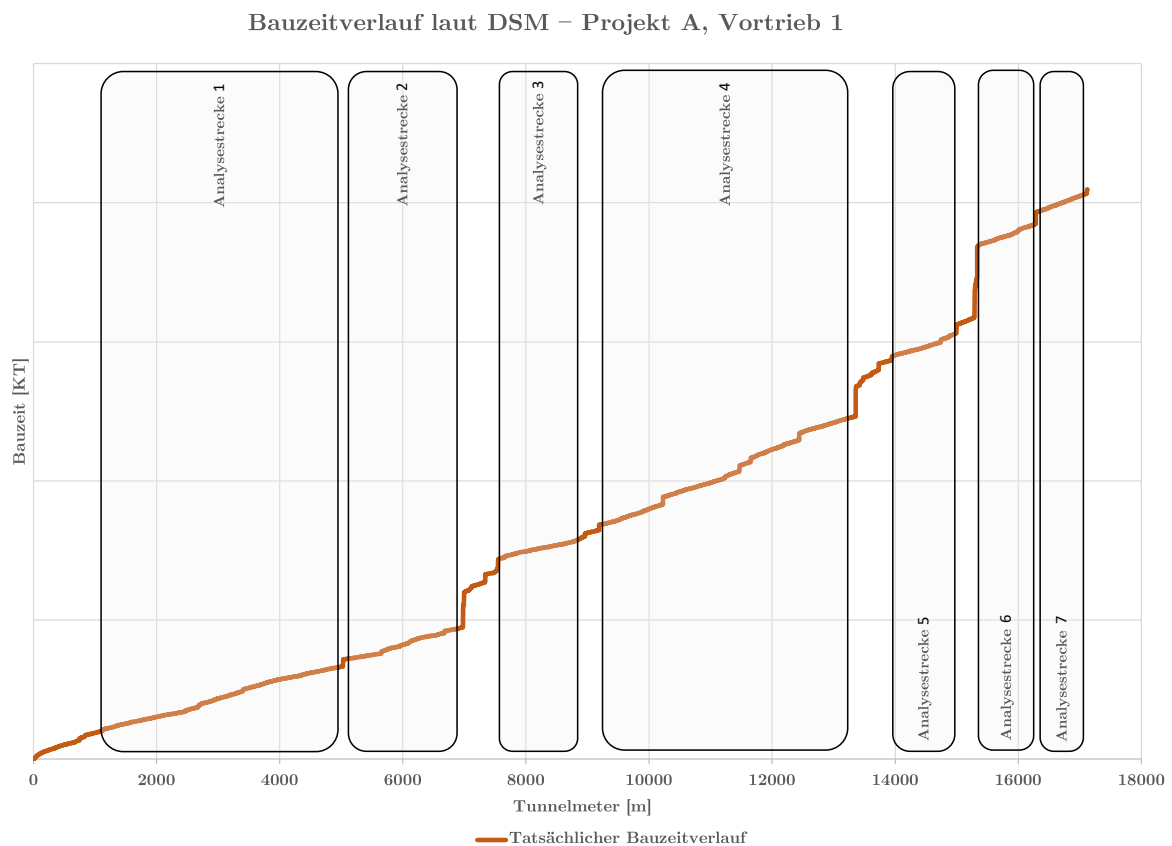


Abb. 6.1: Bauzeitverlauf laut DSM und Analysestrecken – Projekt A, Vortrieb 1

Die beste Leistung wird in Analysestrecke 3 mit 18,24 m/AT auf eine Länge von 1.356,58 m im mittleren Vortriebsteil erzielt. Im vorderen Tunnelteil werden in Analysestrecke 1 eine Leistung von 17,81 m/AT und in Analysestrecke 2 von 17,70 m/AT jeweils über Längen von 4.081 m und 1.946 m erbracht. In Analysestrecke 4 sind Abschnitte mit diversen kurzen Vortriebsunterbrechungen und Stilliegen zusammengefasst, hier ergibt sich eine reine Vortriebszeit von 359 AT über eine Länge von 4.162 m. Dies entspricht einer Leistung von 11,59 m/AT. Im hinteren Tunnelteil liegen die Vortriebsleistungen der Analysestrecken bei 12,34 – 14,16 m/AT.

Tab. 6.1: Auswertung Analysestrecken – Projekt A, Vortrieb 1

| Bezeichnung | Station | | Länge [m] | Dauer [AT] | mittlere Leistung [m/AT] |
|------------------|-----------|-----------|--------------|---------------|--------------------------------|
| | von [m] | bis [m] | | | |
| Analysestrecke 1 | 943,66 | 5.024,89 | 4.081,23 | 229,14 | 17,81 |
| Analysestrecke 2 | 5.032,49 | 6.978,77 | 1.946,27 | 109,98 | 17,70 |
| Analysestrecke 3 | 7.600,88 | 8.957,47 | 1.356,58 | 74,39 | 18,24 |
| Analysestrecke 4 | 9.191,50 | 13.354,22 | 4.162,72 | 359,06 | 11,59 |
| Analysestrecke 5 | 13.945,93 | 14.994,42 | 1.048,49 | 74,05 | 14,16 |
| Analysestrecke 6 | 15.397,74 | 16.284,25 | 886,51 | 66,94 | 13,24 |
| Analysestrecke 7 | 16.289,96 | 17.108,04 | 818,08 | 66,32 | 12,34 |

6.1.2 Vortrieb 2

Für Vortrieb 2 wird der Bauzeitverlauf in Abb. 6.2 veranschaulicht. Hier ist deutlich ersichtlich, dass der tatsächliche Bauzeitverlauf bis ca. Tunnelmeter 8.000 ohne große Ereignisse verläuft. In diesem Abschnitt kommen die Analysestrecken 1 – 4 zu liegen. Anschließend folgt der mittlere Tunnelteil mit vielen kurzen Vortriebsunterbrechungen. Im letzten Tunnelabschnitt befinden sich die Analysestrecken 5 – 7. Hier konnten wieder Regelvortriebe im Ausmaß von ungefähr 1.000 m erzielt werden, bevor Vortriebsunterbrechungen auftreten. Am Tunnelende liegt die weitaus größte Vortriebsunterbrechung. In Tab. 6.2 werden die sieben Analysestrecken veranschaulicht. Hier erfolgt wiederum die Bewertung der Dauer in reiner Arbeitszeit ohne Vortriebsunterbrechungen, Stillliegen und Zusatzzeiten. Die beste mittlere Vortriebsleistung kann in Analysestrecke 3 mit 24,69 m/AT über eine Länge von 1.443,93 m erzielt werden. Die weiteren Leistungen im vorderen Tunnelteil liegen in den Analysestrecken 1, 2 und 4 zwischen 18,76 – 20,89 m/AT. In Analysestrecke 1 kann die gute Vortriebsleistung auf eine Länge von rund 2.510 m gehalten werden. Im hinteren Tunnelabschnitt sind die Durchschnittsleistungen etwas geringer ausgefallen, sie bewegen sich zwischen 13,14 m/AT und 15,23 m/AT.

Tab. 6.2: Auswertung Analysestrecken – Projekt A, Vortrieb 2

| Bezeichnung | Station | | Länge [m] | Dauer [AT] | mittlere Leistung [m/AT] |
|------------------|-----------|-----------|--------------|---------------|--------------------------------|
| | von [m] | bis [m] | | | |
| Analysestrecke 1 | 1.174,00 | 3.683,88 | 2.509,88 | 130,12 | 19,29 |
| Analysestrecke 2 | 3.687,69 | 5.576,86 | 1.889,17 | 90,45 | 20,89 |
| Analysestrecke 3 | 5.580,66 | 7.024,59 | 1.443,93 | 58,48 | 24,69 |
| Analysestrecke 4 | 7.159,66 | 8.316,33 | 1.156,68 | 61,65 | 18,76 |
| Analysestrecke 5 | 10.901,63 | 12.366,46 | 1.464,83 | 101,61 | 14,42 |
| Analysestrecke 6 | 12.372,17 | 13.694,42 | 1.322,26 | 86,80 | 15,23 |
| Analysestrecke 7 | 14.347,00 | 15.273,53 | 926,54 | 70,50 | 13,14 |

6.2 Leistungsanalyse – Projekt B

In Projekt B werden bei der Bauzeit die angebotenen Leistungen des AN im Allianzvertrag mit der Bauausführung verglichen. Der Allianzvertrag bietet eine verschmierte Vortriebsleistung von

Bauzeitverlauf laut DSM- Projekt A, Vortrieb 2

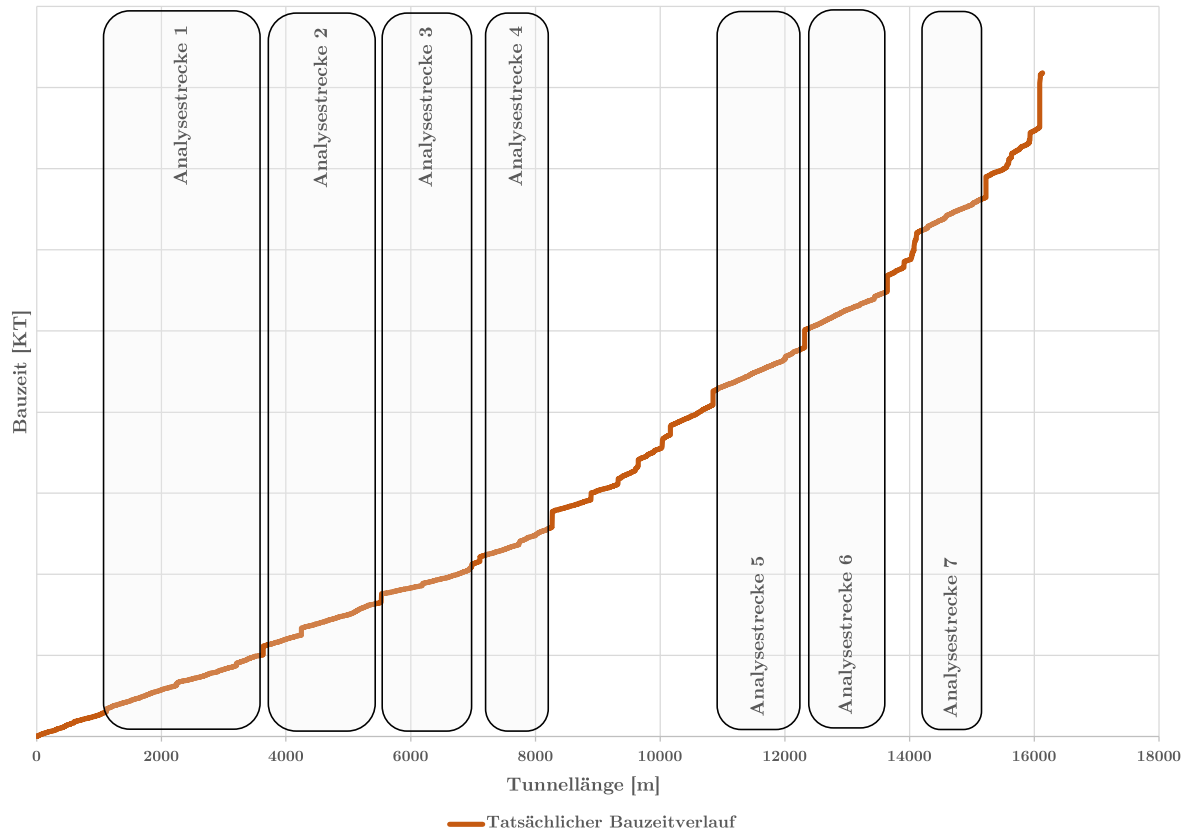


Abb. 6.2: Bauzeitverlauf laut DSM und Analysestrecken – Projekt A, Vortrieb 2

16,00 m/AT. In dieser sind sowohl der Regelvortrieb als auch allfällige Vortriebsunterbrechungen enthalten. Für die Gegenüberstellung der Vorgänge im Soll und Ist sind als Anhaltspunkt der kalkulierten Vortriebsunterbrechungen die vom AG in der Erst-Ausschreibung *Gemeinschaftskraftwerk Inn – Ausschreibung, Bauzeitermittlung* [25] angegebenen Arbeitstage herangezogen. Weiters müssen die Abgänge von der Baustelle zum Vergleich hinzu gezogen werden, da sich die angebotene Leistung auf Arbeitstage bezieht. Die Abgänge im Soll sind auf Grund der angegebenen Leistung in Meter pro Arbeitstag mit 0 beziffert. Abgänge im Ist ergeben sich aus der Vortriebsdokumentation *Vortriebsmeldungen – Projekt B* [7].

6.2.1 TVM Süd

Die Bauzeitgegenüberstellung für TVM Süd ist in Abb. 6.3 grafisch veranschaulicht. Zwischen den großen Vortriebsunterbrechungen werden vier Analysestrecken definiert, um die mittleren Vortriebsleistungen zu berechnen.

Tab. 6.2 zeigt die vier Analysestrecken mit deren Länge, Dauer in Arbeitstagen und mittlerer Leistung. Die höchste Vortriebsleistung ergibt sich in Strecke 4 mit durchschnittlich 25,02 m/AT über eine Länge von rund 2.952 m. In den Analysestrecken 2 und 3 werden ebenfalls hohe Leistungen von 19,30 m/AT und 20,95 m/AT über Längen von 3.724 m und 1.215 m erreicht. In Analysestrecke 1 im vorderen Tunnelabschnitt ergibt sich eine eher geringere Leistung von 12,98 m/AT auf einer Länge von ca. 2.232 m.

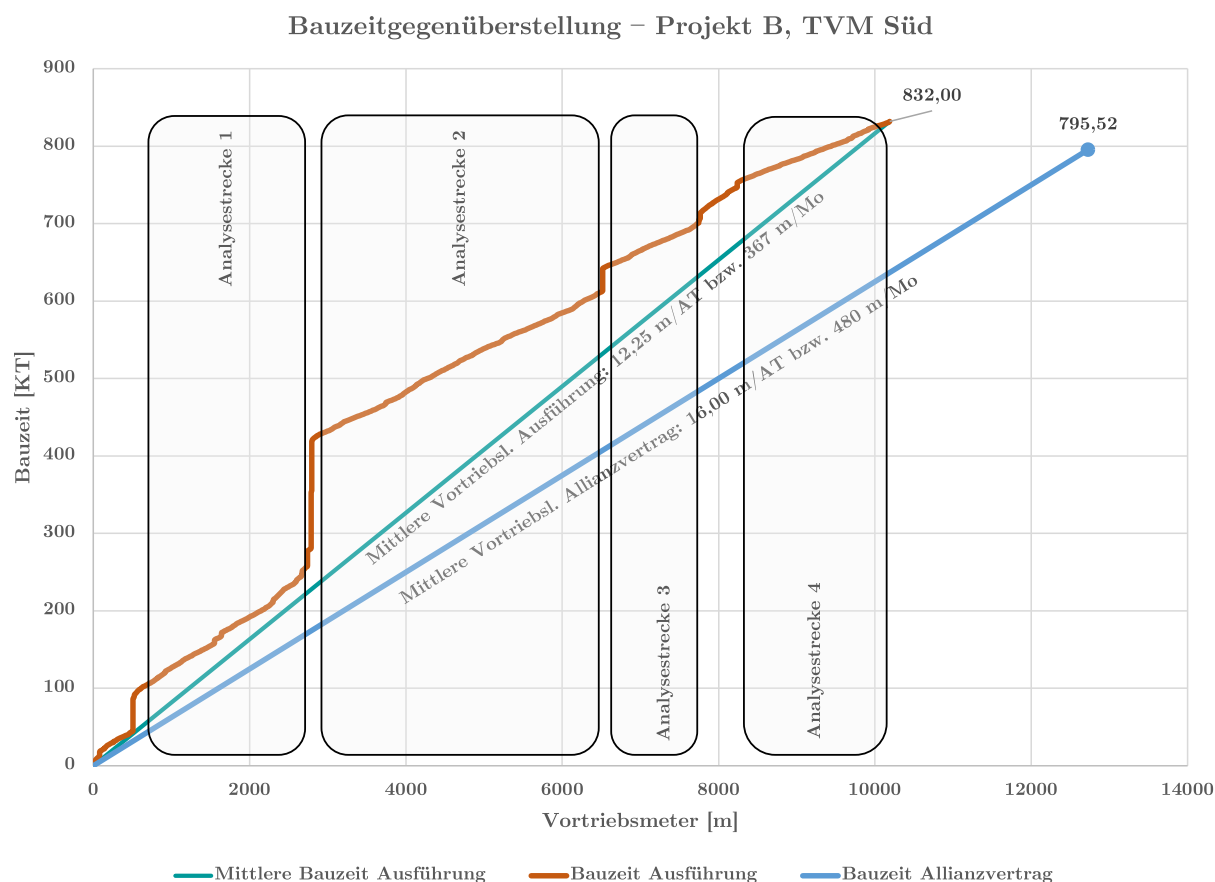


Abb. 6.3: Bauzeitgegenüberstellung und Analysestrecken – Projekt B, TVM Süd

Tab. 6.3: Auswertung Analysestrecken – Projekt B, TVM Süd

| Bezeichnung | Station | | Länge [m] | Zeitraum | | Dauer [AT] | mittlere Leistung [m/AT] |
|------------------|----------|-----------|--------------|------------|------------|---------------|--------------------------------|
| | von [m] | bis [m] | | Anfang | Ende | | |
| Analysestrecke 1 | 508,72 | 2.740,49 | 2.231,77 | 24.06.2017 | 13.12.2017 | 172,00 | 12,98 |
| Analysestrecke 2 | 2.795,70 | 6.520,10 | 3.724,40 | 24.05.2018 | 03.12.2018 | 193,00 | 19,30 |
| Analysestrecke 3 | 6.531,74 | 7.746,99 | 1.215,25 | 02.01.2019 | 01.03.2019 | 58,00 | 20,95 |
| Analysestrecke 4 | 8.238,88 | 10.190,79 | 1.951,91 | 23.04.2019 | 10.07.2019 | 78,00 | 25,02 |

Bei der vorgetriebenen Tunnellänge liegt laut Tab. ?? eine Abweichung von -2.537 m bzw. -19,94 % im Bezug zur Ausschreibungslänge vor. Die Zeitdauern in Tab. 6.4 sind, wie eingangs erwähnt, auf die jeweilige Soll- bzw. Ist-Länge bezogen. Die Bauzeitabweichung in Arbeitstagen beträgt 23,86 %, das entspricht ca. 154 AT. Für den Regelvortrieb werden rund 47 AT weniger benötigt, als aus der Ausschreibung und Kalkulation hervorgeht. Dieser Umstand wirkt sich positiv auf die Bauzeitabweichung aus, sie wird um -24,86 % gemindert. Es sind deutlich mehr Vortriebsunterbrechungen aufgetreten, als in der Erstausschreibung veranschlagt. Statt 20 AT ergeben sich aus der Bauausführung rund 225 AT, dies entspricht einer Abweichung von 205 KT. Dieser Vorgang nimmt einen Anteil von 109 % an der Bauzeitabweichung ein. Wassererschwernisse sind aus der Dokumentation der Bauausführung nicht herauszufiltern. Abgänge nehmen in der Bauausführung einen Zeitraum von 34 KT in Anspruch. In Summe

werden statt den veranschlagten 644 AT für 12.728 Tunnelmeter tatsächlich 798 AT für ca. 10.191 Tunnelmeter gebraucht.

Tab. 6.4: Gegenüberstellung der Vorgänge und Bauzeitabweichungen – Projekt B, TVM Süd

| TVM Süd | Soll | Ist | Abweichung von Soll-Länge | |
|------------------------|--------------|-------------|---------------------------|----------------------|
| Länge | 12.728,24 m | 10.190,79 m | -2.537,45 m | -19,94 % |
| Vorgang | Bauzeit Soll | Bauzeit Ist | Bauzeit Abweichung | Anteil an Abweichung |
| Regelvortrieb | 619,68 AT | 573,00 AT | -46,68 AT | -24,86 % |
| Vortriebsunterbrechung | 20,00 AT | 225,00 AT | 205,00 AT | 109,19 % |
| Wassererschwerms | 4,58 AT | 0,00 AT | -4,58 KT | -2,44 % |
| Stillliegen – Abgänge | 0,00 KT | 34,00 KT | 34,00 KT | 18,11 % |
| Summe Arbeitstage | 644,26 AT | 798,00 AT | 153,74 AT | |
| Summe Kalendertage | 644,26 KT | 832,00 KT | 187,74 KT | |
| Bauzeitabweichung | | | 23,86 % (AT) | |

Die oben beschriebenen Vorgangsdauern werden in Abb. 6.4 als Soll- und Ist-Dauer grafisch veranschaulicht. Die Herkunft der Abweichungen veranschaulicht Abb. 6.5. Klar verantwortlich für

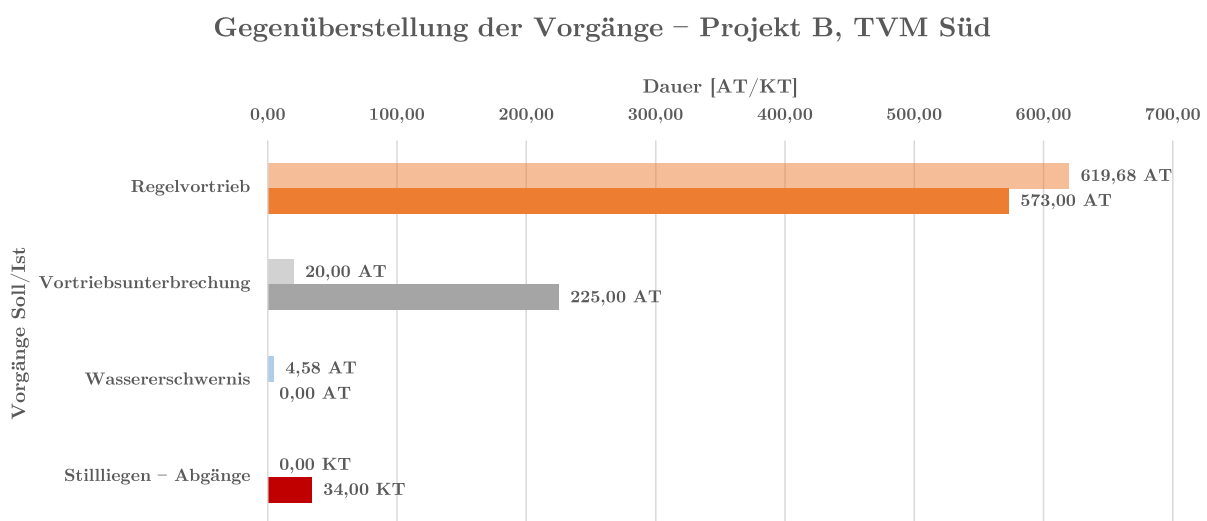


Abb. 6.4: Gegenüberstellung der Vorgänge – Projekt B, TVM Süd

die Bauzeiterhöhung zeigen sich die Vortriebsunterbrechungen mit 109 %. Die Wassererschwerms fallen negativ aus, da es keine Referenzmenge im Ist gibt. Auf die Darstellung der Abgänge wird verzichtet, da es keine Referenzmenge im Soll gibt.

Tab. 6.5 gibt die statistische Auswertung der Vortriebsleistungen wieder. Da in der Dokumentation keine Vortriebsklassen ausgewiesen sind, werden die Leistungen auf den gesamten Regelvortrieb bezogen. Die Tageshöchstleistung liegt bei 37,37 m. Das 95 % Quantil bei 29,93 m pro Arbeitstag. Der Median stellt dar, dass in der Hälfte der gesamten Arbeitstage eine Tagesleistung von 18,26 m/AT überschritten wird.

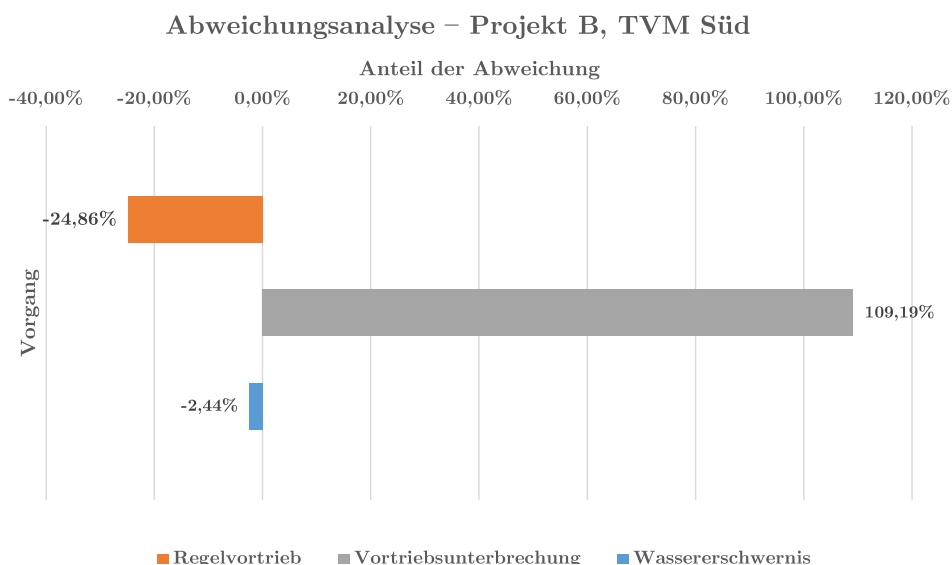


Abb. 6.5: Abweichungsanalyse – Projekt B, TVM Süd

Tab. 6.5: Statistische Angaben zur Vortriebsleistung – Projekt B, TVM Süd

| Vortriebsklasse | Maximum [m/AT] | 95 % Quantil [m/AT] | Median [m/AT] |
|-----------------|-------------------|------------------------|------------------|
| Regelvortrieb | 37,37 | 29,93 | 18,26 |

6.2.2 TVM Nord

Der Vortrieb von TVM Nord wird analog der TVM Süd behandelt. Im Zuge der Bauausführung findet wiederum eine Verkürzung der ausgeschriebenen Tunnellänge von 8.940,19 m auf 7.790,00 m statt. In Abb. 6.6 sind die Bauzeiten aus der Ausschreibung/Allianzvertrag und Bauausführung gegenübergestellt. Für die Ausführungslänge werden insgesamt 647 KT beansprucht. Der Vortriebsbeginn bis Tunnelmeter 1.200 verläuft unregelmäßig. Anschließend ist Analysestrecke 1 bis zur ersten großen Vortriebsunterbrechung definiert. Die zweite große Vortriebsunterbrechung liegt unweit der ersten. Danach verläuft der Vortrieb weitaus unproblematischer, es treten nur kürzere Unterbrechungen des Regelvortriebs auf. An diesen Punkten beginnen bzw. enden jeweils die Analysestrecken 2 – 4.

In Tab. 6.6 sind die Analysestrecken dargestellt. Die beste mittlere Vortriebsleistung wird in Strecke 1 mit 19,75 m/AT über eine Länge von ca. 1.284 m erzielt. In Analysestrecke 3 kommt es ebenso zu einer hohen Leistung mit 19,04 m/AT bei einer Streckenlänge von rund 1.885 m. Analysestrecke 2 liefert eine etwas schlechtere Leistung von durchschnittlich 15,54 m/AT, jedoch weist dieser Abschnitt mehrere kleine Störungen auf. In Analysestrecke 4 ergibt sich eine Leistung von 17,83 m/AT über 1.658 m.

Die Abweichungen von Vortriebslänge und Bauzeit, mit Bedacht auf die Dauer der unterschiedlichen Vorgänge, zeigt Tab. 6.7. Die Soll-Vortriebslänge wird um 1.150 m unterschritten, was einer Abweichung von 12,87 % entspricht. Für den Vortrieb mit einer Länge von 8.940 m sind rund 469 AT angedacht, tatsächlich resultieren aus einer Länge von 7.790 m 621 AT. Dies entspricht einer Abweichung von insgesamt 152,21 AT beziehungsweise 32,47 % bezogen auf die Ausgangsdauer. Der Regelvortrieb hat daran einen Anteil von 10,70 AT bzw. 6,01 %. Statt den 15 AT an Vortriebsunterbrechungen ergeben sich im Verlauf der Bauausführung insgesamt

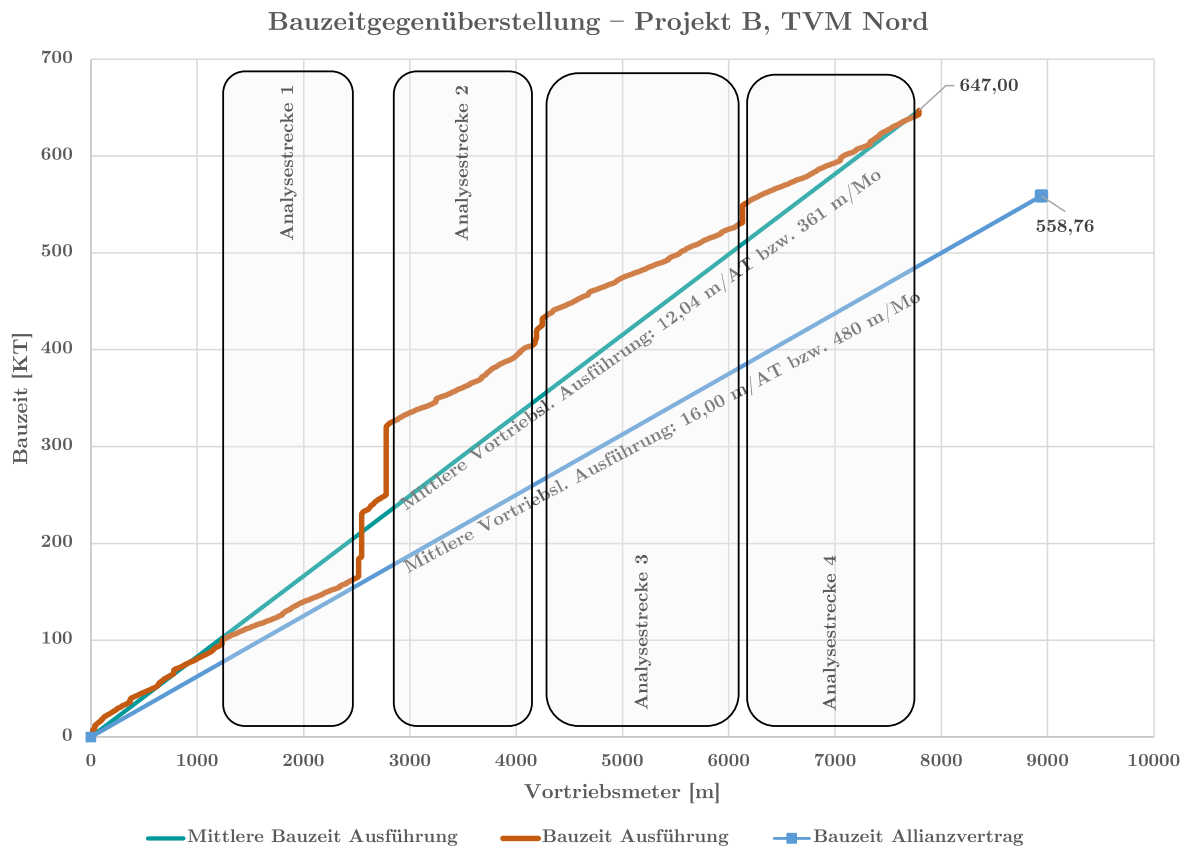


Abb. 6.6: Bauzeitgegenüberstellung und Analysestrecken – Projekt B, TVM Nord

Tab. 6.6: Auswertung Analysestrecken – Projekt B, TVM Nord

| Bezeichnung | Station | | Länge [m] | Zeitraum | | Dauer [AT] | mittlere Leistung [m/AT] |
|------------------|----------|----------|--------------|------------|------------|---------------|--------------------------------|
| | von [m] | bis [m] | | Anfang | Ende | | |
| Analysestrecke 1 | 1.235,36 | 2.519,07 | 1.283,71 | 10.10.2017 | 14.12.2017 | 65,00 | 19,75 |
| Analysestrecke 2 | 2.776,10 | 4.190,07 | 1.413,97 | 18.05.2018 | 17.08.2018 | 91,00 | 15,54 |
| Analysestrecke 3 | 4.245,44 | 6.130,34 | 1.884,90 | 07.09.2018 | 15.12.2018 | 99,00 | 19,04 |
| Analysestrecke 4 | 6.130,34 | 7.788,35 | 1.658,01 | 02.01.2019 | 05.04.2019 | 93,00 | 17,83 |

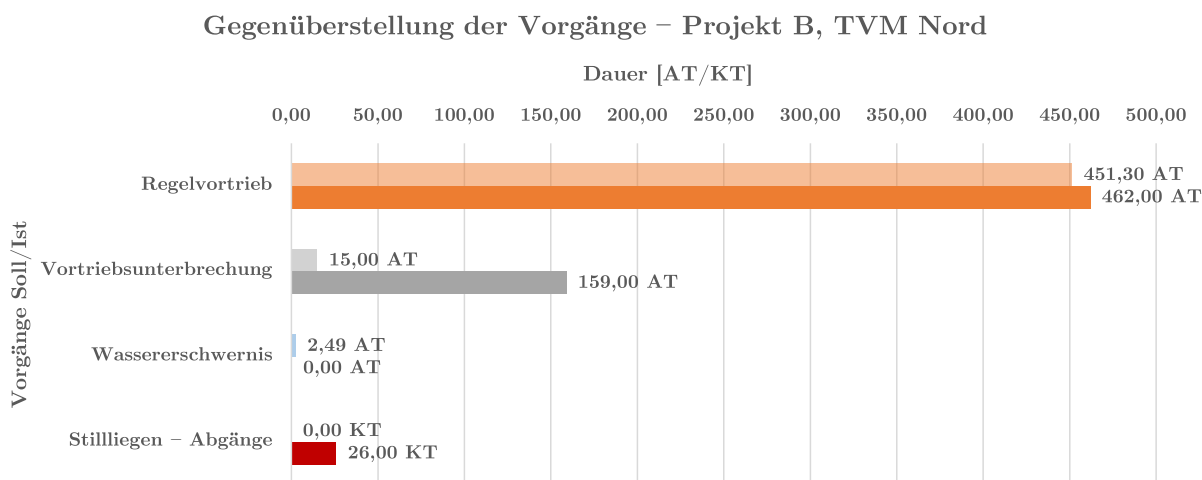
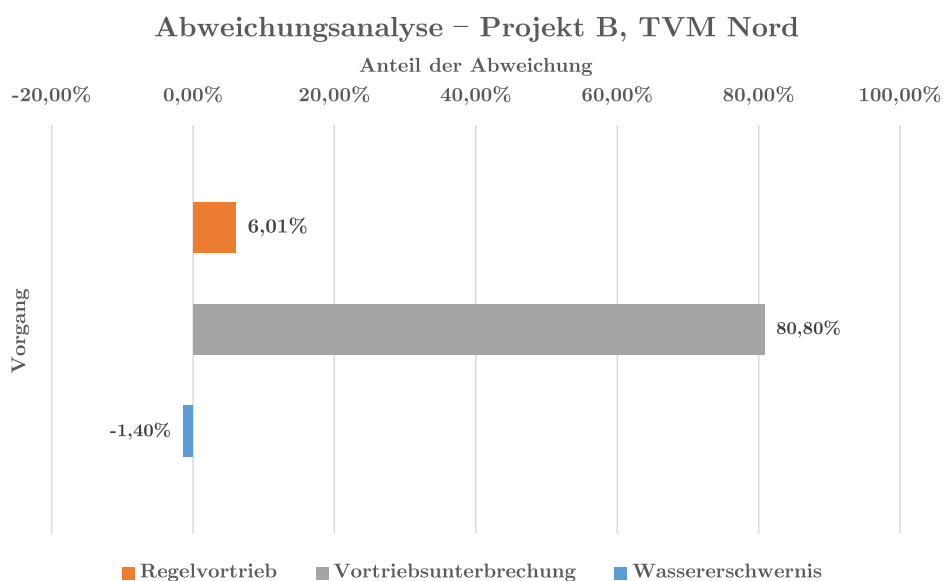
159 AT. Die Differenz beträgt 144 AT, dies ergibt einen Anteil an der Bauzeitabweichung von 80,80 %. Der Einfluss der Wassererschwernisse kann auf Grund fehlender Dokumentation nicht ausgewiesen werden. Für die Abgänge ist im Soll keine Anzahl angegeben, im Ist werden 26 KT beansprucht.

Abb. 6.7 zeigt die Gegenüberstellung der beschriebenen Vorgänge. Abb. 6.8 stellt die oben genannten Anteile an der Bauzeitabweichung grafisch dar. Der Regelvortrieb nimmt 6,01 % ein. Die Vortriebsunterbrechungen belaufen sich auf einen Anteil von 80,80 % und fallen damit klar am stärksten ins Gewicht. Die Wassererschwernisse sind negativ, da sie im Ist nicht ausweisbar sind. Auf die Darstellung der Abgänge wird verzichtet.

Tab. 6.7: Gegenüberstellung der Vorgänge und Bauzeitabweichungen – Projekt B, TVM Nord

| TVM Nord | Soll | Ist | Abweichung von Soll-Länge | |
|----------|------------|------------|---------------------------|----------|
| Länge | 8.940,19 m | 7.790,00 m | -1.150,19 m | -12,87 % |

| Vorgang | Bauzeit Soll | Bauzeit Ist | Bauzeit Abweichung | Anteil an Abweichung |
|------------------------|--------------|-------------|--------------------|----------------------|
| Regelvortrieb | 451,30 AT | 462,00 AT | 10,70 AT | 6,01 % |
| Vortriebsunterbrechung | 15,00 AT | 159,00 AT | 144,00 AT | 80,80 % |
| Wassererschwernis | 2,49 AT | 0,00 AT | -2,49 AT | -1,40 % |
| Stillliegen – Abgänge | 0,00 KT | 26,00 KT | 26,00 KT | 14,59 % |
| Summe Arbeitstage | 468,79 AT | 621,00 AT | 152,21 AT | |
| Summe Kalendertage | 468,79 KT | 647,00 KT | 178,21 KT | |
| Bauzeitabweichung | | | 32,47 % (AT) | |

**Abb. 6.7:** Gegenüberstellung der Vorgänge – Projekt B, TVM Nord**Abb. 6.8:** Abweichungsanalyse – Projekt B, TVM Nord

Abschließend können auch für TVM Nord statistische Kennwerte in Tab. 6.8 angegeben werden. Das Maximum an aufgefahrenen Tunnelmetern liegt bei 33,58 m/AT. Das 95 % Quantil gibt eine Vortriebsleistung von 26,60 m/AT an. In der Hälfte der Regelvortriebstage wird laut Median eine Leistung von 17,51 m/AT überschritten.

Tab. 6.8: Statistische Angaben zur Vortriebsleistung – Projekt B, TVM Nord

| Vortriebsklasse | Maximum [m/AT] | 95 % Quantil [m/AT] | Median [m/AT] |
|-----------------|-------------------|------------------------|------------------|
| Regelvortrieb | 33,58 | 26,60 | 17,51 |

6.3 Leistungsanalyse – Projekt C

Die gesamte Leistungsanalyse von Projekt C wird ebenfalls separat in *Forschungsbericht – Leistungsanalyse ausgewählter Projekte im maschinellen Tunnelbau* [15] dargestellt. Hier werden stellvertretend die Leistungsauswertungen der TBM-O überblicksartig angegeben. Die Leistungen in Projekt C sind über einen Großteil der Tunnellänge sehr hoch ausgefallen. Abb. 6.9 zeigt den tatsächlichen Bauzeitverlauf laut den Aufzeichnungen der TBM-O. Im vorderen Tunnelteil sind einige Unregelmäßigkeiten und steile Verläufe der Bauzeit zu erkennen. Die Analysestrecke 1 versucht eine mittlere Vortriebsleistung über einen frei von Vortriebsunterbrechungen gelegenen Abschnitt zu bestimmen. Anschließend treten auf der restlichen Tunnellänge nur mehr vereinzelte Vortriebsunterbrechungen bzw. Stillliegen auf. Die Analysestrecken 2 – 6 grenzen die Regelvortriebe zwischen diesen ein.

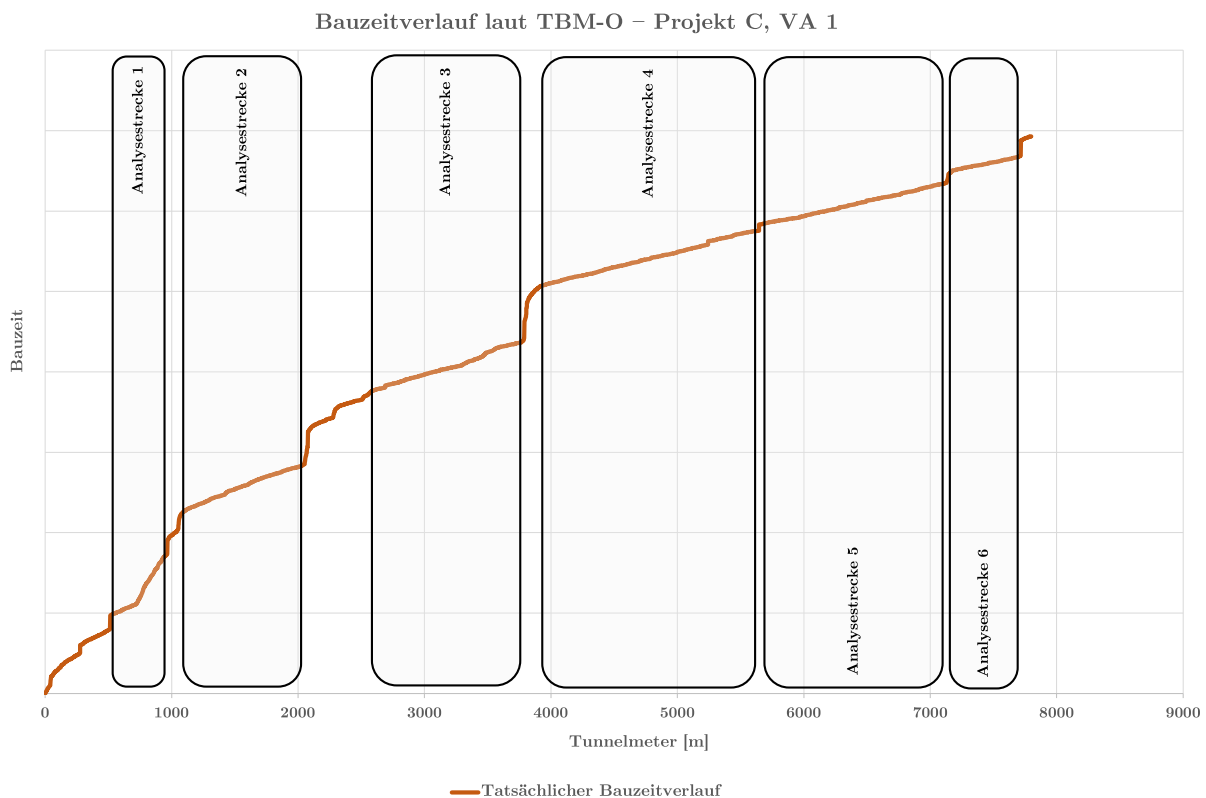


Abb. 6.9: Bauzeiverlauf laut TBM-O und Analysestrecken – Projekt C

In Tab. 6.9 werden die sechs Analysestrecken ausgewertet. Strecke 1 weist eine sehr geringe Durchschnittsleistung von 6,14 m/AT auf. Dies resultiert aus dem steilen Anstieg im Bauzeitplan. Die restlichen Analysestrecken ergeben mit unter sehr hohe Durchschnittsleistungen. Den höchsten Wert erzielt Strecke 5 mit einer mittleren Leistung von 33,41 m/AT über eine Länge von rund 1.481 m. Mit 31,77 m/AT folgt Analysestrecke 6 am Ende des ersten Vortriebsabschnittes. Die mittleren Vortriebsleistungen der Strecken 2 – 4 liegen zwischen 19,00 m/AT und 28,95 m/AT.

Tab. 6.9: Auswertung Analysestrecken – Projekt C

| Bezeichnung | Station | | Länge [m] | Dauer [AT] | mittlere Leistung [m/AT] |
|------------------|----------|----------|--------------|---------------|--------------------------------|
| | von [m] | bis [m] | | | |
| Analysestrecke 1 | 511,70 | 960,50 | 448,80 | 73,11 | 6,14 |
| Analysestrecke 2 | 1.123,70 | 2.045,10 | 921,40 | 48,49 | 19,00 |
| Analysestrecke 3 | 2.612,90 | 3.775,70 | 1.162,80 | 52,98 | 21,95 |
| Analysestrecke 4 | 3.872,60 | 5.637,20 | 1.764,60 | 60,95 | 28,95 |
| Analysestrecke 5 | 5.642,30 | 7.123,00 | 1.480,70 | 44,31 | 33,41 |
| Analysestrecke 6 | 7.179,10 | 7.709,50 | 530,40 | 16,70 | 31,77 |

6.4 Leistungsanalyse – Projekt D

Für die Gegenüberstellung der Bauzeit werden Baseline und Ausführungsbauzeitplan herangezogen. Da der tatsächliche Vortriebsbeginn von den Annahmen der Baseline abweicht, scheinen die verzeichneten Stillliegen zufolge Abgängen in Abb. 6.10 nicht untereinander auf. Es ergibt sich ebenfalls ein anderer Startpunkt des Tunnelvortriebs zufolge vermehrten Ausbruches im Sprengvortrieb. Über den gesamten Bauzeitverlauf sind vier, für Durchschnittsleistungen repräsentative, Analysestrecken gewählt. Die Einarbeitungslänge zu Tunnelbeginn wird dabei nicht herangezogen, ebenfalls werden Bereiche mit deutlich schlechteren Leistungen auf Grund von Erschwernissen ausgeklammert. Der Onshore-Teil des Tunnels befindet sich zwischen Vortriebsbeginn und Verschiebung der TBM-O, der Offshore-Teil reicht anschließend bis zum Tunnelende. Die Analysestrecken 1 – 3 liegen am Festland, Analysestrecke 4 erstreckt sich über den größten Teil des Tunnels unter dem See.

In Tab. 6.10 sind die Auswertungen der Analysestrecken verzeichnet. Analysestrecke 1 weist über eine Länge von 1.345 m eine mittlere Leistung von 28,54 m/AT auf. Eine noch höhere Vortriebsleistung wird danach in Strecke 2 mit 34,66 m/AT über 709 m verzeichnet. Analysestrecke 3 ergibt die schlechteste mittlere Leistung am Festland mit durchschnittlich 20,21 m/AT. Im Offshore Teil des Projektes sind die Vortriebsleistungen deutlich geringer. Hier ergibt sich für Analysestrecke 4 eine mittlere Tagesleistung von 14,47 m an Tunnelausbruch über eine Länge von 1.331 m.

In Tab. 6.11 werden Tunnellänge, Bauzeit und Vorgangszeiten gegenübergestellt. Da in diesem Projekt arbeitsfreie Wochenenden auftreten, werden die Zeitdauern in Arbeits- und Kalendertagen unterschieden. Die Tunnellänge weist in der Bauausführung eine Abweichung von -31,56 m auf, dies entspricht -0,50 % der Ausgangslänge. Die Baseline ergibt eine angedachte Bauzeit von 183 AT bzw. 266 KT, tatsächlich werden für den Vortrieb rund 347 AT bzw. 476 KT benötigt. Demnach resultieren Bauzeitabweichungen von 164 AT, was einem Anteil von 89,88 % an der Ausgangsbauzeit entspricht, beziehungsweise 210 KT oder 78,95 %. Für den Regelvortrieb werden 148 AT erlöst, daraus resultiert eine Differenz von ca. -11 AT im Vergleich zur Baseline. Der Anteil

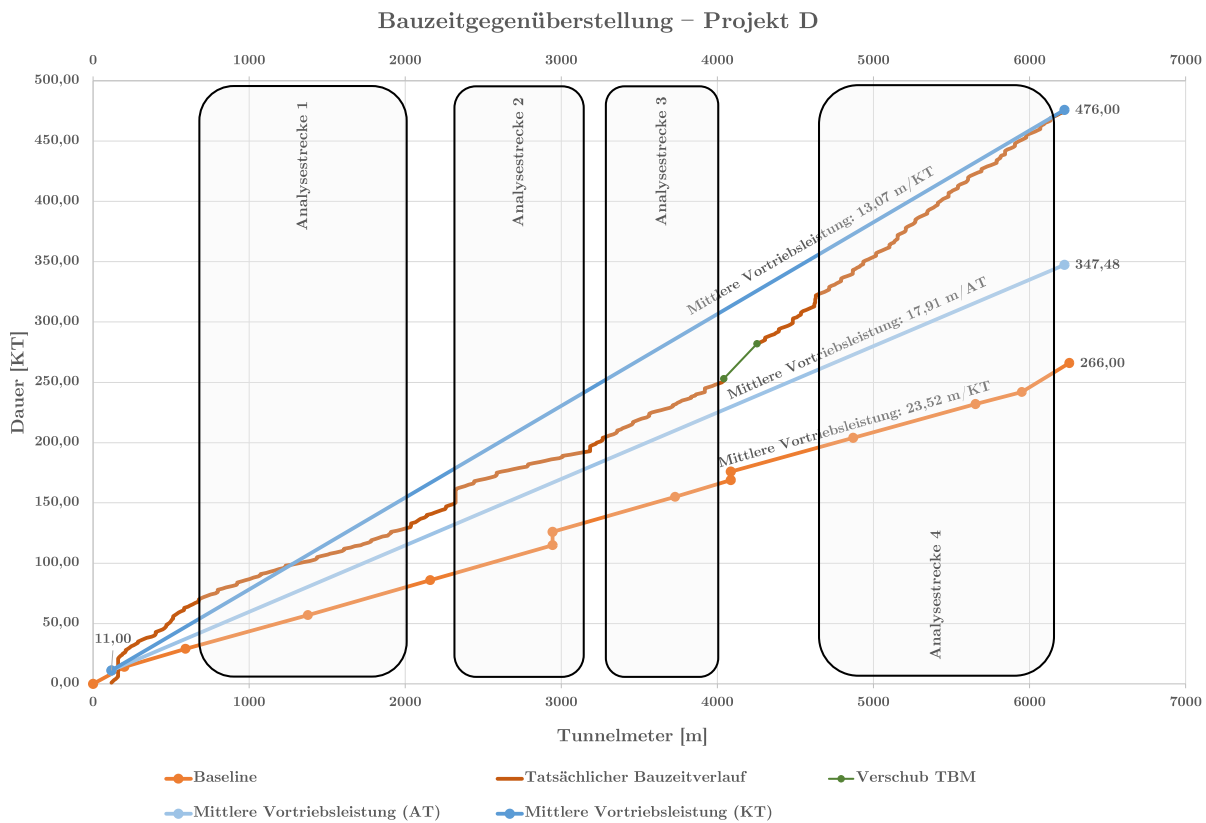


Abb. 6.10: Bauzeitgegenüberstellung und Analysestrecken – Projekt D

Tab. 6.10: Auswertung Analysestrecken – Projekt D

| Bezeichnung | Station | | Länge [m] | Zeitraum | | Dauer [AT] | mittlere Leistung [m/AT] |
|------------------|----------|----------|--------------|------------|------------|---------------|--------------------------------|
| | von [m] | bis [m] | | Anfang | Ende | | |
| Analysestrecke 1 | 691,26 | 2.036,68 | 1.345,43 | 05.10.2015 | 04.12.2016 | 47,14 | 28,54 |
| Analysestrecke 2 | 2.474,45 | 3.183,50 | 709,06 | 11.01.2016 | 04.02.2016 | 20,46 | 34,66 |
| Analysestrecke 3 | 3.381,43 | 4.038,41 | 656,99 | 22.02.2016 | 02.04.2016 | 32,50 | 20,21 |
| Analysestrecke 4 | 4.883,29 | 6.214,76 | 1.331,48 | 04.07.2016 | 11.11.2016 | 92,00 | 14,47 |

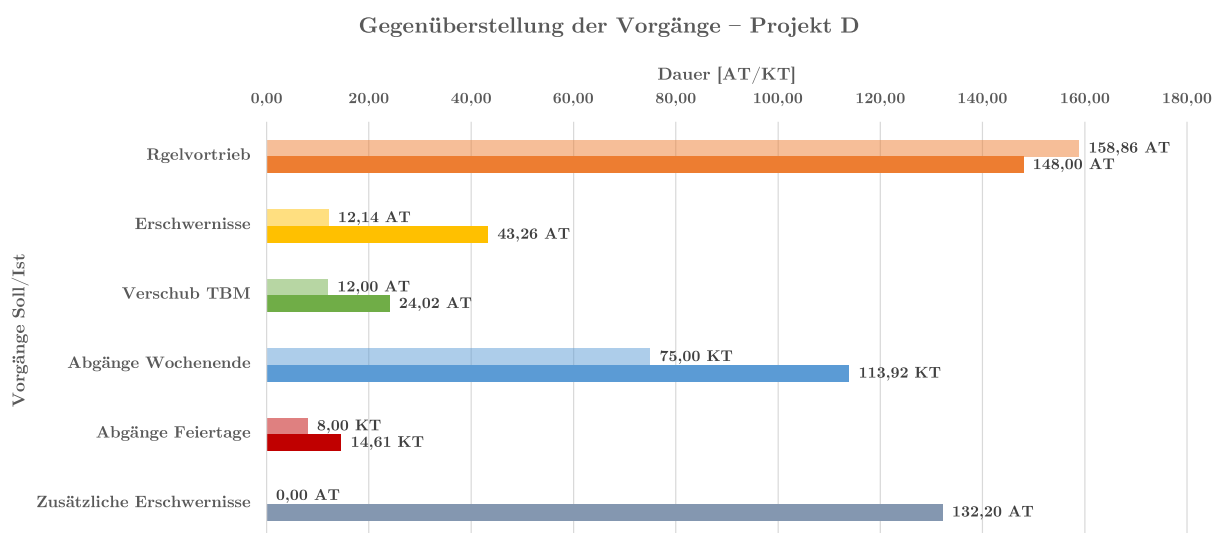
dieser Abweichung ergibt -5,17 % an der gesamten Bauzeitabweichung. Statt den angedachten Erschwernissen im Ausmaß von 12 AT belaufen sich diese tatsächlich auf 43 AT. Daraus resultiert eine Abweichung von 31 AT bzw. 14,82 %. Der TBM-Verschub nimmt das Doppelte an Zeit in Anspruch. Durch die Bauzeitverlängerung werden mehr Wochenendabgänge und Feiertage verzeichnet. Es ergeben sich Differenzen zwischen Soll und Ist von 38,92 KT und 6,61 KT. Diese haben Anteile an der Bauzeitabweichung von 18,53 % und 3,15 %. Der Zeitbedarf durch zusätzliche Erschwernisse beträgt 132 AT auf Grund des erschwerten kontinuierlichen Vortriebes, Tunnelverformungen und eines Tunnleinbruches. Dieser besitzt einen Anteil von 62,95 % an der Bauzeitabweichung.

Die beschriebenen Vorgänge werden in Abb. 6.11 im Soll und Ist gezeigt. In der Abweichungsanalyse aus Abb. 6.12 sind die Anteile der verschiedenen Vorgänge an der Bauzeitabweichung, bezogen auf Kalendertage, ausgewiesen. Einzig verkürzender Vorgang ist in dieser Hinsicht

Tab. 6.11: Gegenüberstellung der Vorgänge und Bauzeitabweichungen – Projekt D

| Vortrieb | Soll | Ist | Abweichung von Soll-Länge | |
|----------|------------|------------|---------------------------|---------|
| Länge | 6.255,00 m | 6.223,44 m | -31,56 m | -0,50 % |

| Vorgang | Bauzeit Soll | Bauzeit Ist | Bauzeit Abweichung | Anteil an Abweichung |
|---------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------|----------------------|
| Regelvortrieb | 158,86 AT | 148,00 AT | -10,86 AT | -5,17 % |
| Erschwernisse | 12,14 AT | 43,26 AT | 31,12 AT | 14,82 % |
| Verschub TBM | 12,00 AT | 24,02 AT | 12,02 AT | 5,72 % |
| Abgänge Wochenende | 75,00 KT | 113,92 KT | 38,92 KT | 18,53 % |
| Abgänge Feiertage | 8,00 KT | 14,61 KT | 6,61 KT | 3,15 % |
| Zusätzliche Erschwernisse | 0,00 AT | 132,20 AT | 132,20 AT | 62,95 % |
| Summe Arbeitstage | 183,00 AT | 347,48 AT | 164,48 AT | |
| Summe Kalendertage | 266,00 KT | 476,00 KT | 210,00 KT | |
| Bauzeitabweichung | 89,88 % (AT) bzw. 78,95 % (KT) | | | |

**Abb. 6.11:** Gegenüberstellung der Vorgänge – Projekt D

der Regelvortrieb, jedoch steht in dessen Gegensatz der Zeitbedarf für zusätzliche Erschwernisse des kontinuierlichen Vortriebs. Die lokalen Erschwernisse wirken sich mit 14,82 % an der Abweichung aus. Die Auswirkungen durch Abgänge von der Baustelle ergeben sich aus der Bauzeitverlängerung.

Die Dokumentation des Tunnelvortriebs erfolgte in gegenständlichem Projekt tageweise. Aus diesem Grund kann hier eine statistische Leistungsauswertung in Meter pro Arbeitstag vorgenommen werden. Die Leistungen sind nach jeweiligem Vortriebsabschnitt in Tab. 6.12 getrennt ausgewiesen. Die Bestleistung liegt in Onshore 2 bei 52,05 m/AT. In diesem Abschnitt liegen auch die Höchstwerte von 95 % Quantil mit 40,08 m/AT und Median mit 23,67 m/AT. An zweiter Stelle reihen sich die Vortriebsleistungen aus Onshore 3. Hier ist ein Maximum von 31,75 m/AT verzeichnet, der Median liegt bei 21,66 m/AT. Im kurzen Abschnitt Onshore 1 ist

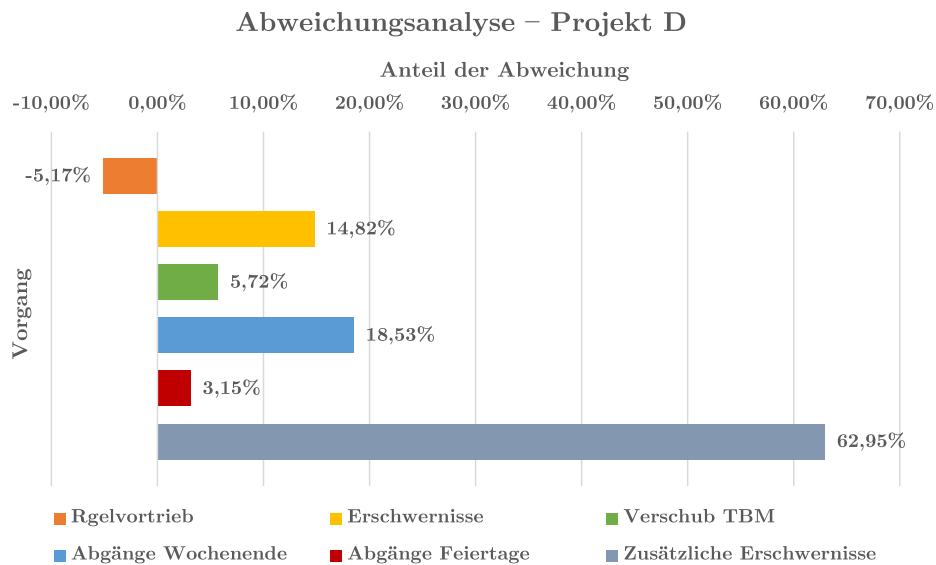


Abb. 6.12: Abweichungsanalyse – Projekt D

die Vortriebsleistung am geringsten, dies liegt an dem zusätzlichen Zeitbedarf der Einarbeitung. Für die Abschnitte Offshore 1 – 3 werden deutlich schlechtere Vortriebsleistungen als in Onshore 2 und 3 verzeichnet. Das Maximum reicht von 19,65 m/AT bis 22,69 m/AT. Der Median ergibt Werte zwischen 15,63 m/AT und 16,61 m/AT.

Tab. 6.12: Statistische Angaben zur Vortriebsleistung – Projekt D

| Abschnitt | Maximum [m/AT] | 95 % Quantil [m/AT] | Median [m/AT] |
|------------|-------------------|------------------------|------------------|
| Onshore 1 | 12,35 | 12,04 | 8,44 |
| Onshore 2 | 52,04 | 40,08 | 23,67 |
| Onshore 3 | 31,75 | 29,40 | 21,66 |
| Offshore 1 | 22,55 | 20,12 | 15,63 |
| Offshore 2 | 22,69 | 22,63 | 16,61 |
| Offshore 3 | 19,65 | 19,60 | 15,81 |

6.5 Leistungsanalyse – Projekt E

In der Leistungsanalyse gegenständlichen Projektes gilt es, den Vortrieb in Arbeits- und Kalendertagen zu betrachten, da die Wochenenden arbeitsfrei sind. Die Bauzeitgegenüberstellung in Abb. 6.13 gibt kalkulierten Bauzeitverlauf, tatsächlichen Bauzeitverlauf und die mittlere erreichte Vortriebsleistung, jeweils in Arbeits- und Kalendertagen, wieder. Nach der Einarbeitung zu Tunnelanfang setzt die erste Analysestrecke an, diese erstreckt sich bis zum ersten Vortriebsstilliegen. Die weiteren Analysestrecken werden ebenfalls von Vortriebsstilliegen unterbrochen.

In Tab. 6.13 sind fünf Analysestrecken mit einer Leistung bezogen auf Arbeitstage ausgewertet. Analysestrecke 1 bringt eine mittlere Vortriebsleistung von 17,30 m/AT auf 1.554 m hervor. Strecke 2 weist die geringste Geschwindigkeit der betrachteten Abschnitte mit 13,42 m/AT auf. Anschließend steigt die Vortriebsleistung an, in Analysestrecke 3 werden 15,44 m/AT erzielt.

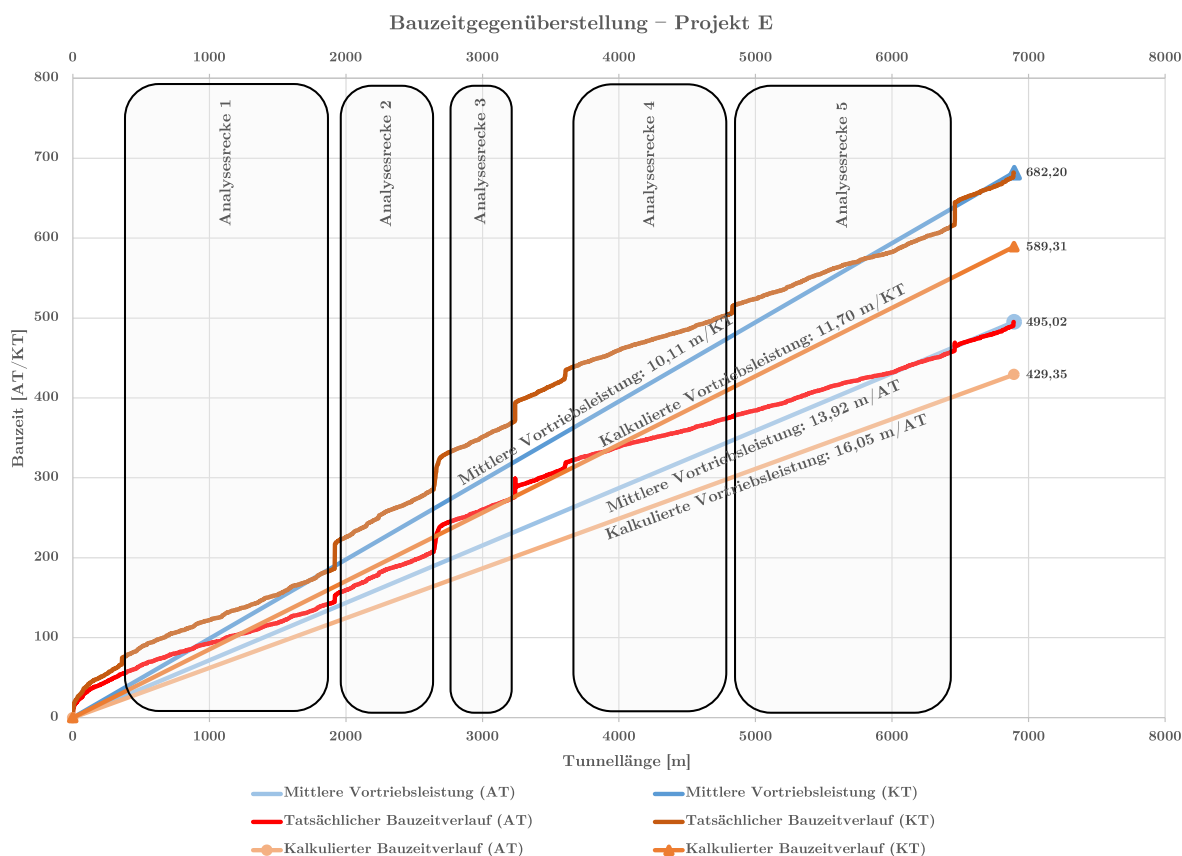


Abb. 6.13: Bauzeitgegenüberstellung und Analysestrecken – Projekt E

Die zweite Tunnelhälfte bringt bessere Leistungen hervor. In Analysestrecke 4 findet sich der Höchstwert von durchschnittlich 21,28 m/AT über eine Länge von ca. 1.217 m. Der längste ungestörte Vortrieb mit rund 1.629 m weist eine Vortriebsleistung von 19,88 m/AT auf.

Tab. 6.13: Auswertung Analysestrecken – Projekt E

| Bezeichnung | Station | | Länge [m] | Zeitraum | | Dauer [AT] | mittlere Leistung [m/AT] |
|------------------|----------|----------|--------------|------------|------------|---------------|--------------------------------|
| | von [m] | bis [m] | | Anfang | Ende | | |
| Analysestrecke 1 | 363,13 | 1.917,13 | 1.554,00 | 29.03.2016 | 09.07.2016 | 89,83 | 17,30 |
| Analysestrecke 2 | 1.927,66 | 2.600,34 | 672,69 | 27.07.2016 | 20.09.2016 | 50,12 | 13,42 |
| Analysestrecke 3 | 2.792,31 | 3.237,19 | 444,88 | 05.11.2016 | 07.12.2016 | 28,81 | 15,44 |
| Analysestrecke 4 | 3.613,63 | 4.830,34 | 1.216,72 | 07.02.2017 | 09.04.2017 | 57,18 | 21,28 |
| Analysestrecke 5 | 4.832,47 | 6.461,03 | 1.628,56 | 17.04.2017 | 15.07.2017 | 81,92 | 19,88 |

Tab. 6.14 zeigt die minimale Längenabweichung des maschinellen Vortriebes von 0,91 m. Für 6.893,91 m Tunnelausbruch sind 495,16 AT bzw. 682,07 KT verbraucht. Die Ausschreibung/Kalkulation geht von 429,35 AT bzw. 589,31 KT aus. Daraus ergibt sich eine Bauzeitabweichung von 65,81 AT bzw. 15,33 % (bezogen auf Arbeitstage) oder 92,76 KT bzw. 15,74 % (bezogen auf KT). Für den Vorgang des Tunnelausbruches resultiert eine Bauzeitabweichung von -0,52 AT bzw. -0,56 % bezogen auf die Abweichung in Kalendertagen (da auch Wochenenden und Abgänge in die Vorgangsgegenüberstellung miteinbezogen werden). Bei den Bohr- und Verpressarbeiten

ergibt sich eine sehr große Differenz, statt 91 AT im Soll liegen tatsächlich nur 1,24 AT im Ist am kritischen Weg. Daraus resultiert eine Bauzeitabweichung von ca. -90 AT bzw. -96,99 %. Die Zusatzzeiten des Tunnelausbruches belaufen sich laut Bauausführung auf ca. 19 AT, das sind rund 3 AT mehr als angenommen. Durch die Bauzeitverlängerung ergibt sich ein Mehr an Wochenenden von 16 KT, was 17,20 % der Bauzeitabweichung entspricht. Im gleichen Zuge fallen zusätzliche Feiertage im Bauverlauf an, woraus sich ein Anteil von 11,86 % an der Gesamtabweichung ergibt. Die veränderten geologischen Bedingungen nehmen den größten Teil der Differenz zwischen Soll und Ist in Anspruch. Zusätzliche 141 AT ergeben 151,90 % der Bauzeitabweichung. Das geltende Nachtbohrverbot bedingt zusätzliche 5 AT und die restlichen Abweichungen stehen mit ca. 7 AT zu Buche.

Tab. 6.14: Gegenüberstellung der Vorgänge und Bauzeitabweichungen – Projekt E

| Vortrieb | Soll | Ist | Abweichung von Soll-Länge | |
|----------|------------|------------|---------------------------|--------|
| Länge | 6.893,00 m | 6.893,91 m | 0,91 m | 0,01 % |

| Vorgang | Bauzeit Soll | Bauzeit Ist | Bauzeit Abweichung | Anteil an Abweichung |
|----------------------|--------------|-------------|--------------------------------|----------------------|
| Tunnelausbruch | 322,29 AT | 321,77 AT | -0,52 AT | -0,56 % |
| Bohrungen/Verpressen | 91,21 AT | 1,24 AT | -89,98 AT | -96,99 % |
| ZZ Tunnelausbruch | 15,85 AT | 18,52 AT | 2,67 AT | 2,87 % |
| Abgänge Wochenende | 104,95 KT | 120,91 KT | 15,96 KT | 17,20 % |
| Abgänge Feiertage | 55,00 KT | 66,00 KT | 11,00 KT | 11,86 % |
| Geologie | 0,00 AT | 140,91 AT | 140,91 AT | 151,90 % |
| Nachtbohrverbot | 0,00 AT | 5,27 AT | 5,27 AT | 5,68 % |
| Restliche Abweichung | 0,00 AT | 7,46 AT | 7,46 AT | 8,05 % |
| Summe Arbeitstage | 429,35 AT | 495,16 AT | 65,81 AT | |
| Summe Kalendertage | 589,31 KT | 682,07 KT | 92,76 KT | |
| Bauzeitabweichung | | | 15,33 % (AT) bzw. 15,74 % (KT) | |

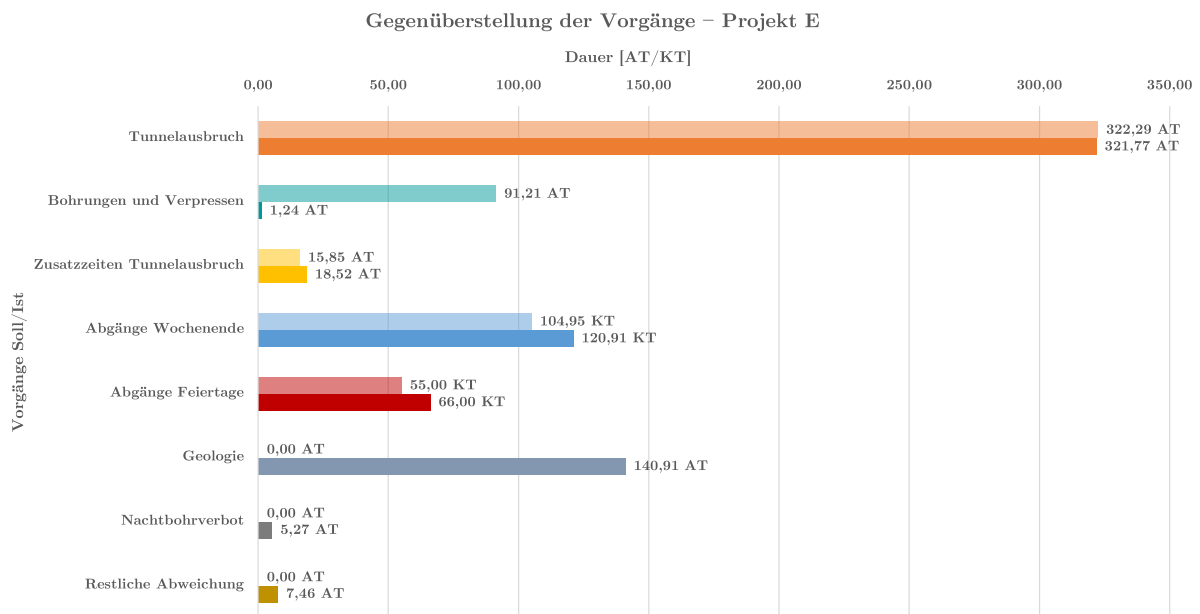


Abb. 6.14: Gegenüberstellung der Vorgänge – Projekt E

In Abb. 6.14 sind die Vorgangsbeschreibungen grafisch dargestellt. Die beschriebenen Anteile an der Bauzeitdifferenz werden in Abb. 6.15 dargestellt. Zwar steuern die größtenteils entfallenen Bohr- und Verpressarbeiten der Bauzeitverlängerung erheblich entgegen, jedoch können die geologischen Erschwernisse keineswegs ausgeglichen werden, worauf die Bauzeitdifferenz zwischen Soll und Ist schlussendlich zurückzuführen ist.

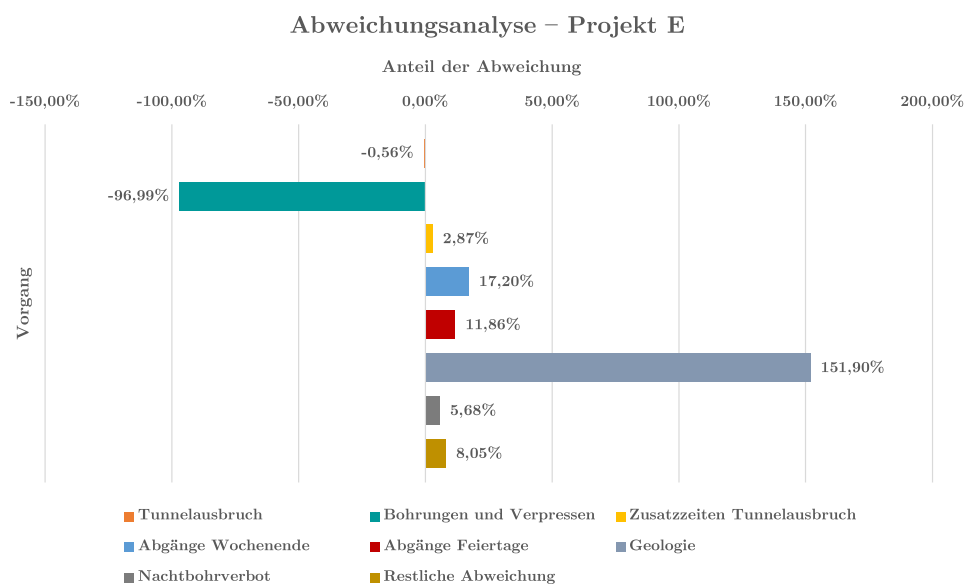


Abb. 6.15: Abweichungsanalyse – Projekt E

Für Projekt E erfolgt die Vortriebsdokumentation hubweise. Für die statistische Leistungsermittlung wird deshalb wieder die Einheit *Meter pro Stunde* gewählt. Hier gilt ebenfalls, dass die angegebenen Leistungen auf Grund diverser Einflüsse nicht auf eine theoretische Tagesleistung aufgerechnet werden dürfen, da zu hohe Vortriebsgeschwindigkeiten resultieren. In Tab. 6.15 sind

Maximum, 95 % Quantil und Median der theoretischen stündlichen Vortriebslänge angegeben. Die höchste Hubleistung wird in VKL SK3A mit 3,28 m/h erreicht, das 95 % Quantil liegt hier bei 2,37 m/h. In VKL SK3B wird ebenfalls ein Maximum über 3,00 m/h verzeichnet. Die restlichen Maxima reichen von 1,65 m/h bis 2,90 m/h. Die Mediane ergeben für die Klassen SK1 – SK3C Werte zwischen 1,13 m/h und 1,33 m/h, die Leistungen liegen demnach eng beieinander. In VKL SK3D werden nur mehr in 50 % der Hübe Vortriebsleistungen von 1,01 m/h erzielt. Die schwierigen Bedingungen in VKL SK4 haben einen Medianwert von 0,09 m/h zur Folge.

Tab. 6.15: Statistische Angaben zur Vortriebsleistung – Projekt E

| Abschnitt | Maximum [m/h] | 95 % Quantil [m/h] | Median [m/h] |
|-----------|------------------|-----------------------|-----------------|
| SK1 | 1,75 | 1,73 | 1,29 |
| SK2 | 2,90 | 2,23 | 1,13 |
| SK3A | 3,28 | 2,37 | 1,27 |
| SK3B | 3,10 | 2,45 | 1,25 |
| SK3C | 2,60 | 2,22 | 1,33 |
| SK3D | 2,62 | 2,31 | 1,01 |
| SK4 | 1,65 | 0,71 | 0,09 |

6.6 Leistungsanalyse – Projekt F

Für Projekt F wird die Leistungsanalyse mit einem Bauzeitvergleich von kalkulierter Baseline zur tatsächlichen Bauzeit begonnen. Aus der Differenz beider Zeiten errechnet sich zu jedem Zeitpunkt des Tunnelvortriebes ein Delta an Bauzeit. Diese Abweichung wird in Abb. 6.16 als rote Delta-Linie dargestellt. Die Steigung der Delta-Linie kann im Wesentlichen eine der drei folgenden Gegebenheiten bedeuten:

Keine Steigung (waagrecht): Die erbrachte Leistung entspricht der Leistung aus der Baseline

Positive Steigung: Die erbrachte Leistung ist besser als jene der Baseline

Negative Steigung: Die erbrachte Leistung ist schlechter als jene der Baseline

Für die Abschnitte 6, 10, 12 und 14 werden die Analysestrecken 1 – 4 festgelegt. Diese sind in Tab. 6.16 verzeichnet. Die beste durchschnittliche Leistung wird in Analysestrecke 1 mit 31,58 m/AT über 1.011 m erzielt. Analysestrecke 2 ergibt über eine Länge von 1.203 m eine mittlere Vortriebsleistung von 26,16 m/AT. In Strecke 3 wird eine Leistung von 23,64 m/AT erbracht, Strecke 4 weist 17,80 m/AT auf.

In Tab. 6.17 werden die Tunnellängen und Vorgangsdauern im Soll und Ist dargestellt. Ausgangslänge der Baseline sind 7.490 m, die Bauausführung unterschreitet diese um 38,74 m. Daraus ergibt sich eine Differenz der Tunnellänge von -0,52 %. Die Baseline-Bauzeit legt rund 343 AT bzw. 371 KT fest. Im Ist ergeben sich 693 AT bzw. 753 KT, was eine Bauzeitdifferenz von 350 AT bzw. 382 KT zur Folge hat. Die Abweichung von der Soll-Bauzeit liegt bei 102,14 % bezogen auf Arbeitstage oder 103,03 % in Kalendertagen.

Der Regelvortrieb weist im Soll eine Dauer von ca. 328 AT auf, tatsächlich können 271 AT abgerechnet werden. Die Differenz beläuft sich auf einen Anteil von -14,77 % der Gesamtabweichung. Die Vortriebsunterbrechungen im Ausmaß von ca. 331 AT ergeben einen Anteil an der Bauzeitabweichung von 86,57 %. Die Einarbeitungszeit wird mit 15 AT im Soll und Ist

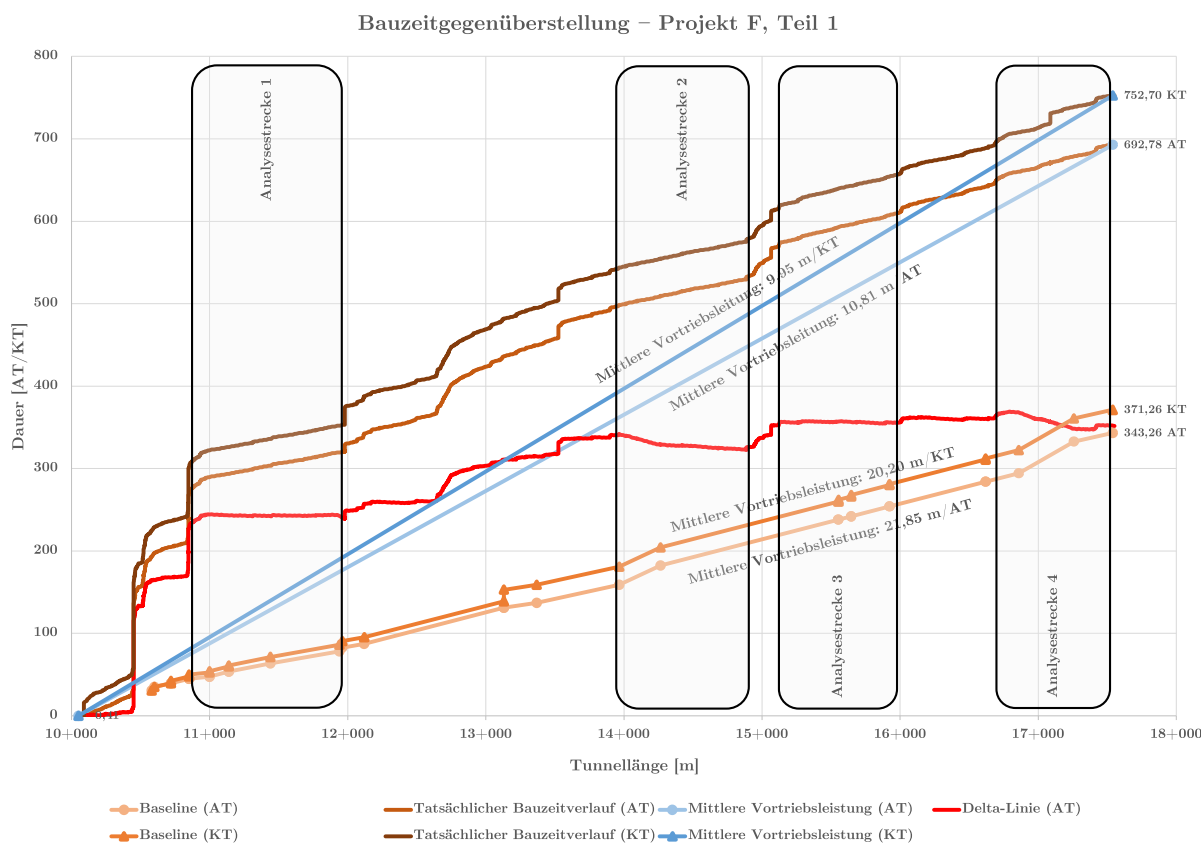


Abb. 6.16: Bauzeitgegenüberstellung und Analysestrecken – Projekt F, Teil 1

Tab. 6.16: Auswertung Analysestrecken – Projekt F, Teil 1

| Bezeichnung | Station | | Länge [m] | Zeitraum | | Dauer [AT] | mittlere Leistung [m/AT] |
|------------------|-----------|-----------|--------------|------------|------------|---------------|--------------------------------|
| | von [m] | bis [m] | | Anfang | Ende | | |
| Analysestrecke 1 | 10.969,17 | 11.979,70 | 1.010,53 | 18.11.2017 | 20.12.2017 | 32,00 | 31,58 |
| Analysestrecke 2 | 13.683,40 | 14.886,80 | 1.203,40 | 14.06.2018 | 30.07.2018 | 46,00 | 26,16 |
| Analysestrecke 3 | 15.138,03 | 16.005,33 | 867,30 | 13.09.2018 | 21.10.2018 | 36,68 | 23,64 |
| Analysestrecke 4 | 16.679,71 | 17.532,34 | 852,63 | 24.11.2018 | 24.01.2019 | 47,90 | 17,80 |

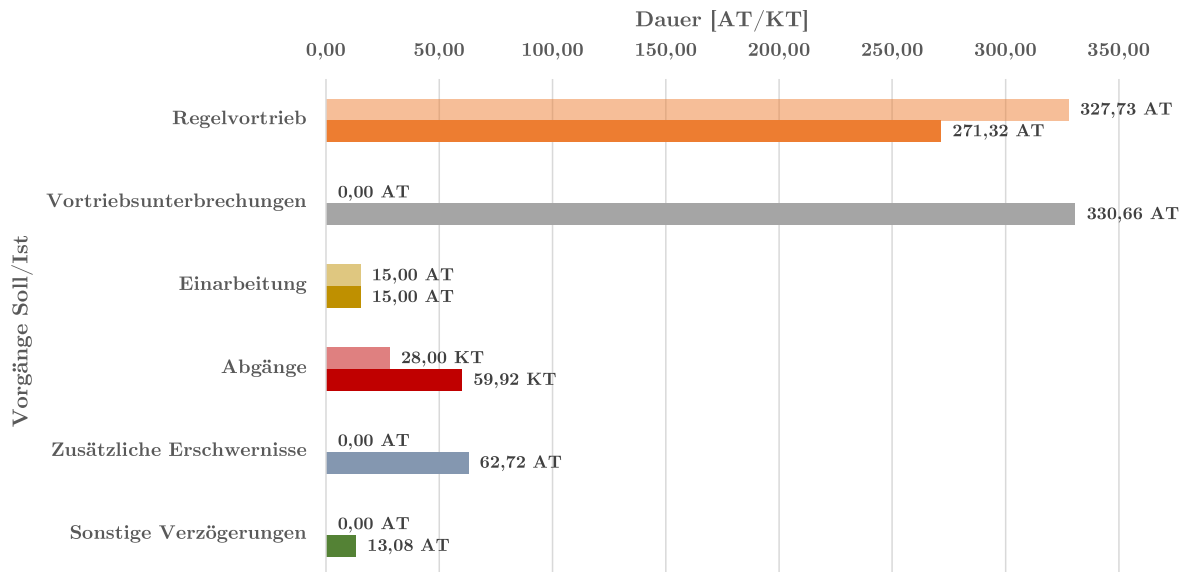
veranschlagt. Aus der längeren Bauzeit ergeben sich daher zusätzliche Abgangszeiten im Ausmaß von ca. 32 KT. Der Zeitbedarf für zusätzliche Erschwernisse beläuft sich auf 63 AT, dies entspricht einem Anteil von 16,42 % an der Bauzeitdifferenz. Sonstige Verzögerungen nehmen schlussendlich 3,42 % an der Bauzeitabweichung ein. Abb. 6.17 veranschaulicht die beschriebenen Vorgänge grafisch mit Soll- und Ist-Dauer.

Die Auswirkungen der einzelnen Vorgänge auf die gesamte Bauzeitabweichung wird in Abb. 6.18 dargestellt. Hier übernehmen die Vortriebsunterbrechungen den klar zu erkennenden Hauptanteil. Die Analyse von Maximum, 95 % Quantil und Median der erbrachten Leistungen wird nach den festgelegten Abschnitten vollzogen. Die beste Tagesleistung ist im Abschnitt 6 mit 49,06 m/AT verzeichnet. In den Abschnitten 7 und 10 werden ebenfalls Bestleistungen über 40,00 m/AT erreicht. Die geringste maximale Tagesleistung liegt in Abschnitt 3 bei 11,97 m/AT. Der höchste

Tab. 6.17: Gegenüberstellung der Vorgänge und Bauzeitabweichungen – Projekt F, Teil 1

| Teil 1 | Soll | Ist | Abweichung von Soll-Länge | |
|--------|------------|------------|---------------------------|---------|
| Länge | 7.490,00 m | 7.451,26 m | -38,74 m | -0,52 % |

| Vorgang | Bauzeit Soll | Bauzeit Ist | Bauzeit Abweichung | Anteil an Abweichung |
|---------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------|----------------------|
| Regelvortrieb | 327,73 AT | 271,32 AT | -56,41 AT | -14,77 % |
| Vortriebsunterbrechungen | 0,00 AT | 330,66 AT | 330,66 AT | 86,57 % |
| Einarbeitung | 15,00 AT | 15,00 AT | 0,00 AT | 0,00 % |
| Abgänge | 28,00 KT | 59,92 KT | 31,92 KT | 8,36 % |
| Zusätzliche Erschwernisse | 0,00 AT | 62,72 AT | 62,72 AT | 16,42 % |
| Sonstige Verzögerungen | 0,00 AT | 13,08 AT | 13,08 AT | 3,42 % |
| Summe Arbeitstage | 342,73 AT | 692,78 AT | 350,05 AT | |
| Summe Kalendertage | 370,73 KT | 752,70 KT | 381,97 KT | |
| Bauzeitabweichung | 102,14 % (AT) bzw. 103,03 % (KT) | | | |

Gegenüberstellung der Vorgänge – Projekt F, Teil 1**Abb. 6.17:** Gegenüberstellung der Vorgänge – Projekt F, Teil 1

Medianwert wird ebenfalls in Abschnitt 6 verzeichnet, die Hälfte der Vortriebstage erreichen mehr als 32,94 m/AT. In den Abschnitten 4, 10, 12 und 13 liegen die Tagesleistungen über 20 m/AT. In den Abschnitten 2 und 5 werden Medianwerte von 0,00 m/AT berechnet. Diese besagen, dass an mehr als der Hälfte der Arbeitstage keine Vortriebsmeter vollbracht werden können.

Abschließend sind in Abb. 6.19 die tatsächlichen Verteilungen der RMR-Klassen je Abschnitt aufgezeigt. Der Verteilung wird die tatsächliche durchschnittliche Vortriebsleistung gegenübergestellt. Außerdem ist die Baseline-Leistung nach den ausgeschriebenen geologischen Bedingungen und der Kalkulation ebenfalls dargestellt. Gute bis sehr gute Leistungen der Abschnitte 6, 10, 12, 13 und 14 korrespondieren mit den hohen Anteilen der RMR-Klassen 1 und 2.

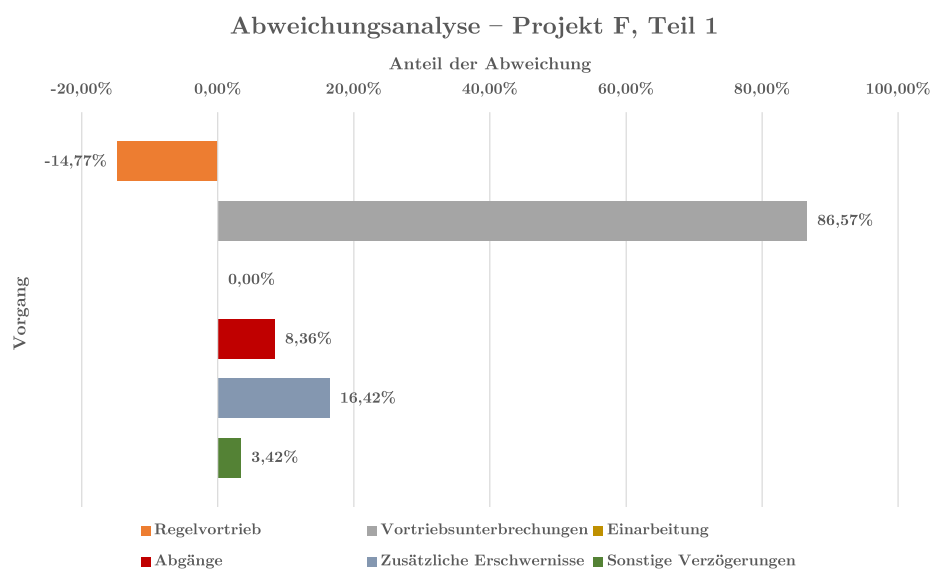


Abb. 6.18: Abweichungsanalyse – Projekt F, Teil 1

Tab. 6.18: Statistische Angaben zur Vortriebsleistung – Projekt F, Teil 1

| Abschnitt | Maximum [m/AT] | 95 % Quantil [m/AT] | Median [m/AT] |
|--------------|-------------------|------------------------|------------------|
| Abschnitt 1 | 22,57 | 19,27 | 7,50 |
| Abschnitt 2 | 14,00 | 2,98 | 0,00 |
| Abschnitt 3 | 11,97 | 10,42 | 1,48 |
| Abschnitt 4 | 28,51 | 26,26 | 21,03 |
| Abschnitt 5 | 19,40 | 10,41 | 0,00 |
| Abschnitt 6 | 49,06 | 41,92 | 32,94 |
| Abschnitt 7 | 41,93 | 33,01 | 3,00 |
| Abschnitt 8 | 26,99 | 25,40 | 5,97 |
| Abschnitt 9 | 31,47 | 26,91 | 4,47 |
| Abschnitt 10 | 42,09 | 38,90 | 27,00 |
| Abschnitt 11 | 20,35 | 19,24 | 2,78 |
| Abschnitt 12 | 37,14 | 34,32 | 25,50 |
| Abschnitt 13 | 35,86 | 34,28 | 22,38 |
| Abschnitt 14 | 36,97 | 31,45 | 11,97 |

Die geringen Durchschnittsleistungen in den Abschnitten 2, 3 und 5 folgen den hohen Anteilen der Klassen 4 und 5.

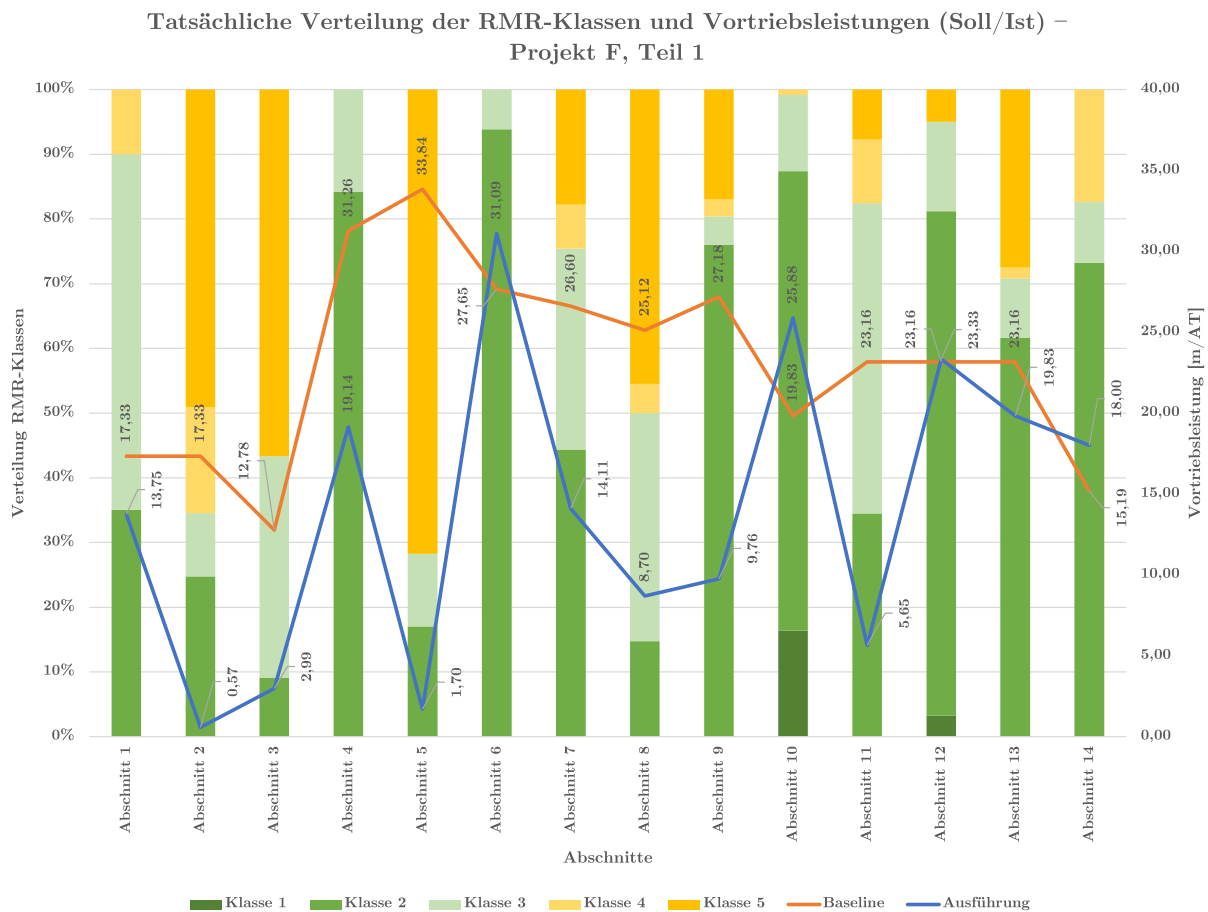


Abb. 6.19: Tatsächliche Verteilung der RMR-Klassen und Vortriebsleistungsvergleich (Soll/Ist) – Projekt F, Teil 1

6.7 Zwischenresümee zur Leistungsanalyse

Aus den Gegenüberstellungen kann eine Vielzahl an Erkenntnissen für die behandelten Projekte abgeleitet werden. Diese sollen jetzt näher beleuchtet werden:

Regelvortrieb In Abschnitten welche im Regelvortrieb ausgebrochen werden zeigen die Auswertungen in Form von Analysestrecken gute Vortriebsleistungen auf. Die Analysestrecken sind so angesetzt, dass diese Leistungen über entsprechende Längen von mehreren hundert Metern berechnet werden können. Die Vortriebsleistungen von Tunnelvortriebsmaschinen liegen in jeder Analysestrecke deutlich über derer eines vergleichbaren zyklischen Ausbruches.

Vortriebsunterbrechungen Aus der Vielzahl an berechneten Vortriebsunterbrechungen in dieser Diplomarbeit lässt sich für die analysierten Projekte darauf schließen, dass es mit dem heutigen Stand der Technik nicht möglich ist, die genaue Dauer zu prognostizieren. Zwar kann auf Basis geologischer Vorauserkundungen in der Phase der Planung oder während der Vortriebsarbeiten auf Störzonen geschlossen werden, die genaue Festlegung der Dauer für deren Durchörterung ist quasi unmöglich. Seitens der Auftraggeber ist zu erkennen, dass die ausgeschriebene Dauer dieser nicht vorhersehbaren Unterbrechungen im Vorfeld als eher gering bewertet wird. Hier gilt jedoch, dass der AG die Nachforderung von zu gering ausgeschriebenen Maßnahmen eher begrüßen wird, als Minderkostenforderungen zur Folge zu großzügiger Festlegung von Vortriebsunterbrechungen in den Ausschreibungen.

Verhältnis zwischen Höchst- und Medianleistungen Hinsichtlich der statistischen Auswertungen von Regelvortriebsleistungen nach Vortriebsklassen ist anzumerken, dass die Differenz zwischen Höchstwert und Median oft sehr hoch ausfällt. Das heißt wiederum, die Maschinen vollbringen unter entsprechenden Rahmenbedingungen sehr hohe Vortriebsleistungen. Jedoch können auf Grund der sehr großen Abhängigkeit zum Baugrund und weiterer unzähliger Einflüsse nur deutlich geringere Medianleistungen erbracht werden. Dies verdeutlicht wiederum die schwierigen Ansätze zu Kalkulationen im maschinellen Tunnelbau.

Zusammenfassend kann also für die analysierten Projekte darauf geschlossen werden, dass treffende Ausschreibungen und Kalkulationen in der Disziplin des maschinellen Tunnelbaus sehr anspruchsvoll sind. Allfällige Abweichungen zwischen Soll und Ist werden demnach über Mehr- und Minderkostenforderungen während bzw. nach der Bauausführung vergütet. In Tab. 6.19 werden abschließend die Bauzeiten im Soll und Ist, die Bauzeitabweichung und die Abweichung der Ausführungslänge im Vergleich zur Ausschreibung für jeden Vortrieb dargestellt.

Tab. 6.19: Gegenüberstellung der analysierten Projekte nach Bauzeit und Längenänderung

| Projektgegenüberstellung | Bauzeit | | | Längenabweichung |
|--------------------------|-----------|-------------------------------------|------------|------------------|
| | Soll | Ist | Abweichung | |
| Projekt A, Vortrieb 1 | | siehe <i>Forschungsbericht</i> [15] | | |
| Projekt A, Vortrieb 2 | | siehe <i>Forschungsbericht</i> [15] | | |
| Projekt B, TVM Süd | 644,26 AT | 798,00 AT | 23,86 % | -19,94 % |
| Projekt B, TVM Nord | 468,79 AT | 621,00 AT | 32,47 % | -12,87 % |
| Projekt C | | siehe <i>Forschungsbericht</i> [15] | | |
| Projekt D | 183,00 AT | 347,48 AT | 89,88 % | -0,50 % |
| Projekt E | 429,35 AT | 495,16 AT | 15,33 % | 0,01 % |
| Projekt F, Teil 1 | 342,73 AT | 692,78 AT | 102,14 % | -0,52 % |

Kapitel 7

Fazit

Abschließend soll der Ausarbeitungsumfang rekapituliert werden. Dieses Kapitel widmet sich der Beantwortung der definierten Forschungsfragen und versucht daraus, zukünftige Empfehlungen zu den aufgearbeiteten Thematiken abzugeben. Außerdem werden sich ergebende neue Forschungsfelder aufgezeigt, zu denen diese Arbeit als Grundbasis dienen kann.

Für die Ausarbeitungen in diesem Kapitel werden zusätzlich Projekt A (Vortrieb 1 und Vortrieb 2) und Projekt C herangezogen. Diese sind separat im *Forschungsbericht – Leistungsanalyse ausgewählter Projekte im maschinellen Tunnelbau* [15] durch Bender und Bisenberger ausgearbeitet. Die Analysen des Forschungsberichtes verfolgen das selbe Schema wie die Analysen aus den Kapiteln 4, 5, und 6 gegenständlicher Diplomarbeit. Der Forschungsbericht ist im Zuge dieser Arbeit ausgearbeitet worden.

7.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Für die Beantwortung der Forschungsfragen gilt als Grundsatz, aus den acht vorliegenden Vortrieben, eine Schlussfolgerung aufzustellen. Aus den ausgewerteten 6 Projekten ergibt sich eine Analyselänge von rund 95 Kilometer Tunnelvortrieb in verschiedensten geologischen Zonen mit zwei der gängigsten Maschinentypen. Die hier dargelegten Ergebnisse sind jedoch keinesfalls allgemeingültig, da jedes Tunnelbauprojekt schier einzigartig in seinen Gegebenheiten und Herausforderungen bleibt.

FORSCHUNGSFRAGE 1:

Welche Vortriebsleistungen weisen die zur Verfügung gestellten Projekte im Regelvortrieb in Abhängigkeit des verwendeten Maschinentyps auf? Welche Prozesse der Tunnelvortriebsmaschinen können dabei aufgezeigt werden und wie variieren diese im Verlauf des Vortriebes?

Für die Beantwortung zur Fragestellung von Durchschnittsleistungen im Regelvortrieb werden die Analysestrecken aus Kapitel 6 herangezogen. Diese liefern aussagekräftige Werte entsprechend ihrer Abschnittslängen und können somit als Richtwerte für den Regelvortrieb dienen. In Tab. 7.1 sind die minimalen und maximalen Leistungen der Analysestrecken für die jeweiligen Projekte angegeben. Zusätzlich nimmt die Tabelle Bezug auf Maschinentyp, nominalen Bohrdurchmesser und Geologie. Die Durchschnittsleistungen großer Doppelschildmaschinen aus Projekt A (9,90 m) reichen hier bis 24,69 m/AT. Mittelgroße DSM aus Projekt B mit Durchmesser von 6,50 m erzielen Werte bis 25,02 m/AT. Aus Projekt E, bei dem eine großen TBM-O mit einem Durchmesser von 9,30 m eingesetzt ist, ergibt sich eine Leistung von 21,28 m/AT. Sowohl minimale als auch maximale Leistung sind ähnlich der Doppelschildmaschinen mit ähnlichem Durchmesser aus Projekt A. Die mittelgroße TBM-O aus Projekt C weist eine höchste Durchschnittsleistung von 33,41 m/AT auf. Der Minimalwert liegt bei 6,14 m/AT, dies ist der Auswahl der Analysestrecke geschuldet (siehe Kapitel 6). Die kleinen TBM-O der Projekte D und F liefern durchschnittliche

Leistungen von 34,66 m/AT und 31,58 m/AT in den besten Analysestrecken. Die Minimalwerte liegen bei 14,47 m/AT und 17,80 m/AT.

Tab. 7.1: Durchschnittsleistungen der Tunnelvortriebsmaschinen im Regelvortrieb, Projekt A – Projekt F

| Projekt | TVM | D_n [m] | Geologie grob eingeteilt | Leistung der Analysestrecken von [m/AT] bis [m/AT] | |
|---------------|-------|--------------|-----------------------------|---|-------|
| A, Vortrieb 1 | DSM | 9,90 | Gneis, Glimmerschiefer | 11,59 | 18,24 |
| A, Vortrieb 2 | DSM | 9,90 | Gneis, Glimmerschiefer | 13,14 | 24,69 |
| B, TVM Süd | DSM | 6,50 | Kalkglimmerschiefer | 12,98 | 25,02 |
| B, TVM Nord | DSM | 6,50 | Kalkglimmerschiefer | 15,54 | 19,75 |
| C, VA 1 | TBM-O | 7,93 | Quarzphyllit, Schiefer | 6,14 | 33,41 |
| D | TBM-O | 3,50 | Schiefer, Kalkstein | 14,47 | 34,66 |
| E | TBM-O | 9,30 | Granit, Gneis | 13,42 | 21,28 |
| F, Teil 1 | TBM-O | 3,90 | Kalksandstein, Dolomit | 17,80 | 31,58 |

Auf die Variation der Prozessdauern von analysierten Maschinentypen kann mit Hilfe der Prozessauswertungen aus Kapitel 5 Stellung genommen werden. Dabei sind die Ergebnisse aus Mittelwert und Standardabweichung klassifiziert. Die Einschätzungen richten sich von *eher konstant* über *durchwachsen* bis zu *sehr unregelmäßig*. Die Klassifizierung ist in Tab. 7.2 dargestellt. Der Bohrprozess kann für beide Maschinentypen als eher konstant über den gesamten Vortriebsverlauf (Vortriebsklassen) angesehen werden. Lokale Abweichungen ergeben sich generell im Fall von Störung des Regelvortriebes bei allen Prozessen. Das Sichern ist bei Doppelschildmaschinen als eher konstant zu bewerten, im Fall von offenen Tunnelbohrmaschinen entstehen große Unregelmäßigkeiten beim Zeitbedarf. Der Umsetz-Prozess gelingt im Falle der DSM regelmäßiger als bei der TBM-O, dies steht aber auch im Zusammenhang mit Teilhüben. Die Wartungs- und Reparaturarbeiten können generell als sehr unregelmäßig angesehen werden. Hierdurch muss ein Bewusstsein geschaffen werden, dass diese Art von Arbeiten sehr schlecht kalkulierbar ist. Der Meisselwechsel liegt im Mittelfeld mit durchwachsenen Variationen des Zeitbedarfs. Gleiches gilt für die Materialförderung. Bei der Anwendung von offenen Tunnelbohrmaschinen können die Prozesse Vermessung und Probebohrungen extra ausgewiesen werden, der Zeitbedarf dieser wiederkehrenden Arbeiten kann als eher konstant angesehen werden. Alle sonstigen Arbeiten weisen in jedem analysierten Projekt sehr große Unregelmäßigkeiten auf. Dies liegt vor allem in geologischen Bedingungen, Defekten welche zu Stillständen führen und weiteren nicht vorhersehbaren Ereignissen. Hier soll diese Diplomarbeit ebenfalls ein Bewusstsein für die mit heutigem Stand der Technik sehr beschränkt mögliche Kalkulation dieser Arbeiten aufzeigen.

Tab. 7.2: Variation der Prozessdauer im Vortriebsverlauf in Abhängigkeit des Maschinentyps, Projekt A – Projekt F

| Prozesse | DSM | TBM-O |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| Bohren | eher konstant | eher konstant |
| Sichern | eher konstant | sehr unregelmäßig |
| Umsetzen | eher konstant | durchwachsen |
| Wartung, Reparatur | sehr unregelmäßig | sehr unregelmäßig |
| Meisselwechsel | durchwachsen | durchwachsen |
| Materialförderung | durchwachsen | durchwachsen |
| Vermessung | — | eher konstant |
| Probebohrungen | — | eher konstant |
| Sonstiges | sehr unregelmäßig | sehr unregelmäßig |

FORSCHUNGSFRAGE 2:

Welche Vortriebsleistungen können über den gesamten Vortrieb unter Einbeziehung allfälliger Störungen und Erschwernissen aus der Gesamtbauzeit wiedergegeben werden. Wie stehen diese Leistungen im Verhältnis zur Ausschreibung/Kalkulation?

In dieser Forschungsfrage soll der gesamte Tunnelvortrieb begutachtet werden, um hier Durchschnittsleistungen angeben zu können. Dafür wird die tatsächliche Vortriebszeit der TVM herangezogen, und nicht die Abrechnungsmengen der vorherigen Kapitel. In den Leistungswerten aus Tab. 7.3 sind die Arbeitstage aus Regelvortrieb, Erschwernissen, Vortriebsunterbrechungen, zusätzlichen Erschwernissen und sonstigen Zeiten, in denen Ausbruchsarbeit vollzogen wird, miteinbezogen. Abgänge aus Wochenenden und Feiertagen fließen nicht mit ein, da hier keine Vortriebsleistung vollbracht wird. Aus den Leistungen ergeben sich in der Bauausführung Werte zwischen 8,36 m/AT und 13,93 m/AT. Es kann keine große Abhängigkeit vom Durchmesser abgeleitet werden, da, wie aus Kapitel 5 und 6 hervorgeht, diese Vortriebe ebenfalls von leistungserschwerenden Umständen beeinflusst sind. Die Abweichungen zur Durchschnittsleistung der Ausschreibung/Kalkulation liegen bei gegenständlichen Projekten zwischen 10,95 – 61,75 %.

Tab. 7.3: Durchschnittsleistungen des Gesamtvortriebes aus Ausschreibung/Kalkulation und Bauausführung, Projekt A – Projekt F

| Projekt | TVM | D_n [m] | Durchschnittsleistung | | Abweichung [%] |
|---------------|-------|--------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------|
| | | | Ausschreibung/ Kalkulation [m/AT] | Bauausführung [m/AT] | |
| A, Vortrieb 1 | DSM | 9,90 | 17,72 | 8,36 | -52,81 |
| A, Vortrieb 2 | DSM | 9,90 | 17,82 | 9,89 | -44,54 |
| B, TVM Süd | DSM | 6,50 | 16,00 | 12,23 | -23,54 |
| B, TVM Nord | DSM | 6,50 | 16,00 | 12,04 | -24,75 |
| C, VA 1 | TBM-O | 7,93 | 12,64 | 11,26 | -10,95 |
| D | TBM-O | 3,50 | 34,18 | 13,07 | -61,75 |
| E | TBM-O | 9,30 | 16,05 | 13,93 | -13,25 |
| F, Teil 1 | TBM-O | 3,90 | 21,85 | 10,76 | -50,78 |

Abb. 7.1 veranschaulicht die Durchschnittsleistungen in [m/AT] aus Ausschreibung/Kalkulation und Bauausführung für alle Vortriebe dieser Diplomarbeit.

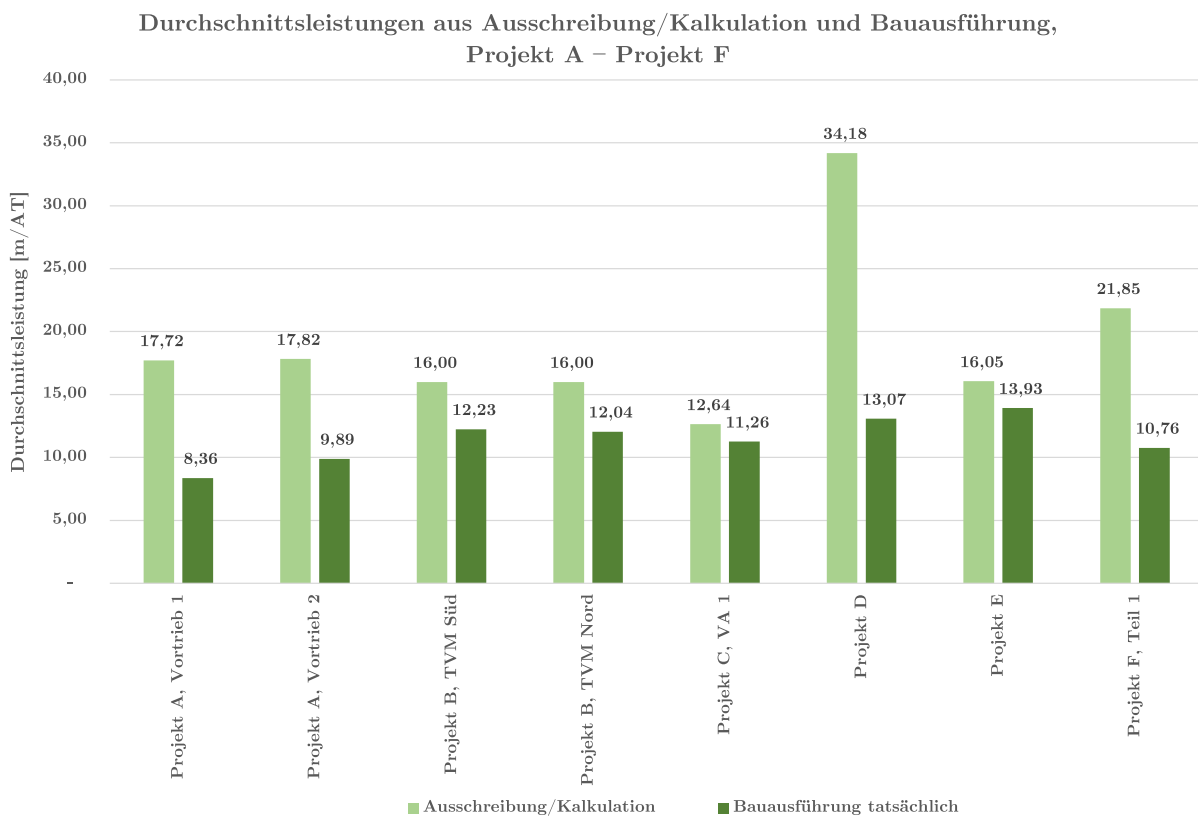


Abb. 7.1: Durchschnittsleistungen aus Ausschreibung/Kalkulation und Bauausführung, Projekt A – Projekt F

FORSCHUNGSFRAGE 3:

Bestimmung der Regel- und Sondervortriebszeiten anhand der bestehenden Projekte. Was kann aus vorliegender Geologie für den jeweiligen Maschinentyp geschlossen werden?

Für die Beantwortung dieser Forschungsfrage werden die Ausarbeitungen aus Kapitel 5 und 6 herangezogen. Dabei finden sämtliche vergütete Ist-Zeiten Eingang. Diese Zeiten werden zu Beginn für jeden Vortrieb in sechs grundlegende Sammelvorgänge unterteilt, diese sind auf Grund der Vereinheitlichung nationaler und internationaler Projekte nochmals kurz dargelegt:

Regelvortrieb: Sämtliche Vortriebsleistungen der TVM im Rahmen des Vortriebes nach Vortriebs- und Ausbauklassen.

Erschwernisse: Hierunter fallen ausgeschriebene Erschwernisse der verschiedenen Projekte wie:

- Wassererschwerneis
- erhöhte einachsiale Druckfestigkeit
- erhöhter CAI-Wert
- Penetrationstests

Zusatzzeiten: Unter den Zusatzzeiten finden folgende Leistungen der verschiedenen Projekte Eingang:

- Einarbeitungszeit
- Anfahren der TVM
- Durchschlag der TVM
- Bohrkopfrevisionen, Umstellung auf Überschnitt und Vortrieb mit Überschnitt
- Bohrungen, Injektionen und ähnliche Maßnahmen
- Bohren mit großen Steigungen
- etc.

Die genauen Einzelarbeiten können in den jeweiligen Projekten in Kapitel 5 und 6 nachgelesen werden.

Zusätzliche Erschwernisse: Hierunter fallen alle zusätzlichen Erschwernisse welche zum Zeitpunkt des Vertragsabschlusses noch nicht bekannt sind. Den Hauptanteil verursachen dabei kontinuierliche geologische Erschwernisse des TVM-Vortriebes.

Vortriebsunterbrechungen: Vortriebsarbeiten welche nicht nach vereinbarten Vortriebs- und Ausbauklassen abgerechnet werden.

Vortriebsstilliegen: Jene Zeiten des Vortriebes in denen keine Vortriebsarbeiten durchgeführt werden. Hierunter fällt auch der Versub der TVM aus Projekt D. Allfällige Abgangszeiten der verschiedenen Projekte sind nicht miteinbezogen, da nur mehr Arbeitstage bewertet werden.

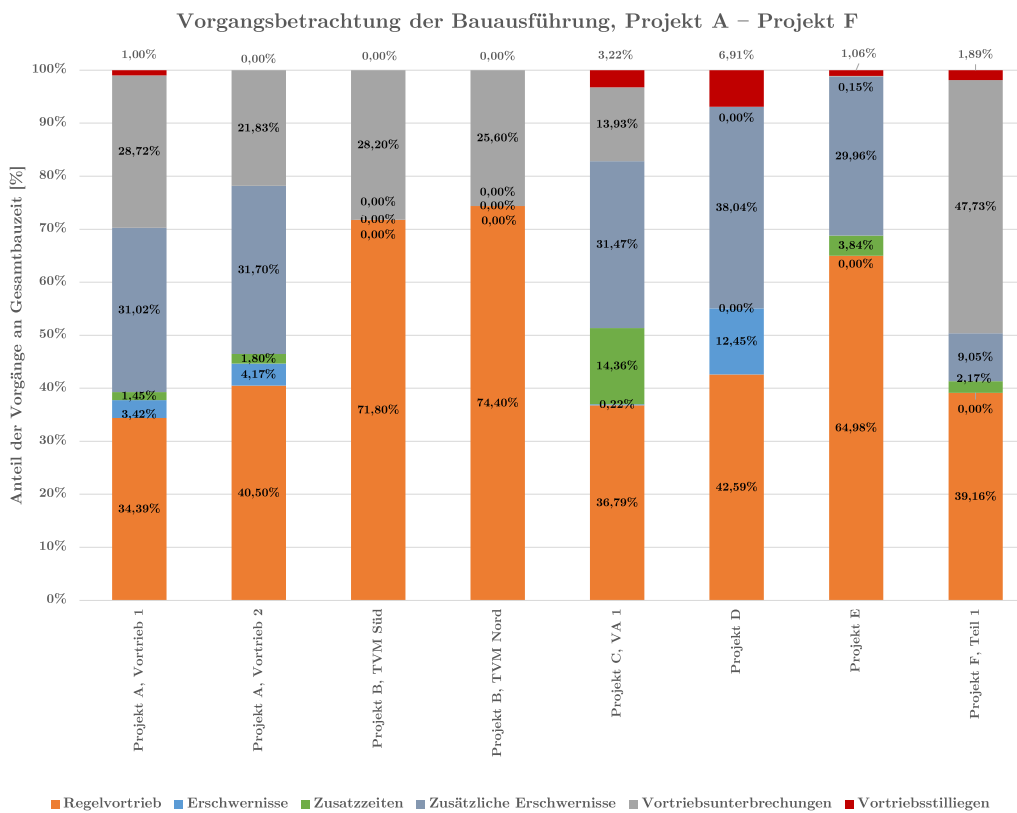


Abb. 7.2: Vorgangsbetrachtung der Bauausführung, Projekt A – Projekt F

Tab. 7.4: Vorgangszeiten der Tunnelvortriebe – Projekt A – Projekt F

| Projekt | A, Vor- trieb 1 | A, Vor- trieb 2 | B, TVM Süd | B, TVM Nord | C, VA 1 | D | E | F, Teil 1 |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-------------------|------------|--------|--------|--------------|
| Zeitdauer | | | | | | | | |
| Vorgang | [KT] | [KT] | [AT] | [AT] | [KT] | [AT] | [AT] | [AT] |
| Regelvortrieb | 682,78 | 650,17 | 573,00 | 462,00 | 366,08 | 148,00 | 321,77 | 271,32 |
| Erschwernisse | 67,88 | 66,99 | 0,00 | 0,00 | 2,23 | 43,26 | 0,00 | 0,00 |
| Zusatzzeiten | 28,88 | 28,90 | 0,00 | 0,00 | 142,94 | 0,00 | 19,02 | 15,00 |
| Zusätzl. Erschw. | 615,99 | 508,85 | 0,00 | 0,00 | 313,16 | 132,20 | 148,37 | 62,72 |
| Vortriebsunterbr. | 570,15 | 350,53 | 225,00 | 159,00 | 138,65 | 0,00 | 0,73 | 330,66 |
| Vortriebsstillliegen | 19,80 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 32,06 | 24,02 | 5,27 | 13,08 |
| Summe | 1.985,49 | 1.605,44 | 798,00 | 621,00 | 995,12 | 347,48 | 495,16 | 692,78 |
| Prozentual | | | | | | | | |
| Vorgang | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| Regelvortrieb | 34,39 | 40,50 | 71,80 | 74,40 | 36,79 | 42,59 | 64,98 | 39,16 |
| Erschwernisse | 3,42 | 4,17 | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 12,45 | 0,00 | 0,00 |
| Zusatzzeiten | 1,45 | 1,80 | 0,00 | 0,00 | 14,36 | 0,00 | 3,84 | 2,17 |
| Zusätzl. Erschw. | 31,02 | 31,70 | 0,00 | 0,00 | 31,47 | 38,04 | 29,96 | 9,05 |
| Vortriebsunterbr. | 28,72 | 21,83 | 28,20 | 25,60 | 13,93 | 0,00 | 0,15 | 47,73 |
| Vortriebsstillliegen | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,22 | 6,91 | 1,06 | 1,89 |
| Summe | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

In Tab. 7.4 sind die Zeitdauern der beschriebenen Sammelvorgänge für jedes Projekt angegeben. Die Eintragungen richten sich dabei vor allem nach dem Detaillierungsgrad der übergebenen Projektdaten. Die einzelnen Zeitdauern können anschließend anteilmäßig an der Gesamtbauzeit ausgewiesen werden. Die prozentuale Darstellung gibt Abb. 7.2 wieder.

Für eine übersichtliche Darstellung und eine bessere Beantwortung der Fragestellung werden die abgerechneten Sammelvorgänge in zwei Gruppen klassifiziert. Einerseits fließen Regelvortrieb, Erschwernisse, Zusatzzeiten und zusätzliche Erschwernisse zusammen und werden dahingehend ausgewiesen, dass während dieser Zeitbewertung die TVM eine normale Vortriebsleistung erbringt. Andererseits ist die Leistung der TVM im Rahmen von Vortriebsunterbrechungen stark beeinträchtigt und nicht mit Vortriebsklassen abrechenbar, bzw. im Falle von Stillliegen nicht vorhanden. Diese Gruppierung kann als Sondervortriebszeit betrachtet werden. In Abb. 7.3 sind die beiden Varianten des TVM-Betriebes anteilmäßig an der Gesamtbauzeit dargestellt. Für die Vortriebe in den österreichischen Alpen können je nach Geologie vorsichtige Prognosen abgegeben werden. Im Gneis und Glimmerschiefer aus Projekt A liegen die Verteilungen zwischen Regel- und Sondervortriebszeiten bei 70 : 30 – 80 : 20. Beim Kalkglimmerschiefer aus Projekt B ergibt sich ein Verhältnis von 70 : 30 – 75 : 25. Am günstigsten liegt die Verteilung in Projekt C im Quarzphyllit und Schiefer mit ca. 83 : 17. Im kanadischen Schiefer und Kalkstein resultiert ein Ergebnis von ungefähr 93 : 7. Der störungsarme norwegische Vortrieb im Granit und Gneis hat die günstigste Verteilung der analysierten Projekte mit einem Verhältnis von ca. 99 : 1.

Abschließend ergibt sich für den schwierigen Vortrieb in Israel mit den geologischen Hauptanteilen aus Kalksandstein und Dolomit und häufig auftretenden Karsthöhlen, Höhlen und Störungszonen das schlechteste Verhältnis zwischen Regel- und Sondermaßnahmen von ungefähr 50 : 50.

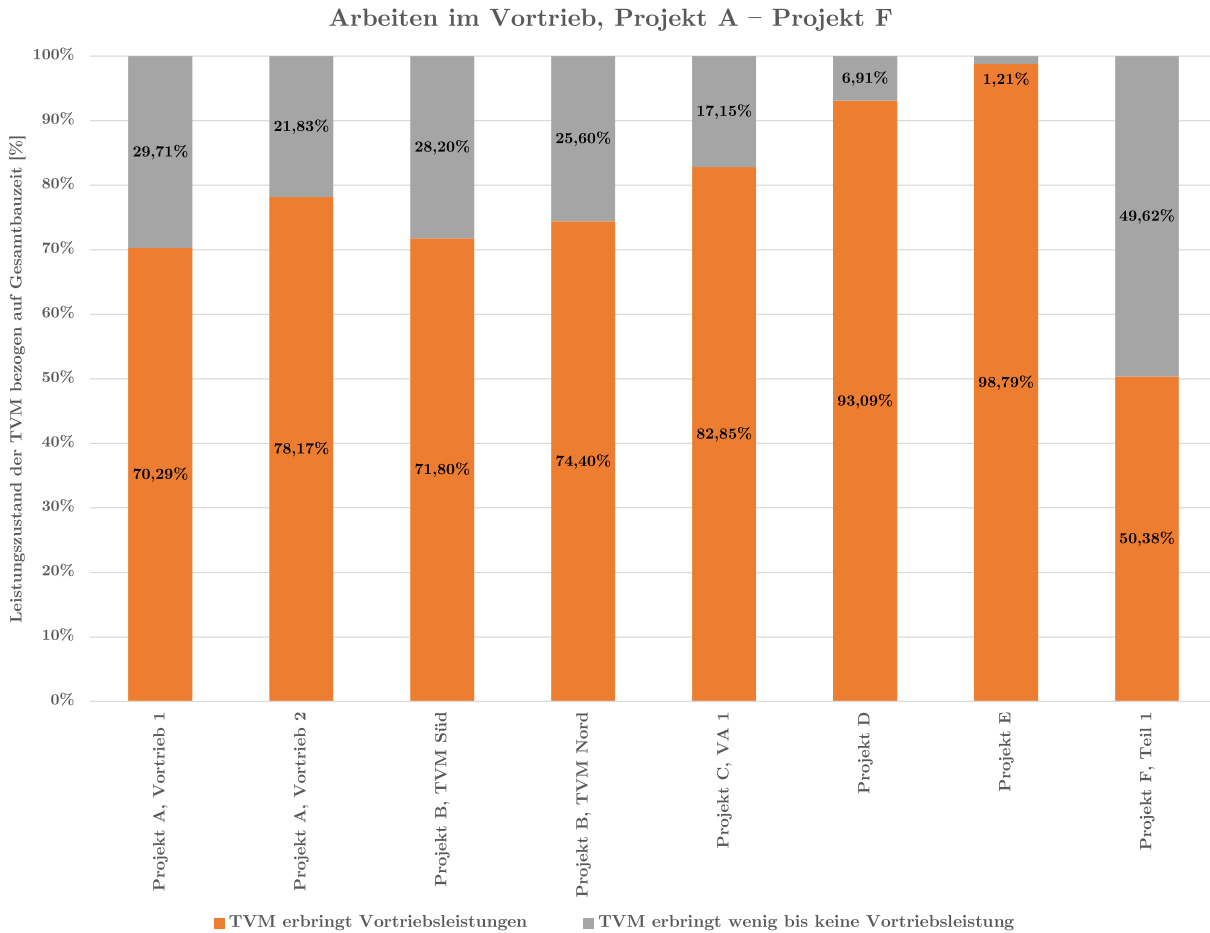


Abb. 7.3: Arbeitsmodus der TVM – Projekt A – Projekt F

FORSCHUNGSFRAGE 4:

Wie verändert sich der Zeitanteil von verschiedenen Arbeiten einer Tunnelbaustelle zwischen Angebot/Kalkulation und Bauausführung?

In der letzten Forschungsfrage sollen die Zeitbewertungen der Ausschreibungen und Kalkulationen mit den tatsächlich abgerechneten Aufwendungen verglichen werden. Dazu werden die drei folgenden Tätigkeitsfelder näher analysiert:

- Regelvortrieb
- Erschwernisse und zusätzliche Erschwernisse
- Vortriebsunterbrechungen und Vortriebsstilliegen (exklusive Abgänge)

Die projektspezifischen Zusatzzeiten sind in dieser Forschungsfrage nicht mehr berücksichtigt. In Tab. 7.5 werden die zusammengefassten Zeiten im Soll und Ist angeführt. Daraus lässt sich in den meisten Fällen eine Abweichung der ausgeschriebenen Vorgänge zwischen Bauausführung und Ausschreibung/Kalkulation im Bezug auf das vertragliche Soll bilden. Im Bezug auf die

Abweichungen der Tunnellänge findet bei einem Projekt eine Anpassung der Dauer im Verhältnis zur Längenänderung statt. Für Projekt B ergeben sich Abweichungen der ausgeschriebenen Vortriebslängen von 19,94 % und 12,87 %. Da für dieses Projekt nur die Vorgänge Regelvortrieb und Vortriebsunterbrechungen in der Bewertung ausgewiesen sind, werden diese im selben Verhältnis auf die Ausschreibungslänge erhöht. Die Abweichungen der restlichen Projekte bewegen sich zwischen -3,20 % bis 0,52 %, auf eine Anpassung wird verzichtet.

Tab. 7.5: Abweichungen der Vorgänge, Projekt A – Projekt F

| Projekt | A, Vor- trieb 1 | A, Vor- trieb 2 | B, TVM Süd | B, TVM Nord | C, VA 1 | D | E | F, Teil 1 |
|--|-----------------------|-----------------------|------------------|-------------------|------------|--------|--------|--------------|
| Regelvortrieb | | | | | | | | |
| Soll [AT] | 616,78 | 567,04 | 619,68 | 451,30 | 468,29 | 158,86 | 322,29 | 327,73 |
| Ist [AT] | 682,78 | 650,17 | 715,67 | 530,21 | 366,08 | 148,00 | 321,77 | 271,32 |
| Abweichung [%] | 11 | 15 | 15 | 17 | -22 | -7 | 0 | 17 |
| Erschwernisse und zusätzliche Erschwernisse | | | | | | | | |
| Soll [AT] | 46,94 | 40,67 | 4,58 | 2,49 | 9,40 | 12,14 | n. a. | n. a. |
| Ist [AT] | 683,87 | 575,84 | k. A. | k. A. | 315,39 | 175,46 | 148,37 | 62,72 |
| Abweichung [%] | 1.357 | 1.316 | k. A. | k. A. | 3.254 | 1.345 | k. A. | k. A. |
| Vortriebsunterbrechungen und Vortriebsstillliegen | | | | | | | | |
| Soll [AT] | 235,00 | 220,00 | 20,00 | 15,00 | 5,00 | 12,00 | 8,33 | 0,00 |
| Ist [AT] | 589,95 | 350,53 | 281,02 | 182,48 | 170,71 | 24,02 | 6,00 | 343,74 |
| Abweichung [%] | 151 | 59 | 1.305 | 1.117 | 3.314 | 100 | -28 | k. A. |

Begonnen wird mit der Analyse der Regelvortriebsleistungen in Abb. 7.4. Die Linien zeigen die Dauern der Regelvortriebsleistungen im Soll und Ist. Die Balken geben dabei deren Abweichung im Ist zum vertraglichen Soll wieder. In Projekt A und B ergibt sich eine veränderte Regelvortriebszeit zwischen 11 % und 17 %. In Projekt C sind die Dauern mit -22 % zu großzügig ausgelegt. Projekt D weißt ebenfalls eine zu gute Bewertung von -7 % auf. Für Projekt E ergibt sich eine sehr genaue Prognose der erbrachten Regelvortriebsleistungen. Abschließend kann in Projekt F eine Abweichung von -17 % festgestellt werden. Die Bandbreite liegt für die analysierten Projekte bei rund -20 % – 20 % der ausgeschriebenen Arbeiten. Abweichungen entstehen naturgemäß aus Änderungen der Vortriebs- und Ausbauplängen.

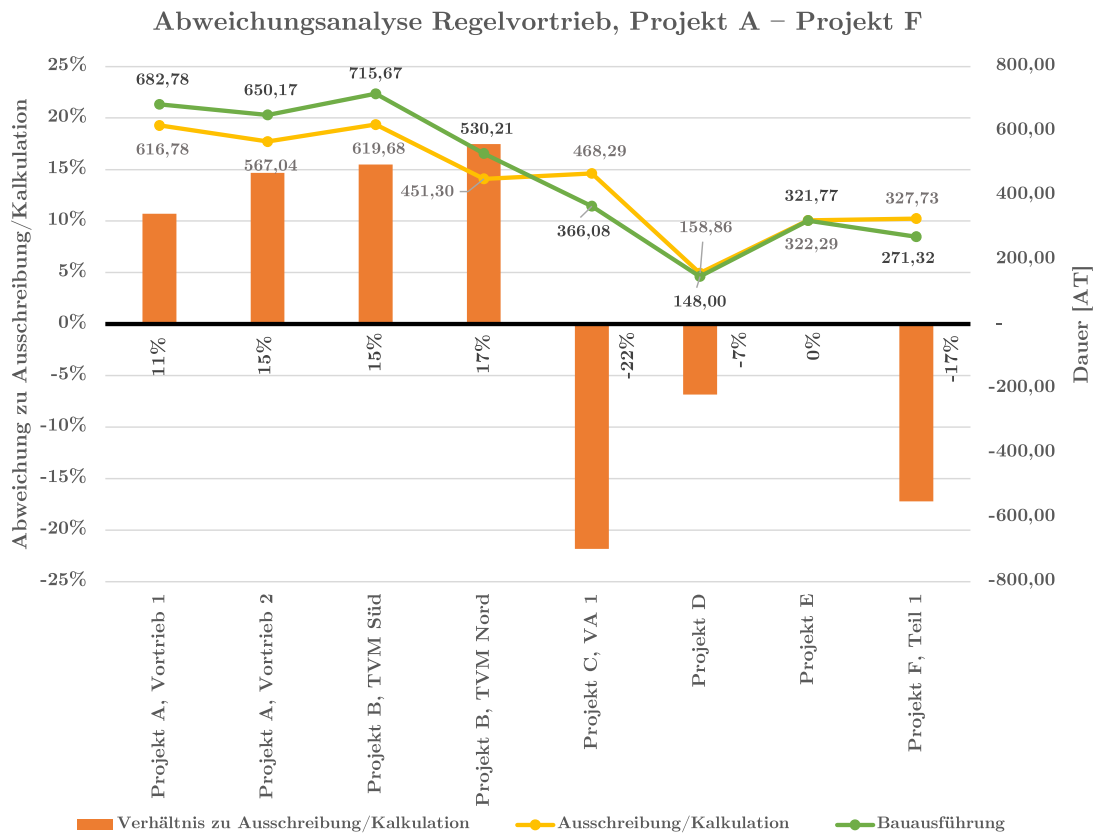


Abb. 7.4: Abweichungsanalyse des Regelvortriebs, Projekt A – Projekt F

Für eine Auswertung der Erschwernisse werden ausgeschriebene Erschwernisse und zusätzliche Erschwernisse zusammengefasst. Somit können Soll und Ist für den gesamten Verlauf der analysierten Vortriebe gegenüber gestellt werden. Abb. 7.5 veranschaulicht die Zeitbewertungen der Erschwernisse aus Ausschreibung/Kalkulation gegenüber der Bauausführung. In Projekt A zeigen sich deutliche Abweichungen zwischen Soll und Ist von 1.357 % und 1.316 %. Für Projekt B konnten im Ist keine Daten zu den Erschwernissen generiert werden. Für Projekt C ergibt sich die höchste Abweichung zwischen ausgeschriebenen und vorgefundenen Erschwernissen von 3.254 %. Projekt D liefert einen vergleichbaren Wert zu den Vortrieben aus Projekt A mit 1.345 %. In Projekt E können 148 AT an Vortriebserschwernissen ausgewiesen werden, jedoch gibt es keinen Referenzwert der Ausschreibung, da diese dort nicht berücksichtigt sind. Selber Umstand ergibt sich für Projekt F, hier errechnen sich rund 63 AT an vortriebserschwerenden Umständen. Zusammenfassend kann für diese Aufstellung geschlussfolgert werden, dass in den analysierten Projekten zu wenig an Erschwerniszeit berücksichtigt wird.

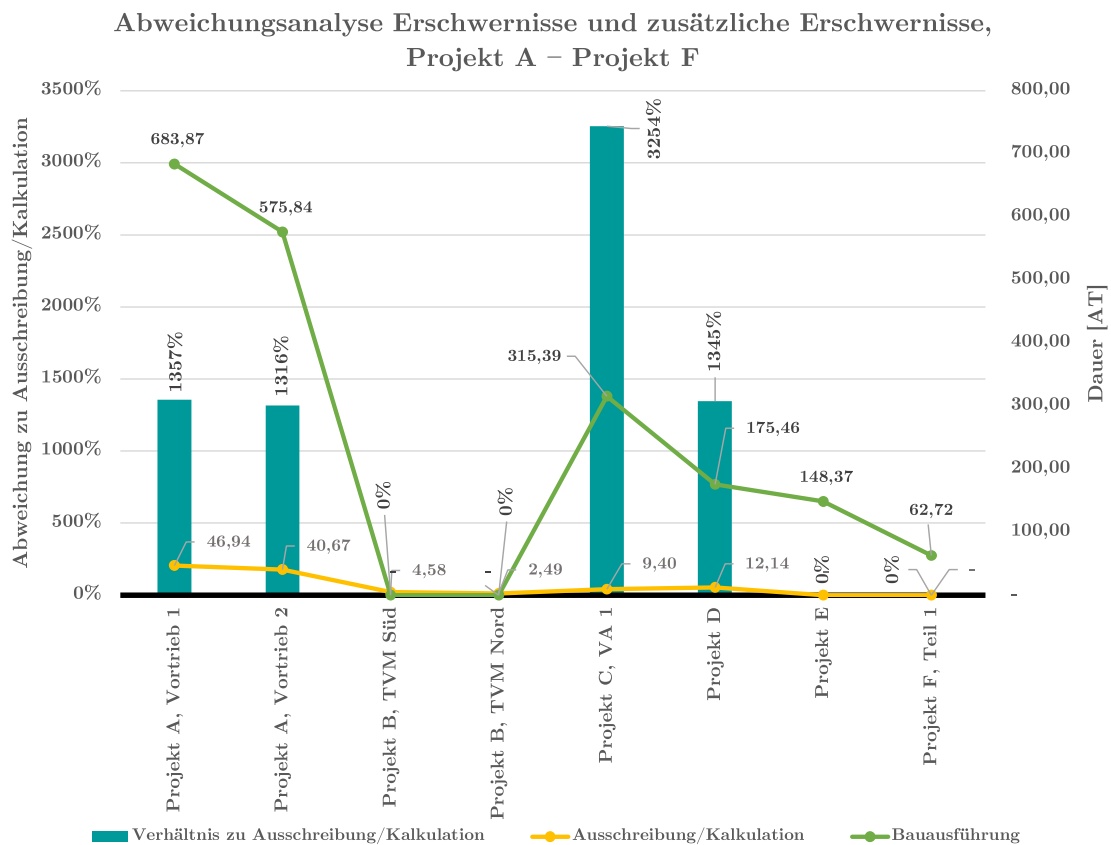


Abb. 7.5: Abweichungsanalyse der Erschwernisse und zusätzlichen Erschwernisse, Projekt A – Projekt F

Bei der Abweichungsanalyse in Abb. 7.6 werden Vortriebsunterbrechungen und Vortriebsstillliegen im Soll und Ist gemeinsam betrachtet.

Für Projekt A ergeben sich Abweichungen dieser Zeitbewertungen von 151 % und 59 % im Vergleich zur Ausschreibung. In Projekt B treten mehr als die zehnfachen Arbeitstage an Vortriebsunterbrechungen im Vergleich zur Urausschreibung auf. Es errechnen sich Werte von 1.305 % und 1.117 %. Die weitaus höchste Abweichung findet sich in Projekt C mit 3.314 %. Statt fünf ausgeschriebenen Arbeitstagen an Vortriebsunterbrechungen treten rund 170 AT auf. In Projekt D ergibt sich eine Abweichung von 100 % für die sehr geringe Anzahl an Unterbrechungen. Projekt E liefert die einzige Überschätzung an Vortriebsunterbrechungen und Stillständen mit -28 %. In diesem Vortrieb mit geringem Auftreten von Störzonen kommen kaum Stillstände der Maschine vor. In der Baseline von Projekt F sind keine Vortriebsunterbrechungen und Vortriebsstillliegen berücksichtigt. Tatsächlich ergibt sich während der Bauausführung ein Ausmaß von rund 344 AT in der schwierigen Geologie. Zusammenfassend kann auf Basis der Analyseprojekte darauf geschlossen werden, dass vor allem Vortriebsunterbrechungen nahezu immer als zu gering in den Ausschreibungen veranschlagt sind.

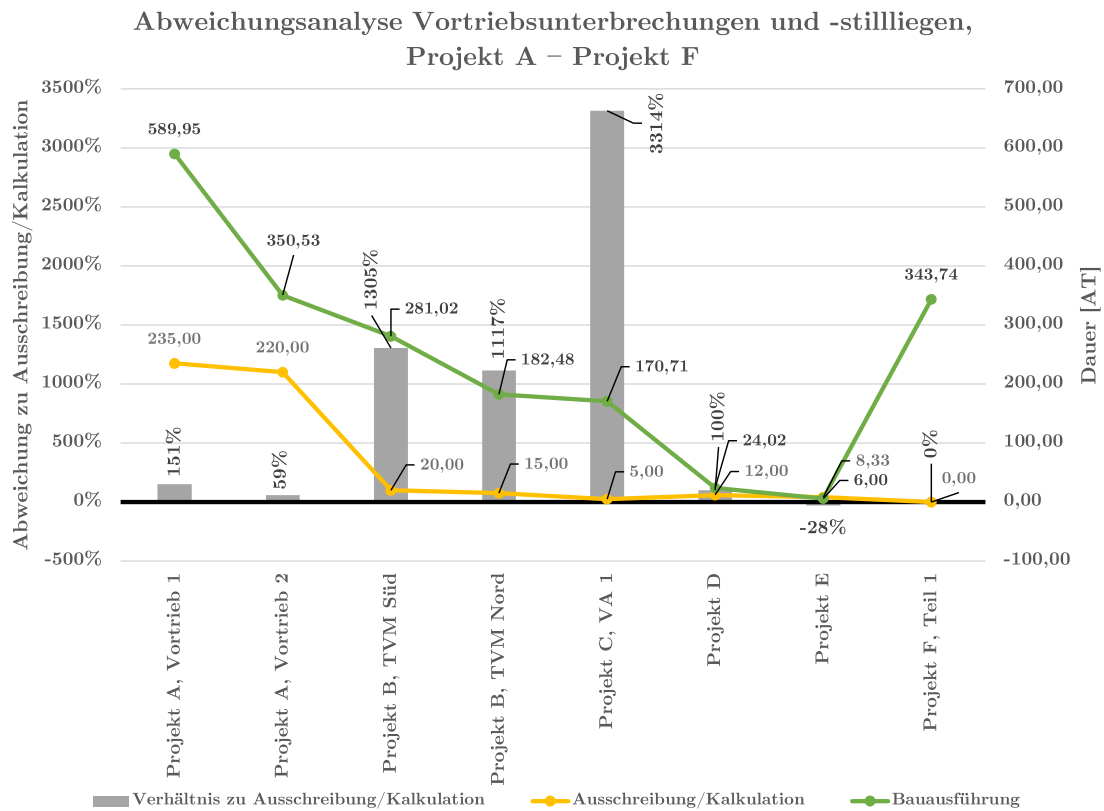


Abb. 7.6: Abweichungsanalyse der Vortriebsunterbrechungen und Vortriebsstilliegen, Projekt A – Projekt F

Gegenständliche Diplomarbeit verdeutlicht in all ihren Analysen von Projekten, eine ähnliche Situation im maschinellen Tunnelbau. Die Vortriebe sind im Vorfeld nur beschränkt in ihrer Dauer zu prognostizieren. Während Regelvortriebsarbeiten noch hinreichend genau eingegrenzt werden, sind die zeitlichen Bewertungen von Erschwernissen, Vortriebsunterbrechungen und Vortriebsstilliegen oft um ein Vielfaches ungenauer abzuschätzen. Die resultiert vor allem aus folgenden Faktoren:

- geologische Vorauserkundungen durch Bohrungen und ähnliche Maßnahmen sind nur Nadelstiche im Verhältnis zur Gesamtlänge von Tunnelbauwerken
- schwierig abzuschätzende Anzahl von Vortriebsunterbrechungen und Erschwernissen in der Ausschreibungsphase
- durch die große Streuung der Leistungswerte im Vortriebsverlauf von Regelvortriebsarbeiten der analysierten Projekte wird die Angabe eines genau festgelegten Leistungswertes (je Vortriebsklasse, Ausbauklasse oder Vortriebsabschnitt) in der Kalkulation als problematisch angesehen
- die diversen Gründe, aus denen Vortriebsunterbrechungen entstehen, können mit heutigem Stand der Technik unmöglich prognostiziert werden
- die Dauer von Maschinenstillständen auf Grund geologischer Zwischenfälle, zum Beispiel verkeilen der Maschine und anschließende Herstellung eines Umgehungsstollens, sind im Vorfeld nicht abschätzbar

7.2 Kernaussage

Unter gemeinsamer Betrachtung der vier Forschungsfragen kann eine Kernaussage dieser Diplomarbeit abgeleitet werden. Diese stützt sich auf die acht ausgewerteten Vortriebe. Auf deren Basis kann ein Trend wiedergegeben werden, der den Grund für die oft großen Bauzeitabweichungen von Tunnelbauwerken näher beschreibt:

Regelvortrieb: Bei Tunnelprojekten wird eine Prognose des Regelvortriebs der TVM erstellt. Für diese werden seitens des AN Vortriebsleistungen angeboten bzw. angenommen. Diese Leistungen können in der Realität bei den ausgewerteten Analyseprojekten mit einer gewissen Abweichung (hier im Ausmaß von maximal - 22 % – + 17 %, siehe Abb. 7.4) erreicht werden.

Erschwernisse: In den meisten Ausschreibungen werden Erschwernisse des Vortriebs angenommen. Auf Basis der analysierten Projekte ist zu erkennen, dass diese oft vielfach unterschätzt werden. Grund dafür ist oft eine zu günstige Annahme von geologischen Randbedingungen.

Vortriebsunterbrechungen/Stillstände: Für Arbeiten im Zuge eines Tunnelvortriebs, welche in Österreich als Vortriebsunterbrechung betitelt werden und in anderen Ländern zumeist als Stillstände klassifiziert sind, zeigt sich aus den Auswertungen ebenfalls eine Tendenz. Das Ausmaß dieser Arbeiten wird in der Bauausführung im Vergleich zur Ausschreibung/Kalkulation zumeist stark überschritten. Als Ursachen lassen sich oft, analog den Erschwernissen, eine zu günstige geologische Prognose und zu gering angenommene Auswirkungen von geologischen Störungen und Problembereichen feststellen.

Infolge dieser drei Erkenntnisse können daraus Anhaltspunkte für zukünftige Ausschreibungen und Kalkulationen von den entsprechenden Stellen entwickelt werden.

7.3 Ausblick

Der baubetriebliche Schlüssel zum Umgang mit leistungerschwerenden Umständen im Vortriebsverlauf liegt aus heutiger Sicht in der Datenaufzeichnung der Vortriebsmaschinen. Hier bietet sich ein großes Potential an Möglichkeiten, vergütungstechnische Systeme zu etablieren. Beispielsweise kann man aus der Differenz von Soll-Leistung und der tatsächlichen Leistungen im Falle eines erschwerten Vortriebs oder auftretenden Vortriebsunterbrechungen, auf sich ergebende Bauzeitdifferenzen schließen und dadurch, einhergehend mit abrechnungstechnischen Festlegungen, Kostenprognosen überarbeiten. Im Zuge dieser Arbeit, die sich lediglich mit der Zeitbewertung von Tunnelvortrieben beschäftigt, bietet sich als zukünftiges Forschungsgebiet die Analyse von Kostenabweichungen im maschinellen Tunnelbau.

Da diese Diplomarbeit in ihren Analyseprojekten nur Vortriebsmaschinen vom Typ TBM-O und DSM beinhaltet, fehlt für die Leistungsangabe die große Gruppe der Schildmaschinen (SM). Im Sinne der Forschung und Darstellung deren Leistungen wird versucht, ebenfalls für diesen Maschinentyp eine entsprechende Diplomarbeit zu verfassen.

Außerdem können auf Basis dieser Arbeit Vergleiche mit den Vortriebsleistungen des zyklischen Vortriebs aufgestellt werden. Hier gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass der große Vorteil des kontinuierlichen Tunnelvortriebs mit der Herstellung eines fertig ausgekleideten Tunnels unmittelbar nach der Maschine berücksichtigt werden muss. Für die Zukunft bieten sich in diesem Bereich interessante Forschungstätigkeiten an.

Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsgemeinschaft Bernard – Stucky. *Technische Vertragsbestimmungen – Projekt B.* Unterlagen aus der Bauausschreibung. 2013. 41 S.
- [2] Auftraggeber Projekt A. *Ausschreibung – Projekt A: Baubeschreibung.* Unterlagen aus der Bauausschreibung. 2010. 79 S.
- [3] Auftraggeber Projekt A. *Ausschreibung – Projekt A: Geomechanische Prognose.* Unterlagen aus der Bauausschreibung. 2010. 40 S.
- [4] Auftraggeber Projekt A. *Ausschreibung – Projekt A: Technische Vertragsbestimmungen für Tunnel in geschlossener Bauweise mit kontinuierlichem Vortrieb.* Unterlagen aus der Bauausschreibung. 2010. 89 S.
- [5] Auftraggeber Projekt C. *Baulosbeschreibung – Projekt C.* Unterlagen aus der Bauausschreibung. 133 S.
- [6] Ausführende Unternehmen Projekt A. *Generelle Informationen zu Projekt A im Rahmen der Diplomarbeit.* Wien, 2018.
- [7] Ausführende Unternehmen Projekt B. *Vortriebsmeldungen – Projekt B.* Wien, 2019.
- [8] Ausführende Unternehmen Projekt C. *Unterlagen aus der Bauausführung – Projekt C.* Analyseunterlagen im Rahmen der Diplomarbeit, bestehend aus Kalkulation, Bauaufzeichnung und Abrechnung. Wien, 2019.
- [9] Ausführende Unternehmen Projekt D. *Unterlagen aus der Bauausführung – Projekt D.* Analyseunterlagen im Rahmen der Diplomarbeit, bestehend aus Kalkulation, Bauaufzeichnung und Abrechnung. Wien, 2019.
- [10] Ausführende Unternehmen Projekt E. *Unterlagen aus der Bauausführung – Projekt E.* Analyseunterlagen im Rahmen der Diplomarbeit, bestehend aus Kalkulation, Bauaufzeichnung und Abrechnung. Wien, 2018.
- [11] Ausführende Unternehmen Projekt F. *Projekt F – Contracting Principles for Tunnelling – TBM Advance Baselines.* Vertragsgrundsätze für den Tunnelbau –TBM-Vortrieb Baselines – Projekt F. Wien, 2019, S. 27.
- [12] Ausführende Unternehmen Projekt F. *Projekt F – TBM tunneling operation.* Wien, 2016.
- [13] Ausführende Unternehmen Projekt F. *Projekt F – TBM-Advance Analysis.* TBM-Advance Analysis – Projekt F. Wien, 2019.
- [14] Ausführende Unternehmen Projekt F. *Unterlagen aus der Bauausführung – Projekt F.* Analyseunterlagen im Rahmen der Diplomarbeit, bestehend aus Kalkulation, Bauaufzeichnung und Abrechnung. Wien, 2018.
- [15] A. Bender und T. Bisenberger. *Forschungsbericht – Leistungsanalyse ausgewählter Projekte im maschinellen Tunnelbau.* Forschungsbericht. Wien: Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement – Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, März 2020. 60 S.
- [16] Bernard Ingenieure ZT GmbH. *Vortriebsdokumentation – Projekt B.* Hall in Tirol, 2019.

- [17] T. Bisenberger. *Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau. Zyklischer und maschineller Tunnelvortrieb – Ausschreibungsgrundlagen (Vortriebsklassenermittlung)*. Übung – Block 2. Technische Universität Wien, 2018. 14 S.
- [18] R. Brandner, F. Reiter und A. Töchterle. *Überblick zu den Ergebnissen der geologischen Vorerkundung für den Brenner-Basistunnel*. Forschungsbericht. Innsbruck: Universität Innsbruck, Institut für Geologie und Paläontologie. 10 S.
- [19] DAUB. *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen*. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), 2010. 48 S.
- [20] DAUB, ÖGG und FGU. *Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen*. Köln: Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB), Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) und Arbeitsgruppe Tunnelbau der Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen – FGU Fachgruppe für Untertagbau – Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 1997. 16 S.
- [21] Ecolog Engineering Ltd. *Projekt F – Tunnel profile and RMQ*. Rehovot, 2009.
- [22] M. J. Ferraro und T. Lathi. „Constructing the Mid Halton Effluent Outfall Tunnel“. In: *Tunnelling Association of Canada* (Okt. 2016), S. 7. URL: <https://www.tunnelcanada.ca/members/documents/2016/TAC2016/pdfs/tac2016Paper172.pdf> (Zugriff am 05.02.2020).
- [23] G. Girmscheid. *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau*. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2008. ISBN: 978-3-433-01852-1.
- [24] G. Girmscheid. *Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus*. 3.Auflage. Weinheim: Ernst & Sohn, 2013. ISBN: 978-3-433-03047-9.
- [25] GKI – Gemeinschaftskraftwerk Inn. *Gemeinschaftskraftwerk Inn – Ausschreibung, Bauzeitmittlung*. Ausschreibungsunterlagen. GKI, 2013. 14 S.
- [26] G. Goger. *Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 2017. 308 S.
- [27] Herrenknecht AG. *Doppelschild-TBM*. 2019. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/doppelschild-tbm/> (Zugriff am 13.09.2019).
- [28] Herrenknecht AG. *Einfachschild-TBM*. 2019. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/einfachschild-tbm/> (Zugriff am 14.09.2019).
- [29] Herrenknecht AG. *Gripper-TBM*. 2019. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/gripper-tbm/> (Zugriff am 14.09.2019).
- [30] Herrenknecht AG. *Mixschild*. 2019. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/mixschild/> (Zugriff am 14.09.2019).
- [31] G. Kvasina. *Diplomarbeit: Dokumentation bei zyklischem Tunnelvortrieb*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 2018. 116 S.
- [32] A. Lussu, S. Grüllich, C. Kaiser und A. Fontana. „15 km TBM Vortrieb im Los Tulfes Pfons – Erfahrungen und Erkenntnistransfer auf das Hauptbaulos“. In: *Geomechanics and Tunneling* Oktober (2019), S. 595–603.
- [33] B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl und G. Wehrmeyer. *Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb*. 2.Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 2011. ISBN: 978-3-433-02948-0.

- [34] ÖGG. *Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb*. Forschungsber. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2013. 49 S.
- [35] ÖNORM B 2110: 2013-03-15. *ÖNORM B 2110: Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen – Werkvertragsnorm*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [36] ÖNORM B 2118: 2013-03-15. *ÖNORM B 2118: Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen und Anwendung des Partnerschaftsmodells, insbesondere bei Großprojekten – Werkvertragsnorm*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [37] ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01. *ÖNORM B 2203-2: Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm – Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [38] M. Ramoni. „Ulriken Tunnel – erster TBM-Vortrieb für einen Bahntunnel in Norwegen“. In: *tunnel-online* (März 2016), S. 12. URL: https://www.baslerhofmann.ch/fileadmin/user_upload/basler-hofmann/Aktuelles/Fachartikel/16-05_FA_Der_Tunnel_Ausg03.16_Ulriken_Tunnel.pdf (Zugriff am 05.02.2020).
- [39] C. Schlatter. *Vergleichende Analyse der Projektkosten bei unterschiedlichen Vertragsmodellen am Beispiel eines 20 km Beileitungsstollens*. Masterarbeit. Management Center Innsbruck, 2017. 85 S.

Anhang A

Arbeitsbereiche verschiedener Tunnelvortriebsmaschinen

A.1 Bereiche einer TBM-O

Anhang A (normativ): Bezeichnungen für Tunnelvortriebsmaschinen

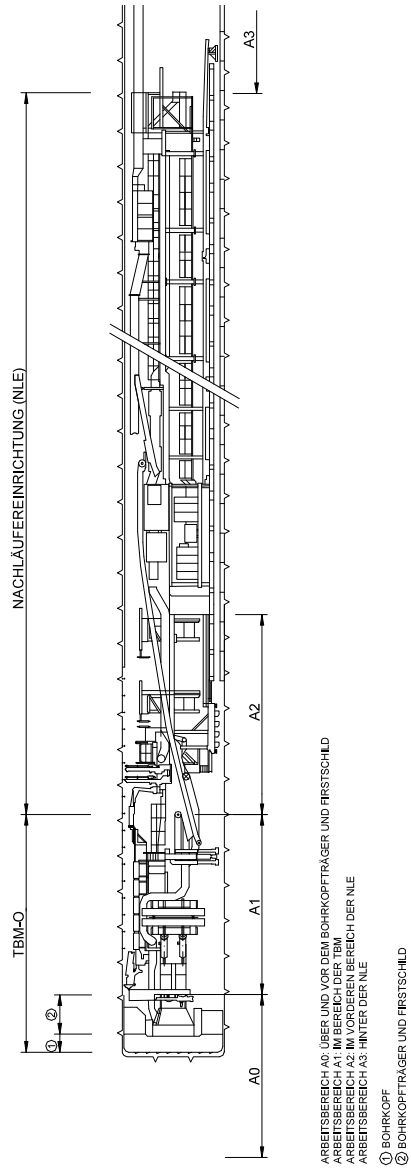


Bild A.1 – Systemskizze TBM-O

Abb. A.1: Bereiche einer TBM-O (Quelle: ÖNORM B 2203-2 [37, Anhang])

A.2 Bereiche einer DSM bzw. TBM-DS

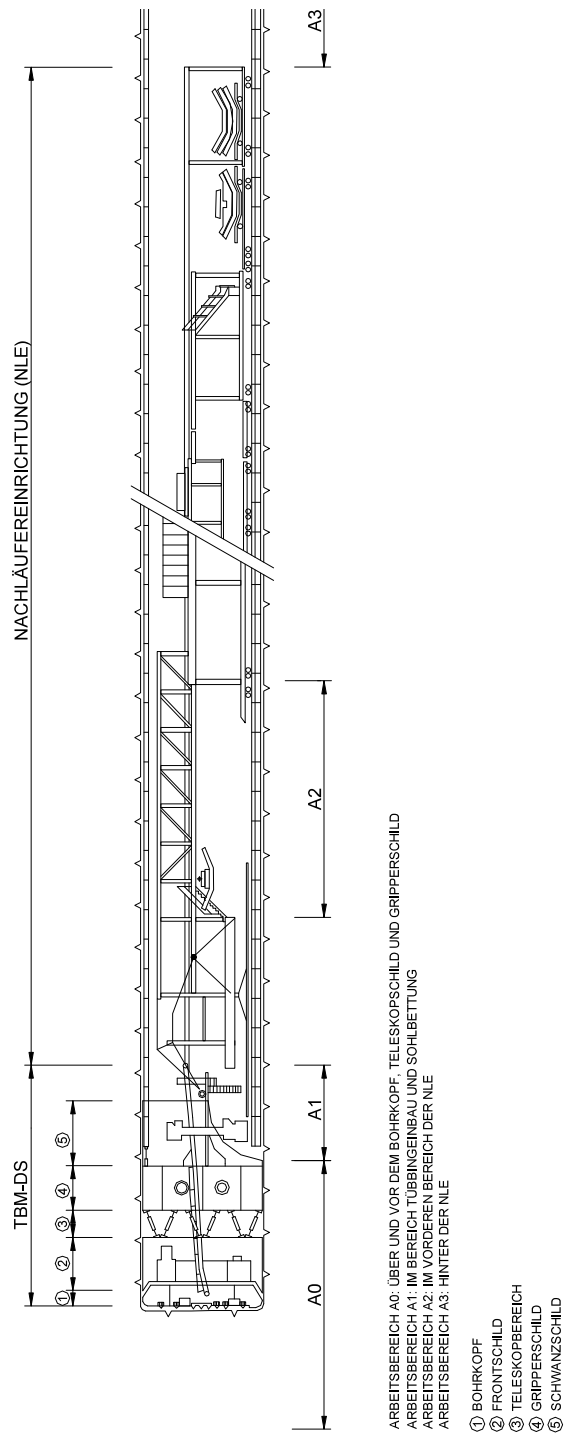


Bild A.2 – Systemskizze TBM-DS

Abb. A.2: Bereiche einer DSM (Quelle: ÖNORM B 2203-2 [37, Anhang])

Anhang B

Vortriebscodes der analysierten Tunnelvortriebsmaschinen

B.1 Projekt D

Tab. B.1: Vortriebscodes der TBM-O und Prozesszuordnung (Ist) – Projekt D, (Quelle: Ausführende Unternehmen Projekt D [9])

| Codename | Prozessname |
|-------------------------------|-------------------|
| Excavation | Bohrzeit |
| Re-Grip | Umsetzen |
| Install Tunnel Support | Sichern |
| General Planned Maintenance | Wartung |
| Cutterhead Inspection | Wartung |
| Maintenance Cutters | Wartung |
| Mechanical System | Sonstiges |
| Hydraulic System | Sonstiges |
| Electric System | Sonstiges |
| TBM Cleaning | Wartung |
| High Voltage Cable ext. | Sonstiges |
| Ventilation Cassette Change | Sonstiges |
| Water Pipe Extension | Sonstiges |
| Advance Laser | Sonstiges |
| Conveyor belt | Materialförderung |
| Material Supply problems/loci | Sonstiges |
| Drilling equipment | Probebohrung |
| Probe Drilling | Probebohrung |
| Methane/Gas | Erschwernis |
| Safety Talk | Sonstiges |
| TBM Assembly | – |
| Installing California Switch | – |
| Moving TBM through CP Shaft | – |
| Weekend non-working hours | – |
| Holiday Hours | – |

B.2 Projekt E

Tab. B.2: Vortriebscodes der TBM-O und Prozesszuordnung (Ist) – Projekt E, (Quelle: Ausführende Unternehmen Projekt E [10])

| Codename | Kürzel Prozess | Prozessname |
|---------------------------------------|----------------|--------------------|
| Vortrieb | A | Nettobohrzeit |
| TBM Umsetzen | C | Umsetzen |
| Wartung | D | Wartung, Reparatur |
| Wartungsarbeiten | D | Wartung, Reparatur |
| Meisselkontrolle | | |
| 33% | E | Meisselwechsel |
| 33% | D | Wartung, Reparatur |
| 34% | G | Sonstiges |
| Meisselwechsel | | |
| 33% | E | Meisselwechsel |
| 33% | D | Wartung, Reparatur |
| 34% | G | Sonstiges |
| Reparatur Meisselfixierung | | |
| 33% | E | Meisselwechsel |
| 33% | D | Wartung, Reparatur |
| 34% | G | Sonstiges |
| Bohrkopfreparatur | | |
| 33% | E | Meisselwechsel |
| 33% | D | Wartung, Reparatur |
| 34% | G | Sonstiges |
| Wartung Förderband TBM | D | Wartung, Reparatur |
| Wartung Förderband Tunnel | D | Wartung, Reparatur |
| Stillstände Ausfälle | G | Sonstiges |
| Stillstand Sicherung L1 | B | Sichern |
| Stillstand Sicherung L2 | B | Sichern |
| Stillstand Tübbingeinbau | B | Sichern |
| Stillstand Tübbinginjektion | B | Sichern |
| Stillstand Vermessung | G | Sonstiges |
| Stillstand Stromausfall | G | Sonstiges |
| Stillstand Logistik | F | Materialförderung |
| Umbauten, Änderungen TBM | G | Sonstiges |
| Stillstand Sondierbohrung | B | Sichern |
| Stillstand Injektionsarbeiten | B | Sichern |
| Stillstand Unterweisung | G | Sonstiges |
| Stillstand Bauherr | G | Sonstiges |
| Stillstand Diverses | G | Sonstiges |
| Stillstand Wasserleitungsverlängerung | G | Sonstiges |
| Hochspannungsverlängerung | G | Sonstiges |
| Förderbandverlängerung | G | Sonstiges |
| Defekte | G | Sonstiges |

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. B.2: Vortriebscodes der TBM-O und Prozesszuordnung (Ist) – Projekt E (Fortsetzung)

| Codename | Kürzel Prozess | Prozessname |
|----------------------------|----------------|-------------------|
| Mechanischer Defekt | G | Sonstiges |
| Hydraulischer Defekt | G | Sonstiges |
| Elektrischer Defekt | G | Sonstiges |
| Elektronischer Defekt | G | Sonstiges |
| Defekt Maschinenband | | |
| 50% | F | Materialförderung |
| 50% | G | Sonstiges |
| Defekt Nachläuferband | | |
| 50% | F | Materialförderung |
| 50% | G | Sonstiges |
| Defekt Förderband 1010 | | |
| 50% | F | Materialförderung |
| 50% | G | Sonstiges |
| Defekt Förderband 1020 | | |
| 50% | F | Materialförderung |
| 50% | G | Sonstiges |
| Defekt Förderband 1050 | | |
| 50% | F | Materialförderung |
| 50% | G | Sonstiges |
| Defekt Diverses | G | Sonstiges |
| Defekt Spritzroboter | G | Sonstiges |
| Spritzbetonpumpe | G | Sonstiges |
| Defekt Bohrlafette | G | Sonstiges |
| Stillstand/Wartung/Defekte | G | Sonstiges |