

Diploma Thesis

Familiarisation effect in mechanized tunneling

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

Diplomarbeit

Einarbeitungseffekte im maschinellen Tunnelbau

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

von

Franz Hochwimmer, BSc

Matr.Nr.: 01229222

unter der Anleitung von

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

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

Institut für
Interdisziplinäres Bauprozessmanagement Baubetrieb und Bauwirtschaft
Forschungsbereich
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/234-1, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Juni 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 Tunnelvortrieb, Vortriebsunterbrechungen, Einarbeitungsdauer, Einarbeitungseffekt

Diese Diplomarbeit ist ein Teil der regen Forschungstätigkeit im Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik am Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement der TU Wien. Diese Arbeit soll zum besseren Verständnis, zur Berechnung und Nutzung des Einarbeitungseffekt (EAE) im maschinellen Tunnelbau und der zeitlichen Projektierung von Tunnelbauprojekten dienen. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass der EAE von einer Reihe an Einwirkungen, wie z.B. Personal, Gerät und anderen Bestandteilen eines Bauprozesses, maßgeblich beeinflusst wird. Der Vortrieb ist in folgender Weise durch den EAE charakterisiert. Die Aufwandswerte pro geleisteter Vortriebseinheit sinken mit zunehmender Vortriebstrecke. Die Abnahme der Zeitaufwände pro Vortriebseinheit sind am besten nach Störungen der Vortriebsarbeiten zu erkennen, denn in diesem Zeitraum stellt sich das Personal und alle anderen Ressourcen auf die geänderten Vortriebsbedingungen ein. Die zuvor genannte Anpassung der Rahmenbedingungen des Vortriebs benötigt am Anfang den größten Zeitaufwand und verringert sich sukzessive mit fortschreitendem Vortrieb. Bei maschinellen Vortrieben ist in der Regel eine kürzere Einarbeitungsdauer zu verzeichnen, als bei konventionell aufgefahrenen Tunnelabschnitten. Dieser Umstand lässt sich unter anderem dadurch begründen, dass im konventionellen Tunnelvortrieb eine größere Menge an Personen mit den direkten Vortriebsarbeiten beschäftigt ist als dies beim maschinellen Vortrieb der Fall ist.

Zu Beginn der Arbeit wird nach der Klärung von Begrifflichkeiten eine eingehende Grundlagenermittlung durchgeführt. Diese teilt sich in eine Ausarbeitung der maschinellen Vortriebskonzepte, des Weiteren werden die möglichen Störungen und Vortriebsunterbrechungen eingehend untersucht. Gegen Ende der Grundlagenermittlung werden der Begriff des Lernens und der Einarbeitungseffekt eingehend behandelt. In Hinsicht auf den Einarbeitungseffekt wird eine Reihe der bisher in der Literatur etablierten Ansätze zur Ermittlung des Einarbeitungseffekts beschrieben.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird anhand realer Projekte versucht, die Einarbeitung nach Störungen des Vortriebs sowie die Regelmäßigkeiten zwischen der Vortriebsunterbrechung und der Wiedereinarbeitungszeit darzulegen. Im Vorfeld der Untersuchungen werden Beschreibungen der einzelnen Projekte gegeben, um dem Leser ein besseres Verständnis der Baustellensituation zu geben. In dieser Beschreibung werden die allgemeinen Projektparameter, die Geologie, sowie die verwendeten Tunnelvortriebsmaschinen, soweit die Informationen vorhanden sind, erläutert. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die verschiedenen Versuche der Datenauswertung expliziert. Die unterschiedlichen Entwicklungsprozesse waren notwendig, um die großen Mengen und die Volatilität der Daten sinnvoll verarbeiten zu können. In weiterer Folge wurde eine Formel erarbeitet, welche eine Abschätzung der Einarbeitungsdauer in Abhängigkeit von der Stillstandsdauer ermöglichen soll. Der ausgearbeitete Formalismus wurde anschließend anhand der verschiedenen realen Datensätze untersucht und getestet.



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: mechanized tunneling, interruption of tunneling, time of familiarisation, the familiarisation effect

This diploma thesis is part of the lively research activity in the research area of construction operations and construction process engineering at the Institute for Interdisciplinary Building Process Management at the Vienna University of Technology. This work is intended to provide a better understanding, calculation and use of the familiarization effect in mechanical tunnel construction and in the time planning of tunnel construction projects. At this point it should be noted that the familiarization effect is influenced from a number of actions, such as staff, equipment and other components, which are used in a construction process. The drilling progress is characterized in the following way by the familiarization effect. The amount of time per completed tunneling unit decreases with increasing tunneling distance. The decrease in time spent per tunneling unit can best be recognized after disruption of the tunneling work, because during this period the personnel and all other resources adjust to the changed tunneling conditions. The aforementioned adjustment of the general conditions of the tunneling requires the greatest amount of time in the beginning and is gradually reduced as the tunneling progresses. Mechanized tunneling normally has a shorter period of familiarization than conventionally excavated tunnel sections. One of the reasons for this is that conventional tunneling involves a larger number of people working directly on the tunnel.

At the beginning of the work, after clarifying terms, an in-depth determination of the basics is carried out. This is divided into the elaboration of the mechanical tunneling concepts, furthermore the possible interruptions to tunneling are dealt with in detail. With regard to the familiarization effect, a number of approaches to determining the familiarization effect that have so far been established in the literature are described.

In the further course of the work, real projects will try to work out the familiarization after disruption of the tunneling as well as the regularities between the tunneling interruption and the re-training period. Before the investigations, descriptions of the individual projects are given to give the reader a better understanding of the construction site situation. This description explains the general project parameters, the geology and the tunneling machine which is used. The description goes as far as the information is available. Subsequently, a formula was developed which should allow an estimate of the familiarisation period depending on the downtime. The formalism developed was subsequently examined and tested on the basis of the various real data sets.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 8 |
| 1.1 | Motivation | 9 |
| 1.2 | Forschungsfragen | 10 |
| 1.3 | Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit | 10 |
| 1.4 | Abkürzungsverzeichnis | 11 |
| 1.5 | Begriffsbestimmungen | 12 |
| 2 | Grundlagenermittlung maschineller Tunnelbau | 17 |
| 2.1 | Tunnelvortriebsmaschinen für den kontinuierlichen Vortrieb | 19 |
| 2.2 | Tunnelbohrmaschine | 21 |
| 2.2.1 | Offene TBM – Gripper TBM | 22 |
| 2.2.2 | Erweiterungstunnelbohrmaschine | 24 |
| 2.2.3 | Tunnelbohrmaschine mit Schild | 25 |
| 2.2.4 | Doppelschildmaschinen | 28 |
| 3 | Störungen und Vortriebsunterbrechungen im Tunnelbau | 31 |
| 3.1 | Definitionen | 31 |
| 3.1.1 | Leistungsstörung | 31 |
| 3.1.2 | Regelvortrieb | 31 |
| 3.1.3 | Erschwerter Vortrieb | 32 |
| 3.1.4 | Gestörter Bauablauf nach Müller/Goger | 33 |
| 3.1.5 | Vortriebsunterbrechung nach ÖNORM B 2203-2 | 33 |
| 3.1.6 | Vortriebsunterbrechung nach dem Autor | 33 |
| 3.2 | Ursachen Vortriebsunterbrechungen bzw. Störungen | 33 |
| 3.2.1 | Ursachen für Vortriebsunterbrechungen, die vor Vortriebsbeginn bekannt sind | 34 |
| 3.2.2 | Ursachen für Vortriebsunterbrechungen, die vor Vortriebsbeginn nicht bekannt sind | 35 |
| 3.3 | Auswirkungen von Vortriebsunterbrechungen und Verknüpfung mit dem Einarbeitungseffekt | 36 |
| 3.4 | Maßnahmen zur Verminderung und zur Verkürzung von Vortriebsunterbrechungen | 37 |
| 3.4.1 | Maßnahmen – konstruktiv | 38 |
| 3.4.2 | Maßnahmen – baubetrieblich bzw. bauablauftechnisch | 40 |
| 4 | Das Lernen und der Einarbeitungseffekt im maschinellen Tunnelbau | 45 |
| 4.1 | Das Lernen im maschinellen Tunnelbau | 45 |
| 4.2 | Der Einarbeitungseffekt im Tunnelbau | 47 |
| 4.2.1 | Definitionen in der Literatur | 48 |
| 4.2.2 | Mögliche Messgrößen für den Einarbeitungseffekt im maschinellen Tunnelbau | 49 |
| 4.3 | Auswahl der Messgrößen für die Erfassung des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau | 51 |
| 4.3.1 | Anforderungen für die Auswahl der Messgröße zur Erfassung des Einarbeitungseffekts | 51 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3.2 | Problem der Schwankungsbreiten von Messgrößen | 51 |
| 4.4 | Einflussgrößen des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau | 53 |
| 4.5 | Möglichkeiten der Berechnung des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau | 56 |
| 4.5.1 | Einarbeitungseffekt nach Drees/Spranz | 56 |
| 4.5.2 | Einarbeitungseffekt nach Körner | 56 |
| 4.5.3 | Einarbeitungseffekt nach Platz | 57 |
| 4.5.4 | Einarbeitungseffekt nach Lang | 59 |
| 4.6 | Arten von Einarbeitungseffekten im maschinellen Tunnelbau | 63 |
| 4.7 | Zwischenfazit zur Grundlagenermittlung | 64 |
| 5 | Projektbeschreibungen | 67 |
| 5.1 | Projekt A | 67 |
| 5.2 | Projekt B | 67 |
| 5.3 | Projekt C | 68 |
| 5.3.1 | Projektparameter | 68 |
| 5.3.2 | Geologische Situation | 69 |
| 5.3.3 | Tunnelbohrmaschine | 70 |
| 5.4 | Projekt D | 71 |
| 5.4.1 | Projektparameter | 71 |
| 5.4.2 | Geologische Situation | 72 |
| 5.4.3 | Tunnelbohrmaschine | 73 |
| 6 | Forschungsmethodik und Datenanalyse | 75 |
| 6.1 | Forschungsmethodik | 75 |
| 6.1.1 | Versuch 1 – Datenauswertung – Aufwandswerte pro Tunnelmeter bezogen auf Vortriebstage bzw. laufende Tunnelmeter | 75 |
| 6.1.2 | Versuch 2 – Datenauswertung – Ermittlung Ende der Einarbeitungsphase | 77 |
| 6.1.3 | Versuch 3 – Datenauswertung – Aufwandswert pro Woche bezogen auf Kalenderwochen | 77 |
| 6.1.4 | Versuch 4 – 30 Hübe in 3 Abschnitten | 78 |
| 6.1.5 | Versuch 5 – Datenauswertung – Prozentuelle Grenzen bei der Einarbeitung | 79 |
| 6.2 | Datenauswertung | 82 |
| 6.2.1 | Projekt A – Vortrieb 1 | 82 |
| 6.2.2 | Projekt A – Vortrieb 2 | 82 |
| 6.2.3 | Projekt B | 82 |
| 6.2.4 | Projekt C | 83 |
| 6.2.5 | Projekt D | 87 |
| 7 | Fazit | 93 |
| 7.1 | Zusammenfassung des Einarbeitungseffekts bei maschinellen Tunnelvortrieben . . | 93 |
| 7.2 | Gegenüberstellung der analysierten Vortriebsdaten | 94 |
| 7.3 | Beantwortung Forschungsfragen | 95 |
| 7.4 | Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder – Handlungsempfehlung | 97 |

Kapitel 1

Einleitung

Ein Tunnelbauwerk hat viele Spezifika, welche im Laufe seiner Errichtung zu Tage treten. Dabei ist das Gebirge bzw. Erdreich nicht nur das Material, welches durchörtert werden soll, sondern gleichzeitig auch Einwirkung und tragendes Element. Sowohl im Tunnelbau als auch im Hochbau und vielen anderen Sparten der Bauwirtschaft ist das Phänomen des Einarbeitungseffekts weitgehend bekannt, jedoch wird diesem Thema oft nicht die Bedeutung zugewiesen, die es aus der Sicht des Autors hat. Unter dem Einarbeitungseffekt versteht man die Verkürzung des Zeitaufwandes für Tätigkeiten, welche während des Arbeitsprozesses durchzuführen sind. Diesem Effekt wird in vielen anderen produzierenden Industrien ein weitaus größerer Stellenwert zugemessen, als dies in der Bauwirtschaft getan wird. So werden in stationär produzierenden Industrien die verschiedenen Arten des Einarbeitungseffekts bereits in die Produktionsplanung mit eingearbeitet. Wie bereits erwähnt, wurde das Thema des Einarbeitungseffekts in der Bauwirtschaft und damit auch in wissenschaftlichen Arbeiten im Vergleich zu anderen Themengebieten von einer geringen Anzahl an Autoren behandelt. Dadurch ergibt sich nur eine geringe Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten, die sich bisher mit dieser Thematik auseinandergesetzt haben.

Der Tunnelbau und der damit verbundene Einarbeitungseffekt wird von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst, welche entweder einzeln, gemeinsam oder auch gemeinsam und sich gegenseitig beeinflussend wirken können. Um die Dauer des Einarbeitungseffekts aus wirtschaftlicher Sicht möglichst kurz zu halten, ist es notwendig, die einzelnen Arbeitsschritte einer Tunnelbaustelle möglichst gut aufeinander abzustimmen und miteinander zu verknüpfen. Daher bietet sich eine Linienbaustelle, wie dies beim Tunnelbau der Fall ist, an, da bei diesen Baustellen die meisten Arbeitsabläufe sowohl räumlich als auch zeitlich aufeinander erfolgen müssen. Bei konventionellen Linienbaustellen, wie zum Beispiel bei obertägigen Straßen- oder Eisenbahnbaustellen kann die Trasse bzw. die Streckenführung im Zuge einer Begehung besichtigt werden. Dies ist bei Tunnelbaustellen aufgrund der unterirdisch liegenden Baustelle nicht möglich. Damit der Bauingenieur¹ das Potential des Einarbeitungseffekts bei Tunnelbauprojekten in Zukunft besser quantifizieren kann, beschäftigt sich diese Diplomarbeit im Rahmen der Forschungsarbeiten am Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik an der Technischen Universität Wien mit den Einflüssen von Störungen auf den primären EAE bzw. auf den EAE nach konsekutiven Störungen² mit erheblicher Stillstandsdauer. Die aufgetretenen Störungen bzw. die daraus resultierenden Einarbeitungseffekte werden anhand von Realdaten aus bereits abgeschlossenen oder noch im Bau befindlichen Projekten untersucht. Des Weiteren wird im Zuge dieser Arbeit eine Formel entwickelt, mit der die Dauer der Einarbeitungsphase in Abhängigkeit von der Dauer der Vortriebsunterbrechung berechnet wird. Dieser Formalismus wird ebenfalls anhand der realen Datensätze erprobt.

Zu Beginn der Arbeit erfolgt die Vorstellung der Forschungsmethodik sowie der Forschungsfragen, welche im Laufe der Arbeit durch die Untersuchungen und Auswertungen beantwortet

¹Der Verfasser dieser Arbeit ist für die vollständige Gleichbehandlung von Männern und Frauen. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird jedoch auf die geschlechterspezifisch gleichwertigen Formulierungen verzichtet.

²Unter **konsekutiven Störungen** versteht man die zeitlich bzw. räumlich aufeinanderfolgenden Störungen.

werden. Die Grundlagenermittlung, welche ihr Fundament auf einschlägige Fachliteratur stellt, soll einen ersten Überblick über das Themengebiet des Einarbeitungseffekts geben. Unter anderem soll dem Leser in dem zuvor genannten Abschnitt der Arbeit, ein Einblick in die Begrifflichkeit des Tunnelbaus gegeben werden, um die nachfolgenden Kapitel und Untersuchungsergebnisse besser verstehen zu können.

1.1 Motivation

Wie aus den derzeitigen Entwicklungen in der Bauwirtschaft zu erkennen ist, müssen Bauvorhaben in immer kürzeren Zeiträumen projektiert und realisiert werden. Dies bedingt unter anderem eine kürzere Bau- bzw. davor geschaltete Planungsphase. Aufgrund der oft fehlenden Zeit für vorbereitende Maßnahmen einer Baustelle und aufgrund einiger anderer Bedingungen werden die Leistungsannahmen für Tunnelvortriebsmaschinen der unterschiedlichsten Typen oft zu progressiv bzw. offensiv angenommen. Dies führt in der Folge meist zu Bauverzögerungen und Bauzeitverlängerungen. Ein anderer Punkt, der einen großen Anteil an den Bauzeitverlängerungen haben kann, sind Störfälle der Tunnelvortriebsmaschinen und nach Beseitigung der Störungen folgende Einarbeitungsphasen, welche beim erneutem Anfahren des Tunnelquerschnitts auftreten.

Der Verfasser der Diplomarbeit hat es sich zum Ziel gesetzt, durch die Auswertung von verschiedenen Projekten unter anderem den Zusammenhang von Störungsdauer und Einarbeitungsdauer zu untersuchen. Dies soll für zukünftige Projekte eine Hilfestellung geben, um nach erfolgtem Störungseintritt die Dauer für die erneute Einarbeitung zu verringern, d.h. möglichst gering zu halten. Diese Diplomarbeit bietet dem Verfasser die Möglichkeit, anhand von tatsächlichen Tunnelbauprojekten sich in einem sehr interessanten Fachgebiet zu betätigen und durch Datenanalysen und Auswertungen vielleicht eine kleine Verbesserung des Arbeitsalltags im Tunnelbau zu ermöglichen. Die Erkenntnisse der vorliegenden Diplomarbeit sollen unter anderem auch helfen, das rarste Gut in heutigen Tagen zu bewahren, nämlich die Zeit.

Beim maschinellen Tunnelbau ist trotz einer sehr genauen Planung des Bauablaufs, sowie einer möglichst exakten Untersuchung des Untergrundes mit unvorhergesehenen Ereignissen und daraus resultierenden Problemen während des Bauablaufs zu rechnen. Eine vollständige Vermeidung von Problemen ist aus Sicht des Verfassers nicht möglich, da bei einem Projekt, welches ausschließlich unter Tage durchgeführt wird, immer mit teils unbekanntem Faktoren zu arbeiten ist. Diese Probleme sind der Komplexität eines Tunnelbauprojekts sowie den miteinander interagierenden Teildisziplinen des Bauingenieurwesens geschuldet. Aus Sicht des Verfassers ist es wichtig, den nach dem Baubeginn bzw. dem Auftreten von Problemen und Vortriebsstörungen einsetzenden Einarbeitungseffekt quantifizieren zu können. In diesem Zusammenhang ist es ebenfalls von Bedeutung, eine relativ genaue Aussage über die Dauer des Einarbeitungseffekts machen zu können. Damit in Verbindung steht der Zeitpunkt, ab dem nach einer Störung des Vortriebs wieder mit der maximalen Leistung der am Projekt beteiligten Arbeitsgruppen gerechnet werden kann. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung von Einarbeitungseffekten im maschinellen Tunnelbau und versucht dabei, die zeitliche Bedeutung des Einarbeitungseffekts zu veranschaulichen und dessen Quantifizierung in Zukunft zu ermöglichen. Die Untersuchungen werden dabei anhand von realen Projekten durchgeführt und sollen für die zukünftigen Abwicklungen Erleichterungen des Bauablaufs bewirken.

1.2 Forschungsfragen

Mit Hilfe der im Vorfeld der Arbeit festgelegten Forschungsfragen soll das Forschungsgebiet grob abgesteckt und die Rahmenbedingungen für die Forschungsmethodik vorgegeben werden.

1. Kann bei den Datenerhebungen der real abgewickelten Projekte eine allgemeine Tendenz zwischen der Dauer der Vortriebsunterbrechung und Wiedereinarbeitungszeit erkannt werden?
2. Ist es möglich, die Zeit von Stillständen zu verkürzen bzw. künftige Stillstandsdauern zu minimieren?
3. Haben konsekutive Störungen bei einem Bauvorhaben Auswirkungen auf den temporären Einarbeitungseffekt?
4. Welche Verfahren der Literatur sind zur Berechnung des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau geeignet?

1.3 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit

Für die Beantwortung der Forschungsfragen sind eine weitreichende Grundlagenermittlung sowie Untersuchungen an realen Projekten essentiell notwendig. Diese Recherche- und Forschungstätigkeiten gliedern sich wie folgt auf. Der erste Schritt der vorliegenden Diplomarbeit besteht aus einer umfangreichen **Literaturrecherche**. Diese soll dem Verfasser helfen, die einzelnen Prozesse und die damit zusammenhängenden Problematiken des maschinellen Tunnelbaus besser verstehen zu können. Des Weiteren soll es dem Verfasser durch eine ausgedehnte Grundlagenermittlung ermöglicht werden, den Kontext zwischen den im Tunnelbau vereinigten Disziplinen des Tiefbaus zu verstehen. Im Rahmen dieser Recherchetätigkeit ist es notwendig, die technischen Eigenschaften der einzelnen Maschinentypen zu ermitteln und daraus die geologischen Randbedingungen der einzelnen Maschinentypen grob abstecken zu können.

Im nächsten Kapitel der Arbeit sollen Definitionen von verschiedenen Vortriebsarten sowie Störungsursachen näher erklärt werden. Die zuvor genannten Definitionen und die Einflüsse auf Störungen sollen in Kapitel 3 annähernd vollständig abgehandelt und fallweise anhand von real aufgetretenen Beispielen erläutert werden. Im Anschluss an den Grundlagenteil sollen im Kapitel 4 das Lernen und der Einarbeitungseffekt im Tunnelbau erläutert werden. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird auf die Einflussgrößen des Einarbeitungseffekts sowie die Berechnung desselben näher eingegangen. Gegen Ende des vierten Kapitels werden die verschiedenen Arten des Einarbeitungseffekts dargelegt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen die Datenauswertung und die damit verbundene Forschungstätigkeit durchgeführt werden. Dazu ist es zu Beginn des Kapitels notwendig, eine allgemein gültige Begriffsdefinition einzuführen. Danach soll anhand von Datensätzen mehrerer real durchgeführter Projekte der Einarbeitungseffekt in verschiedenen Varianten untersucht werden.

In Kapitel 5 dieser Arbeit wird es zu jedem untersuchten Projekt eine Erläuterung der Projektparameter, der geologischen Situation sowie eine Beschreibung des Maschinentyps der Tunnelbohrmaschine geben. Dieses Kapitel soll es den Lesern dieser Arbeit erleichtern, die aufgetretenen Störungsursachen und die damit verbundenen Einarbeitungseffekte in einem gesamtheitlichen Projektkontext zu sehen. Bei der Untersuchung der Einzelprojekte werden nicht nur die primären Einarbeitungseffekte zu Beginn eines jeden Projektes ermittelt, sondern auch die Einarbeitungseffekte nach konsekutiven Störungen ab einer erheblichen Stillstandsdauer. Im

Anschluss sollen die Einarbeitungseffekte, welche einen unterschiedlichen Zeitpunkt des Auftretens im Projekt haben, miteinander verglichen werden. Im Zuge der Erstellung der Arbeit wird eine enge Zusammenarbeit mit mehreren Experten auf dem Gebiet des maschinellen Tunnelbaus angestrebt. Diese sind sowohl auf der Auftragnehmer- als auch auf der Auftraggeberseite tätig und mit den Problemen des täglichen Tunnelbaugeschäfts bestens vertraut. Die Kommunikation mit den Experten hat größtenteils persönlich stattgefunden.

Zu Beginn von Kapitel 6 wird auf die Forschungsmethodik eingegangen. Dort werden die einzelnen Versuche und Vorgehensweisen bei der Ermittlung der Einarbeitung beschrieben. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird die Datenauswertung durchgeführt. Abschließend soll eine Zusammenfassung, eine Gegenüberstellung aller Vortriebsdaten, die Beantwortung der Forschungsfragen sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder gegeben werden.

1.4 Abkürzungsverzeichnis

In den folgenden Abschnitten erfolgt die Auflistung der Abkürzungen sowie der Beschreibung von Begriffen, die für das Verständnis der Arbeit von Bedeutung sind und in dieser Arbeit verwendet werden.

ARH Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau

DA Diplomarbeit

DCRM Disc Cutter Rotation Monitoring

DSM Doppelschildmaschine

EAE Einarbeitungseffekt

ETBM Erweiterungstunnelbohrmaschine

GV Gebirgsverhalten

GVT Gebirgsverhaltenstyp

MAK Maximale Arbeitsplatzkonzentration

MP Mathematikprogramm

NLE Nachläufereinrichtung

OBV Ortsbrustverhalten

R² Root-square

RMSE Root mean square error

SM Schildmaschine

SV Systemverhalten

TBM Tunnelbohrmaschine

TBM-A Tunnelbohrmaschine mit Aufweitungsbohrkopf

TBM-O offene Tunnelbohrmaschine

TBM-S Tunnelbohrmaschine mit Einfachschild

TKP Tabellenkalkulationsprogramm

TVM Tunnelvortriebsmaschine

VA Vortriebsabschnitt

1.5 Begriffsbestimmungen

In diesem Abschnitt sind die Beschreibungen der für diese Arbeit wichtigen Begriffe des maschinellen Tunnelbaus sowie des Baubetriebs aufgelistet. Die Definitionen der Begriffe werden in der ÖNORM B 2203-02 [23], der RVS 9.251 [26] und der ÖGG-KONT:2013 [27] beschrieben.

Abrasivität: Den Werkzeugverschleiß bestimmende Gesteinseigenschaften.^{3 4}

Anker: Zur Hohlraumstützung und Verbesserung der Gebirgseigenschaften eingebaute Stäbe, Rohre oder Litzen.³

Betriebsweise: Art der Ortsbruststützung, mit der eine Schildmaschine gefahren werden kann. Es wird zwischen offener Betriebsweise (ohne Ortsbruststützung) und geschlossener Betriebsweise (mit Ortsbruststützung) unterschieden. Für den Wechsel der Betriebsweise sind keine Umbaumaßnahmen erforderlich.^{3 4}

Blockigkeit: Erscheinung beim Vortrieb im Festgestein, bei der es an der Ortsbrust oder innerhalb des Bohrkopfbereiches zum Ablösen größerer Gesteinsbrocken aus dem Gesteinsverband kommt.^{3 4}

Bohrbarkeit: Von den Gesteinseigenschaften abhängige Möglichkeit, Gestein im Vollschnitt mit einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM) zu lösen.^{3 4}

Bohrgeschwindigkeit: Eindringtiefe des Bohrkopfs pro Zeiteinheit (m/h) ohne Berücksichtigung von Unterbrechungen (Netto-Bohrgeschwindigkeit).³

Bohrkopf, Schneidrad: Mechanische Vorrichtung zum vollflächigen Abbau des Tunnelquerschnittes. Der Abbau erfolgt rotierend, die Werkzeugbestückung des Bohrkopfes erfolgt in Abhängigkeit vom Gebirge.³

Doppelschildmaschine (DSM): Tunnelbohrmaschinen mit Doppelschild werden wie TBM-S in nachbrüchigem bis gebrächen Gestein angewendet. Durch das zweigeteilte überlappende Schild kann der Vortrieb unabhängig vom Einbau der Sicherungen erfolgen, wodurch die Vortriebsleistung gegenüber der TBM-S erheblich gesteigert wird. Der notwendige Vorschub und die Verspannung der Maschine erfolgt entweder über eine Grippersverspannung, am Tübbingausbau abgestützte Vortriebspresen oder eine Kombination der zuvor genannten Systeme.⁵

Erektor: Ein (Tübbing-) Erektor ist eine hydraulisch angetriebene Maschine, welche innerhalb des Nachläufers der Tunnelbohrmaschine verbaut ist. Durch mehrere Vakuumsaugplatten ermöglicht er einen präzisen Einbau von Tübbing und Stahlbögen.⁵

³Vgl. [25] ÖNORM B 2203-2:2005 01 01, S. 4 ff.

⁴Vgl. [27] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (Hrsg.), S. 4 ff.

⁵Vgl. [7] Chylik, S. 13 ff.

Erschwernis: Einfluss, welcher höheren Aufwand verursacht oder die erzielbare Vortriebsgeschwindigkeit des eingesetzten Vortriebssystems reduziert und ohne aktives Zutun der Vertragspartner entsteht, wie Wasserzutritt, Blockigkeit, eingeschränkte oder fehlende Verspannbarkeit, Klebrigkeit, Mixed Face-Bedingung.³

Festgestein, Fels: Mineralgemenge, dessen Eigenschaften hauptsächlich durch seine physikalisch-chemische Bindung bestimmt sind.^{3 4}

Gebirge: Teil der Erdkruste, zusammengesetzt aus Festgestein (Fels) und Lockergestein (Boden), einschließlich der Anisotropien, Trennflächen und Hohlräume mit Füllungen aus flüssigen oder gasförmigen Bestandteilen.^{3 4}

Gebirgsverhalten (GV): Reaktion des Gebirges auf den Ausbruch ohne Berücksichtigung von Stützung oder Querschnittsunterteilung.⁴

Gebirgsverhaltenstyp (GVT): Übergeordnete Kategorien von ähnlichem Gebirgsverhalten in Bezug auf Verformungscharakteristika und Versagensmechanismen.⁴

Gesteinsart: Locker- oder Festgestein mit gleichartigen Eigenschaften.^{3 4}

Gripper: Gripper, auch Verspannplatten oder Verspannsystem genannt, sind hydraulisch bewegliche Platten, welche dem kreisförmigen Ausbruchprofil angepasst sind. Durch radiales Verspannen gegen das anstehende Gebirge können die Reaktionskräfte aus Vorschub, Bohrkopfantrieb und Eigengewicht abgeleitet und der benötigte Anpressdruck für den Bohrvorgang erzeugt werden. Sie kommen bei offenen Tunnelbohrmaschinen und Tunnelbohrmaschinen mit Doppelschild zum Einsatz.⁵

Innenschale: Inneres, flächiges Konstruktionselement zur Erfüllung konstruktiver und/oder funktionaler Erfordernisse, welches nicht zur unmittelbaren Hohlräumeicherung dient und außerhalb des Vortriebsbereiches eingebaut wird.³

Klebrigkeit: Starke Adhäsion von Ausbruchsmaterial an Maschinenteilen oder Klumpenbildung.^{3 4}

Konditionierungsmittel: Bodenverbessernde Substanzen wie Wasser, Bentonit und Schaum, welche die Verformbarkeit, die Konsistenz und die Wasserdurchlässigkeit der Geologie verändern.

Lockergestein–Boden: Anhäufung von anorganischen und verschiedenenkörnigen Feststoffen, fallweise auch mit organischen Beimengungen, deren Eigenschaften vorwiegend durch die Kornzusammensetzung, die Lagerungsdichte und den Wassergehalt bestimmt sind.^{3 4}

Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK): Darunter versteht man den maximalen Arbeitsplatzkonzentrationswert, also die höchstzulässige Durchschnittskonzentration eines Schadstoffes in der Luft während der Arbeitszeit von acht Stunden pro Tag.⁶

Nachläufereinrichtung (NLE): System von Arbeitsplattformen, Portalwagen u.Ä., das zur Versorgung und Entsorgung der TVM sowie gegebenenfalls zur Einbringung von Stütz- und Ausbaumaßnahmen (Arbeitsbereich A2) notwendige Einrichtungen enthält.³

Ortsbrustverhalten (OBV): Verhalten der ungestützten Ortsbrust ohne Beeinflussung durch die TVM in Bezug auf Verformungscharakteristika und Versagensmechanismen.⁴

⁶Vgl. [16] Hofer

offene Tunnelbohrmaschine (TBM-O): Eine offene Tunnelbohrmaschine zeichnet sich dadurch aus, dass sie sich selbst im standfesten bis nachbrüchigen Gebirge mittels Grippern verspannen kann und somit den notwendigen Anpressdruck für den Bohrkopf sicherstellt. Die Maschine kommt somit ohne gebirgsstützende Schilder hinter dem Bohrkopf aus, wodurch der Einbau von Stützmitteln, wie beispielsweise Tunnelbögen und Spritzbeton, erleichtert wird. Falls es zum Schutz der Mannschaft erforderlich ist, können unterschiedliche Schutzdächer im Bohrkopfbereich eingebaut werden, welche das Vortriebsprinzip jedoch nicht verändern.⁵

Penetration: Eindringtiefe des Bohrwerkzeuges bei einer Umdrehung des Bohrkopfs, im Allgemeinen angegeben in mm/U.³

prognostizierte Vortriebsdauer: Vortriebsdauer, errechnet aus der für die Ausschreibung prognostizierten Verteilung der Vortriebsklassen und der vertraglich vereinbarten Vortriebsgeschwindigkeit, zuzüglich der erwarteten Vortriebs-Stillliegezeiten und Vortriebsunterbrechungen.³

Regelmaßnahme: Maßnahme, die in den jeweiligen Vortriebsklassen vorgesehen ist.³

Regelquerschnitt: Geplanter Querschnitt eines Hohlraum-Bauwerkes.³

Regelstützmaßnahme: Stützmaßnahme bzw. Stützmittel, die in den jeweiligen Vortriebsklassen vorgesehen sind und mit den auf der TVM vorzusehenden Geräten in den vorgesehenen Arbeitsbereichen A1 bzw. A2 eingebaut werden.³

Schildmaschine (SM): TVM zum mechanischen Abbau von vorwiegend Lockergestein im Schutz eines Schildes, mit oder ohne Ortsbruststützung.³

Schlagwetter: Unter einem Schlagwetter versteht man im Bergbau ein Methan-Luftgemisch, das durch einen Funkenschlag zur Explosion gebracht werden kann.⁷

Stützmaßnahme: Vorkehrung zur Stützung des Gebirges und zur Sicherung des Hohlraumes.³

Stützmittel: Elemente der Stützmaßnahmen wie Anker, Spieße, Stahlbögen, Spritzbeton und Bewehrung, geschlossene Stahlringe, Sohlfertigteile, Liner plates, Tübbinge.³

Stützmittelzahl: Quotient aus der Summe der bewerteten Stützmittel pro Meter Tunnel und dem Ausbruchquerschnitt (Nominaler Bohrdurchmesser, in Bereichen mit Überbohrmaß vergrößert um üB).³

Systemverhalten (SV): Verhalten des Gesamtsystems, resultierend aus Gebirge und gewählten Baumaßnahmen.³⁴

tatsächliche Vortriebsdauer: Für den jeweiligen Abschnitt oder das Gesamtbauwerk benötigte Dauer der Vortriebsarbeiten einschließlich der Vortriebs-Stillliegezeiten und Vortriebsunterbrechungen.³

Tunnelbohrmaschine (TBM): TVM zum mechanischen Abbau von vorwiegend Festgestein im Vollquerschnitt mit oder ohne Schutz eines Schildes.³

⁷Vgl. [6] Chemie-Schule

Tunnelbohrmaschine mit Aufweitungsbohrkopf (TBM-A): Eine Tunnelbohrmaschine mit Aufweitungsbohrkopf entspricht im Wesentlichen einer offenen Tunnelbohrmaschine, welche zum Aufweiten eines zuvor hergestellten Pilotstollens dient. Als Besonderheit verfügt diese Maschine über ein vorlaufendes Grippersystem, mit welchem sie sich an der Wandung des Pilotstollens verspannen kann.⁵

Tunnelbohrmaschine mit Einfachschild (TBM-S): Diese Art der Tunnelbohrmaschine wird hauptsächlich im nachbrüchigen bis gebrächen Festgestein angewendet, weshalb dieser Maschinentyp hinter dem Bohrkopf über einen schützenden Schildmantel verfügt. Für die Gebirgsstützung ist eine Auskleidung mit Tübbingungen notwendig, die im Schutz des Schildes mittels Erektor versetzt werden. Der erforderliche Anpressdruck für den Bohrkopf und den Vorschub der Maschine wird durch Abstützung an den bereits eingebauten Tübbingungen generiert. Genau genommen handelt es sich daher um keinen rein kontinuierlichen, sondern einen zyklischen Vortrieb bei dem die Vortriebsleistung von der Bohrgeschwindigkeit und dem unterbrechenden Tübbingeinbau abhängt. Auf Grund der Abstützung der Maschine müssen die Tübbinge auch in jenen Bereichen eingebaut werden, in welchen sie nicht zur Ausbruchssicherung erforderlich sind.⁵

Tübbing: Unter dem Begriff Tübbing wird ein Betonfertigteil in Form eines Kreissegments verstanden, das dem Ausbruchsquerschnitt oder nur Teilen davon angepasst ist. Durch das Zusammensetzen mehrerer Tübbinge ergibt sich ein tragfähiger Tübbingring, der die Stützung des Hohlraumes übernimmt. Es können allerdings auch nur Teile der Auskleidung aus Tübbingungen bestehen (z.B. Sohlübbing). Im Falle der Verwendung einer Tunnelbohrmaschine mit Einfachschild oder Doppelschild müssen die Tübbinge rechnerisch auf die Einleitung der Vorschubkräfte ausgelegt werden. Sie können im Betonwerk oder in einer Feldfabrik gefertigt werden, weshalb eine hohe Maßgenauigkeit gegeben ist.⁵

Tunnelvortriebsmaschine (TVM): Maschine, mit der ein semi-kontinuierlicher Vortrieb im Allgemeinen durch hubweises Vorschieben erfolgt und bei der das anstehende Material mit einem Bohrkopf oder Schneidrad im Vollschnitt gelöst bzw. teilflächig durch geeignete Lösevorrichtungen abgebaut und zur Schutterung übergeben wird.³

Verfahrenswechsel: Umbau und Umstellung einer Schildmaschine auf ein anderes Vortriebsverfahren (z.B. von Ortsbruststützung mit Flüssigkeitsstützung auf Ortsbruststützung mit Erddruckstützung). Hierfür sind Umbaumaßnahmen erforderlich.³

Vortrieb: Leistungen zur Herstellung eines untertägigen Hohlraumes, im besonderen Lösen, Laden und Verfuhr sowie Stützmitteleinbau. Unter Vortrieb wird auch eine Tunnelstrecke, die zusammenhängend aufgefahren wird, verstanden.³

Vortriebsabschnitt (VA): Unterteilung eines Tunnels in zusammenhängende Abschnitte, für welche die Gebirgseigenschaften hinsichtlich Bohrgeschwindigkeit, Verschleiß u.a. in einer repräsentativen Verteilung angegeben werden können und die daher eine ähnliche Kostenstruktur aufweisen. Vortriebsabschnitte können auch durch andere Randbedingungen (z.B. baubetriebliche oder deutlich unterschiedliches Systemverhalten) bestimmt werden.^{3 4}

vertragliche (abrechenbare) Vortriebsdauer: Vortriebsdauer, errechnet aus der tatsächlichen Verteilung der Vortriebsklassen und der vertraglich vereinbarten Vortriebsgeschwindigkeit, zuzüglich der anerkannten Vortriebs-Stillliegezeiten und Vortriebsunterbrechungen.³

Vortriebsklasse: Einteilung der Vortriebsarbeiten nach den bautechnischen Maßnahmen, welche der Verrechnung des Ausbruches und der Ermittlung der Vortriebsdauer dienen.³

Vortriebsmannschaft: Baustellenpersonal, welches mit Vortriebsarbeiten beschäftigt und schwerpunktmäßig unter Tage eingesetzt ist.³

Vortriebs-Stilliegezeit: Zeit, in welcher im jeweiligen Vortrieb keine Arbeiten durchgeführt werden. Ausgenommen davon sind Beleuchtung, Bewetterung und Wasserhaltung.³

Vortriebssystem: Kombination von Tunnelvortriebsmaschine und Nachläufereinrichtung, ausgelegt für ein bestimmtes Vortriebsverfahren und Auskleidungssystem.³

Vortriebsunterbrechung: Zeit, in welcher im Vortrieb Arbeiten durchgeführt werden, die jedoch nicht nach vereinbarten Vortriebsklassen abgerechnet werden können.³

Zusatzmaßnahme: Über eine Regelmaßnahme hinausgehende Maßnahme, für deren Ausführung keine zusätzlichen Geräte oder Einrichtungen erforderlich sind.³

Zyklischer Sprengvortrieb: Bei dieser Vortriebsart werden die Arbeitsschritte des Sprengens, Bewetterns, Sicherns und Schutterns in zyklischen Abständen wiederholt und so ein Hohlraumquerschnitt im Untergrund hergestellt.

Kapitel 2

Grundlagenermittlung maschineller Tunnelbau

In Kapitel 2 wird auf die einzelnen Arbeitsweisen zur Herstellung eines Tunnelbauwerks eingegangen. In den folgenden Ausführungen kann aufgrund des enormen Umfangs des Themas kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden, jedoch bemüht sich der Verfasser redlich, eine möglichst weitreichende Grundlagenermittlung darzulegen. Der Tunnelbau ist eine der interessantesten, faszinierendsten, aber auch schwierigsten Disziplinen des Bauingenieurwesens. Dieser Umstand resultiert aus der Gegebenheit, da immer eine direkte Beziehung zwischen Gebirge, Bauwerk und Vortrieb besteht.⁸

Durch die Heterogenität der meisten Gebirgsformationen kommt es oft zu einer starken Streuung der geologischen bzw. der gebirgsmechanischen Parameter. Daher müssen die agierenden Personen nicht nur einen großen Schatz an Erfahrung aufweisen, sondern auch individuell auf das anstehende Gebirge und auf die ihnen durch die Vortriebsart gegebenen Möglichkeiten eingehen. Diese individuelle Behandlung von Abschnitten äußert sich unter anderem beim Einbau von Stützmitteln, deren Anzahl innerhalb verschiedener Vortriebsabschnitte stark variieren kann.

Im Tunnelbau können die Vortriebsarbeiten mithilfe einer Vielzahl von unterschiedlichen Maschinen und Arbeitsweisen durchgeführt werden. Man kann grundsätzlich zwischen dem zyklischen Vortrieb und dem kontinuierlichen (=maschinellen) Vortrieb unterscheiden. Um dem Leser dieser Arbeit einen ersten Anhaltspunkt für die Einsatzgebiete des kontinuierlichen Vortriebs zu geben, werden im Anschluss einige Vor- und Nachteile des kontinuierlichen Vortriebs gegenüber dem zyklischen Vortrieb laut *Girmscheid*⁹ dargelegt.

Vorteile kontinuierlicher Vortrieb:

1. Hohe Vortriebsgeschwindigkeiten werden durch hochmechanisierte und automatisierte Bauverfahrenstechniken erreicht. Dadurch können kürzere Bauzeiten erzielt werden.
2. Aus dem kontinuierlichen Vortrieb resultiert im Vergleich zum zyklischen Sprengvortrieb eine verhältnismäßig geringe Erschütterung. Damit wird die Gefahr von Setzungen und Rissen der im Baugebiet befindlichen Bauwerke minimiert.
3. Geringe Beeinflussung des Grundwassers bei entsprechenden Voruntersuchungen.
4. Sehr hohe Ausbruchsgenauigkeit des Profilquerschnitts.
5. Durch den hohen Grad der Mechanisierung des Vortriebs können gleichzeitig der Tunnel und die Innenhülle hergestellt werden.
6. Geringere Auflockerungen und Destabilisierungen des Gebirges durch Erschütterungen bei Tunnelvortriebsarbeiten.

⁸Vgl. [10] Girmscheid, S. 1

⁹Vgl. [10] Girmscheid, S. 384 ff.

Nachteile kontinuierlicher Vortrieb:

1. Sorgfältige Vorerkundungen des Baugrunds bzw. des anstehenden Gebirges sind notwendig.
2. Umfangreiche Planung des Maschinenkonzepts und Abstimmung auf den anstehenden Untergrund.
3. Meist hoher Investitionsaufwand für das speziell anzufertigende Maschinenkonzept
4. Große Erfahrung des Maschinenpersonals ist aus wirtschaftlicher Sicht projektentscheidend.
5. Meist schwierige Arbeitsweise bei wechselnden Gebirgsverhältnissen und damit in Verbindung stehende Störungen und Vortriebsunterbrechungen.

Die Wahl des jeweiligen Vortriebskonzepts bzw. der Vortriebsmaschine für die Herstellung von Tunnelbauwerken hängt somit stark vom anstehenden Gebirge und den örtlichen geologischen und petrographischen Gegebenheiten des Projektgebiets ab. Die Auswahl der Vortriebsart muss demnach von Projekt zu Projekt anhand individuell festgelegter Parameter erfolgen.

Überblick über Maschinenauswahl

In Abb. 2.1 wird ein Überblick über die einzelnen Einsatzgebiete der unterschiedlichen Maschinentypen gegeben. Die „Haupteinsatzgebiete“ sind in der folgenden Abbildung schwarz und die „möglichen Einsatzgebiete“ grau hinterlegt. Des Weiteren besteht in horizontaler Richtung die Auswahl zwischen den folgenden Gesteinsarten:

- Festgestein - standfest
- Festgestein - nachbrüchig
- Lockergestein - bindig, standfest
- Lockergestein - bindig, nicht standfest
- Lockergestein - Wechsellagerung
- Lockergestein - nicht bindig

In vertikaler Richtung stehen folgende geotechnische Kennwerte, die aus geotechnischen Untersuchungen entnommen werden können, zur Ermittlung des optimalen Maschinentyps zur Verfügung.

- Gesteinsfestigkeit
- Zugfestigkeit
- RQD-Wert (Rock Quality Designation Index)
- Kluftabstand
- Kohäsion
- Kornverteilung

Wie in der Einleitung dieses Kapitels beschrieben, gibt es eine Fülle an verschiedenen Möglichkeiten, ein Tunnelbauwerk herzustellen. In weiterer Folge befasst sich diese Diplomarbeit ausschließlich mit dem kontinuierlichen Vortrieb und dessen Betriebsweisen, da dies sonst den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

| Geo-technische Kennwerte Geotechnical Parameters | Baugrund Subsoil | Fels/Festgestein/Hard rock/soil | | Boden/Lockergestein/Soft rock/soil | | | |
|---|--------------------------|---|---|--|--|--|--|
| | | standfest bis nachbrüchig competent to caving in | nachbrüchig bis gebräuch caving in to unstable | bindig standfest cohesive stable | bindig nicht standfest cohesive not stable | Wechselagerung mixed conditions | nicht bindig non-cohesive |
| 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 [ϕ] | | | 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. 2.1: Auswahlmatrix für Einsatzbereiche der Tunnelvortriebsmaschinen in Abhängigkeit der Geologie nach DAUB (Quelle: DAUB [2, S. 33])

2.1 Tunnelvortriebsmaschinen für den kontinuierlichen Vortrieb

Tunnelvortriebsmaschinen sind in der heutigen Zeit wichtiger denn je für den Einsatz bei der Errichtung von Infrastrukturprojekten. So werden sie zum Beispiel sowohl bei der Errichtung von überregionalen Bahnverbindungen als auch für den Bau innerstädtischer U-Bahntrassen verwendet. Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet ist die Errichtung von Tunnelbauwerken in Gebieten, in denen aus landschaftsgestalterischen Umständen keine Ingenieurbauwerke, wie zum Beispiel eine Brücke, erwünscht sind.

Sowohl bei Goger¹⁰, als auch bei Girmscheid¹¹ wird mehrmals auf die Wichtigkeit der Interaktion bzw. Wechselbeziehung zwischen Bauvorgang und anstehendem Gebirge hingewiesen. Goger¹⁰ geht noch etwas weiter und beschreibt das Zusammenspiel als Wechselbeziehung zwischen Bergart, Bauvorgang und statischem Verhalten der Konstruktion. Durch eine konsequente und

¹⁰Vgl. [12] Goger, S. 1 ff.

¹¹Vgl. [10] Girmscheid, S. 384 ff.

gründliche Vorerkundung des Untergrunds während der Entwurfsphase können Störfälle und Wartungs- bzw. Reparaturmaßnahmen an den Geräten, welche meist auch sehr personalintensiv sind, vermieden werden. Daher ist es aus Sicht des Verfassers von enormer Bedeutung, das angedachte Maschinenkonzept vor der Ausführung genau an die geologischen Gegebenheiten anzupassen und zusätzliche Adaptierungsmöglichkeiten des Maschinenkonzepts für eventuelle Änderungen des geologischen Gefüges in der Maschinenplanung zu berücksichtigen. Dies steht jedoch mit dem wirtschaftlichen Gedanken in Konflikt, denn eine Tunnelvortriebsmaschine kann laut *Girmscheid*¹¹ in den wenigsten Fällen bei einem Tunnelprojekt abgeschrieben werden. Dieser Umstand impliziert, dass das Maschinenkonzept auf eine größere Bandbreite der geologischen Spezifika ausgelegt werden sollte. Diese aus Wirtschaftlichkeitsgründen bedingte Auslegung der Tunnelvortriebsmaschinen ermöglicht eine höhere Flexibilität der Maschinen im Projekt. Dadurch ist es möglich, sich auf sich ändernde Gebirgsbedingungen bzw. Folgeprojekte mit anderer Geologie leichter einzustellen. Des Weiteren erhöht sich der Wiederverkaufswert einer universell einsetzbaren Maschine deutlich.

Aus den zuvorgehenden Ausführungen ist ersichtlich, dass die Gebirgseigenschaften und somit das übliche Umfeld einer TVM keine konstante Größe beim Bau eines Tunnelbauwerkes darstellt, sondern im Lauf der Baudurchführung sehr volatil ist.

*Girmscheid*¹¹ erläutert, dass Tunnelbauwerke maschinell nur ab einer gewissen Länge wirtschaftlich realisierbar sind. Seiner Einschätzung zufolge liegt diese Grenze bei zirka 2.000 Metern. Tunnelbauwerke, die unter dieser Längserstreckung geplant werden, sind aus wirtschaftlicher Sicht mittels zyklischer Vortriebsart aufzufahren. Der Einsatz einer TVM benötigt optimale Einsatzbedingungen, damit dieser aus wirtschaftlicher Sicht positiv durchgeführt werden kann.

Wegen der vielen unterschiedlichen Zustandssituationen des Untergrunds gibt es auch eine große Fülle an Maschinen, die auf die einzelnen Untergrundgegebenheiten abgestimmt sind. In der folgenden Abb. 2.3 ist eine Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen ersichtlich, welche sich in vier Hauptsegmente aufgliedert. Tunnelvortriebsmaschinen weisen bei der Herstellung von Tunnelbauwerken eine sehr hohe Profilgenauigkeit auf, dadurch fällt nur eine geringe Menge an Mehrausbruch im Vergleich zum zyklischen Tunnelbau an. Um diese hohe Genauigkeit erreichen zu können, muss jedoch auf der anderen Seite den planmäßigen Abweichungen der Maschine aus der Tunnelspur besondere Beachtung geschenkt werden. Dies ist speziell bei der Festlegung des Schneidraddurchmessers der Maschine durchzuführen, da später Korrekturen nur mit erheblichem Aufwand und damit verbunden monetärem Mitteleinsatz zu bewältigen sind.

Tunnelvortriebsmaschinen sind in ihren Eigenschaften dadurch charakterisiert, dass sie den Tunnelquerschnitt durch den Abbau des anstehenden Gesteins mit einem Schneirad, einem Bohrkopf, einer Teilschnitteinrichtung oder einer anderen geeigneten Lösevorrichtung abbauen. Im Zuge des Vortriebs werden die Maschinen entweder kontinuierlich oder schubweise in Tunnel-längsachse weiter verschoben. Aus funktionstechnischer Sicht werden Vollschnitteinrichtungen kreisförmig ausgebildet. Damit ist der Tunnelquerschnitt formgebunden. Diese Entwicklung hat sich laut *Girmscheid*⁴² durch die Entstehungsgeschichte ergeben.

In den weiteren Unterkapiteln dieser Arbeit werden die wesentlichen Merkmale der in Abschnitt 6 dieser Arbeit verwendeten Maschinenkonzepte vorgestellt. Die folgenden Seiten sollen dem Leser die Möglichkeit geben, die Funktionsweisen und Einsatzgebiete der vorgestellten Maschinenkonzepte besser verstehen zu können. Der wesentlichste Unterschied zwischen einer TBM und einer SM ist, dass eine SM die Ortsbrust sowie den Tunnelquerschnitt beim Vortrieb stützt. Dieser Umstand führt unter anderem auch zu den sich unterschiedlich ergebenden geologischen Einsatzgebieten der Maschinenkonzepte. Um den Lesern dieser Arbeit einen ersten Eindruck der Größenverhältnisse zu geben, wird in der folgenden Abb. 2.2 ein Überblick über die gängigen Bohrdurchmesser der verschiedenen Tunnelvortriebsmaschinen gegeben.

| TVM-Typ | Bohrdurchmesser [m] |
|---|---------------------|
| TBM-O (Gripper-TBM) | 2,0 - 12,5 m |
| TBM-S (Einfachschild) | 1,5 - 14,0 m |
| DSM (Doppelschildmaschine) | 2,8 - 12,5 m |
| Schildmaschine mit Erddruckstützung | 1,7 - 16,0 m |
| Schildmaschine mit Flüssigkeitsstützung | 4,8 - 19,0 m |

Abb. 2.2: Einsatzbereiche von Tunnelvortriebsmaschinen bezüglich der Durchmesser (Quelle: Skriptum Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau [11, S. 67])

2.2 Tunnelbohrmaschine

Die Tunnelbohrmaschinen können in ihrer Einteilung wie in Abb. 2.3 ersichtlich grundsätzlich in Maschinenkonzepte unterteilt werden, nämlich in die TBM-O, die Erweiterungstunnelbohrmaschine (ETBM) und die TBM-S. Des Weiteren gibt es noch die DSM, welche eine Kombination aus TBM-O und TBM-S darstellt. Eine eingehende Erklärung der Unterschiede wird in den Folgekapiteln abgegeben. Eine Tunnelbohrmaschine löst das anstehende Gebirge grundsätzlich durch eine Anpresskraft in Tunnellängsachse sowie eine Rotationsbewegung um die Tunnellängsachse. Die einwirkende Kraft in Tunnellängsachse erzeugt eine Kerbwirkung im Gebirge. Die longitudinale Kraft wird mittels hydraulischer Pressen generiert. Genauer gesagt werden diese durch die Anpresskraft, die auf die Diskenmeißel einwirkt, in den Untergrund eingedrückt. Durch die horizontal wirkende Anpresskraft sowie mittels der Rotationsbewegung ist es möglich, einzelne Teile des Gebirges, sogenannte Chips, zu lösen. Der Leser kann sich den Bewegungsvorgang der TVM zum Lösen des Gesteins in ähnlicher Weise wie den Einschraubvorgang eines Korkeziehers beim Öffnen einer Weinflasche vorstellen.

Nach dem Lösen des Materials werden die Chips bzw. das Bohrklein durch die Räumschlitzte von der Ortsbrust über in die Maschine integrierte Förderbänder in Richtung Tunnelausgang befördert. Dort wird das Material entweder mittels weiterer Förderbänder, radgebundener Transportmittel oder über Züge zu seiner Zwischen- oder Endlagerstelle gebracht.

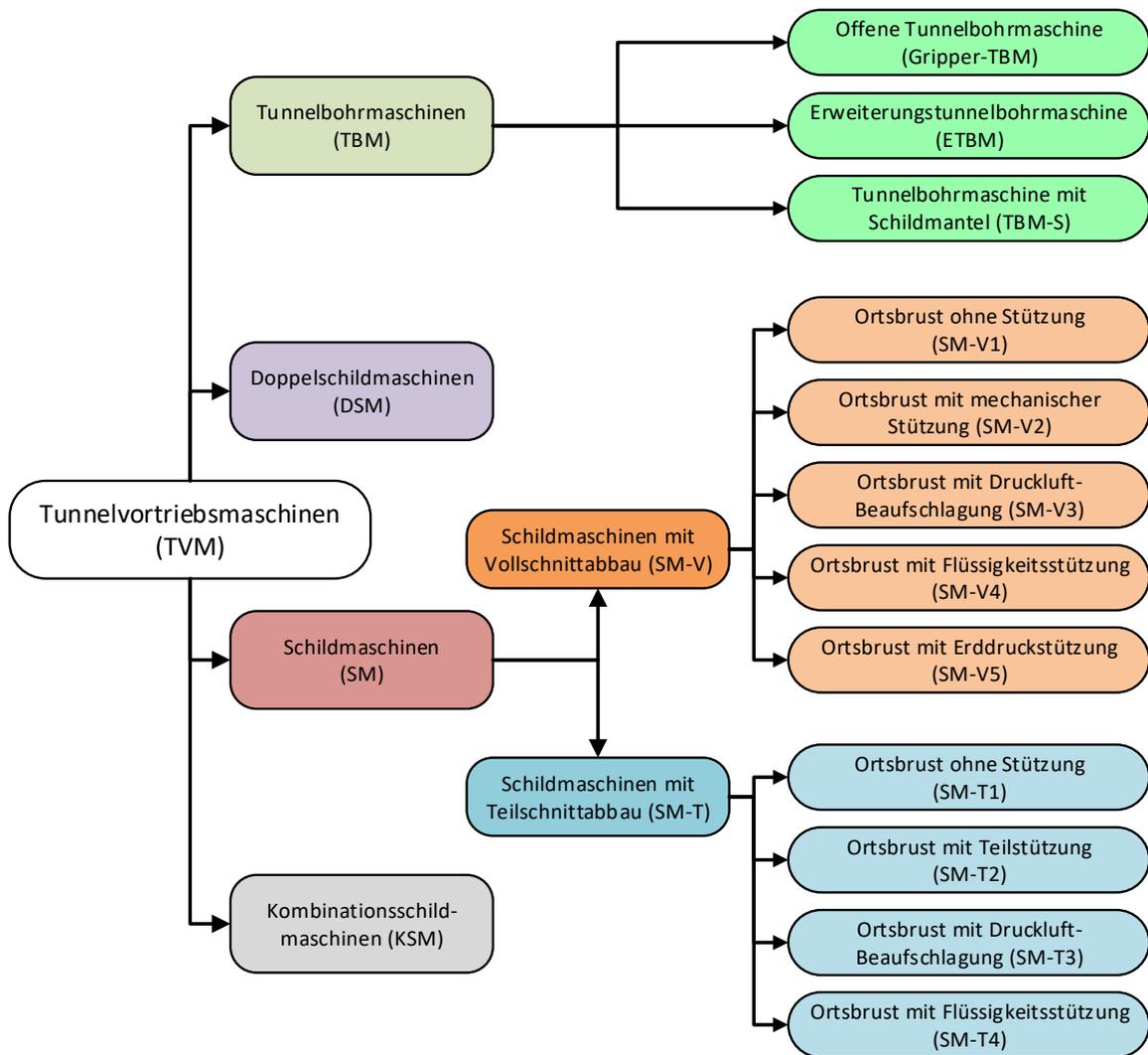


Abb. 2.3: Darstellung der verschiedenen Tunnelvortriebsmaschinen (Quelle: Adaptiert nach DAUB [8, S. 11])

2.2.1 Offene TBM – Gripper TBM

Die Tunnelbohrmaschine ohne Schild ist dadurch charakterisiert, dass sie nur im Festgestein mit mittlerer bzw. hoher Standzeit eingesetzt wird. Das bedeutet, dass ihr gewöhnliches Arbeitsumfeld sehr homogene Gebirgsformationen sind. Diese Maschinenkonzepte besitzen keinen vollständigen Schildmantel.

Für weniger standfestes Gebirge gibt es die Möglichkeit, hinter dem Bohrkopf Einrichtungen zur Aufnahme von Felsicherungsgeräten anzuordnen. Im angedachten Arbeitsablauf dieser Maschinenart ist es aufgrund des standhaften Gebirges nicht vorgesehen, dass es zu arbeitsintensiven Sicherungsmaßnahmen kommt. Sind diese unvorhergesehenenerweise notwendig, so kann dies den wirtschaftlichen Einsatz dieser Maschinenart stark beeinflussen und begrenzen. Um den für den Abbau des Gebirges erforderlichen Anpressdruck zu erreichen, ist es notwendig, dass sich die Maschine in radialer Richtung gegen die Tunnelwandung verspannt. Dies erfolgt mit den sogenannten Grippern. Das sind hydraulisch angetriebene Platten, welche über Zylinder gegen die Ausbruchslaubung verspannt werden.

Die Abbauwerkzeuge werden laut *Herrenknecht*¹² mit einem Druck von bis zu 32 Tonnen pro Disk in den Untergrund eingedrückt. Der Ausbau des Tunnelbauwerkes erfolgt in einem Abstand von zehn bis fünfzehn Metern hinter der Ortsbrust mittels Felsanker, Stahlbögen, Bewehrungsmatten und Spritzbeton.

Der Einbau einer Spritzbetonsicherung sollte laut *DAUB*¹³ erst hinter der Antriebs- und Steuereinrichtung erfolgen, um die Verschmutzung des vordersten Maschinenbereichs möglichst gering zu halten. Um eventuelle Störungszonen mit geringeren Standfestigkeiten bewältigen zu können, müssen bei der Planung des Maschinenkonzepts Einrichtungen zur Vorauserkundung und eventuell auch Maßnahmen zur vorauseilenden Gebirgsverfestigung eingeplant werden.

*Herrenknecht*¹² erläutert, dass sich die TBM-O nach dem Verspannen der Grippereinheit über Vortriebszylinder nach vorne schiebt und den rotierenden Bohrkopf gegen die Ortsbrust drückt. Beim Abbau des Gebirges werden mehrere ausfahrbare Teilschilde zur Stabilisierung der Maschine gegen Vibrationen eingesetzt. Durch die Stabilisierungsmaßnahmen ist es möglich, den Verschleiß der Disken zu verringern.

Nach dem Abbohren des Bohrhubes wird der Vortrieb unterbrochen und die Verspanneinheit nach vorne umgesetzt. Dieser Arbeitsablauf ist in Abb. 2.4 ersichtlich. Dieses Maschinenkonzept wird mit Durchmessern zwischen zwei und zwölfm Metern hergestellt.

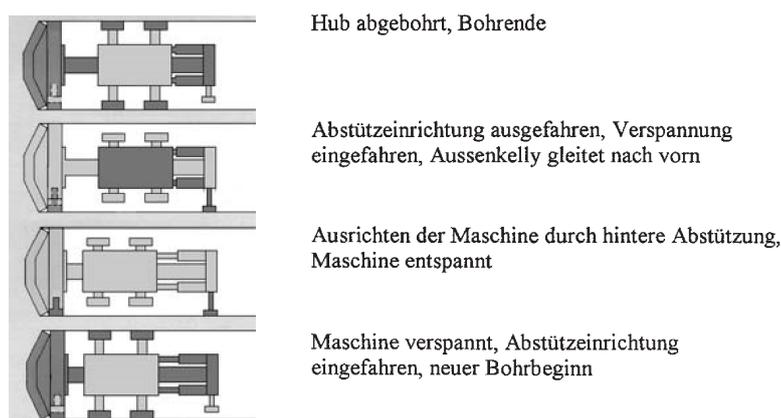


Abb. 2.4: Arbeitsablauf einer offenen TBM (Quelle: Girmscheid [10, S. 67])

Eine TBM-O arbeitet im zyklischen Wechsel von Bohren, Sichern und Umsetzen. Die Versorgung der Maschine bedingt sehr lange Nachläufereinrichtungen, auf denen die notwendige Ausrüstung positioniert werden kann. Mit den hinteren Zylindern der Abstützung, welche in Abb. 2.4 ersichtlich sind, kann die Maschine entsprechend der erforderlichen Bohrrichtung ausgerichtet werden. Nachdem die Abstützeinrichtung eingefahren wurde, kann ein neuer Bohrvorgang durchgeführt werden. In Abb. 2.5 ist eine TBM-O dargestellt, in der auch die wichtigsten Bestandteile der Maschine zu sehen und numerisch markiert sind.

¹²Vgl. [14] Herrenknecht AG

¹³Vgl. [8] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V., S. 1 ff.

Ein weiterer Vorteil dieser Tunnelvortriebsmethode ist, dass die Verspannung nicht im Endprofil stattfindet. Damit ist diese Methode gebirgsschonender als andere bereits genannte Vortriebsmethoden. In Abb. 2.6 ist eine ETBM ersichtlich, dabei kann man den vorderen Bereich, welcher sich im Pilotstollen verspannt, deutlich erkennen. Der hintere Bereich dient, wie bereits beschrieben, zur Aufweitung des Tunnels. Im Verhältnis zu anderen Maschinenarten wird die ETBM nur sehr selten eingesetzt und kommt auch in den untersuchten Projekten, welche in Kapitel 5 beschrieben und in Kapitel 6.2 untersucht wurden, nicht zum Einsatz.



Abb. 2.6: Darstellung einer Erweiterungstunnelbohrmaschine (Quelle: Skriptum Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau [11, S. 130])

2.2.3 Tunnelbohrmaschine mit Schild

Tunnelbohrmaschinen mit Einzelschild (TBM-S) werden in Gebirgen mit geringer Standzeit oder im nachbrüchigen, nicht standhaften Fels eingesetzt. In diesen geologisch volatilen Zonen ist mit dem vermehrten Einsatz von Stützmaßnahmen direkt hinter dem Schneidrad zu rechnen. Beim Einsatz von TBM-S sollten keine stark wasserführenden Schichten durchörtert werden müssen, da dies zu erheblichen Problemen im Vortrieb führen kann.

Geringfügig bzw. teilweise wasserführenden Schichten können mit Hilfe einer vorausgehenden Baugrundverbesserung bewältigt werden. Dazu werden Injektionsbohrungen in den Untergrund eingebracht. Diese werden sowohl im Bereich der Ortsbrust als auch im Bereich des Schildes angeordnet. Eine schematische Darstellung dieser vorausgehenden Sicherung ist in Abb. 2.7 ersichtlich.

Dieses Maschinenkonzept wird auch Einzelschildmaschine genannt. Bei diesem Maschinenkonzept schützt ein Schildmantel einen sehr wichtigen Teil der TVM. Der Bohrdurchmesser ist bei TBM-S größer als der Schildmantel. Der Abbau des anstehenden Gebirges erfolgt in ähnlicher Weise wie bei der TBM-O.

Der große Vorteil, der sich bei TBM-S ergibt, ist, dass der Ausbau im Schutz des Schildes durchgeführt werden kann. Die dauerhafte Sicherung bzw. der Ausbau des Tunnelbauwerkes wird mittels Tübbing durchgeföhrt. Diese Betonelemente werden mittels Erektor an ihren

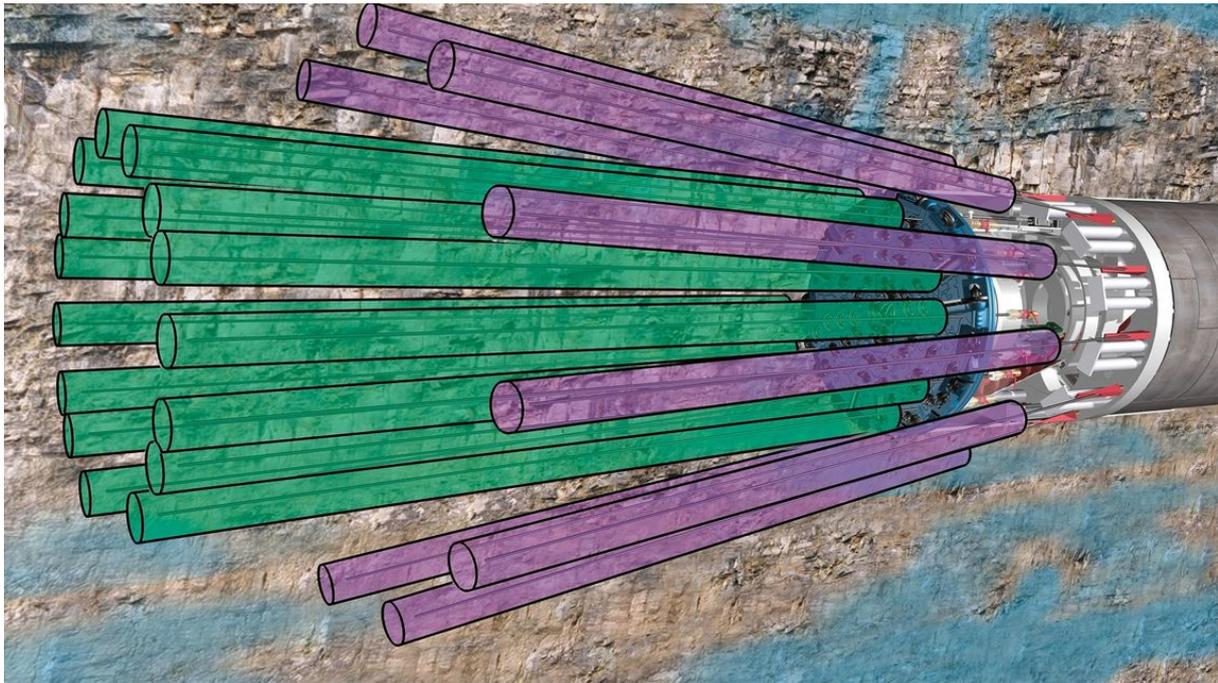


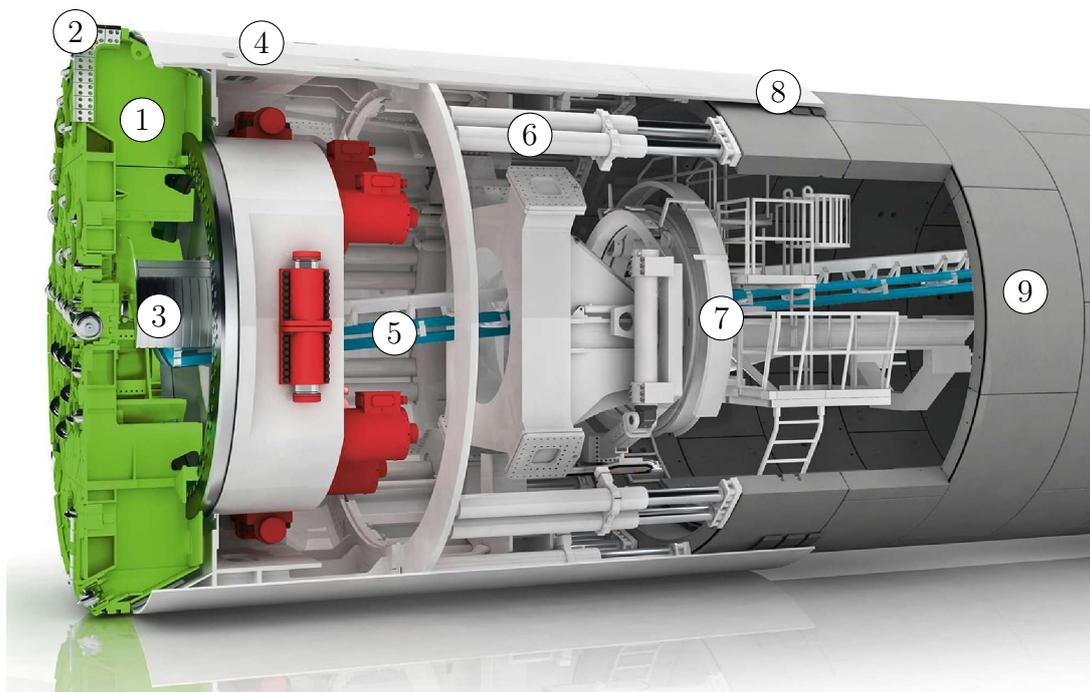
Abb. 2.7: Darstellung einer vorausseilende Sicherung bei einer TBM-S (Quelle: Herrenknecht AG [14, S. 67])

Bestimmungsort eingehoben und verbaut. Bei dieser Art der Tunnelauskleidung ist es von enormer Wichtigkeit, eine ausreichende Menge an Tübbingröhren vorrätig zu halten und die Logistikkette dementsprechend aufeinander abzustimmen. Andernfalls könnten Engpässe bei Materialien durch zu geringe Produktionszahlen bzw. eine fehlerhafte Logistikkette zu einer Verringerung der Vortriebsgeschwindigkeit bzw. zum generellen Stillstand des Vortriebs führen. Diese Art der Tunnelauskleidung beeinflusst nicht nur die Sicherheit gegen Nachbrüche des Gebirges, sondern es verringert auch den psychischen Druck der Vortriebsmannschaft und ist damit ein nicht zu vernachlässigender Faktor für die Arbeitsmotivation.

Der Nachteil der Tübbingauskleidung ist, dass man auch an jenen Stellen Tübbingringe versetzen muss, an denen es aus Sicherheitsgründen gar nicht erforderlich ist. Die Vorschubkraft wird bei diesem Maschinenkonzept ebenfalls über hydraulische Zylinder erzeugt.

Der Unterschied zur TBM-O ist, dass sich die Vorschubpressen entlang der Stirnseite an der Tunnelauskleidung abstützen. Die Abstützung in axialer Richtung bedingt, dass die Tübbinge auch diese Vorschubkraft aufnehmen und in die anschließenden Konstruktionsteile ableiten können. Diese Art der Abstützung der Vorschubeinrichtung ist in Abb. 2.8 zu sehen.

Laut *Girmscheid*⁴² kann es durch die industrialisierte Fertigung von Tübbingröhren und ihren Einsatz als Tunnelauskleidung durch die konstant hohen Verlegeleistungen mittels Erektor zu einer Verkürzung der Bauzeit kommen. Der Bereich zwischen der Tübbingaußenseite und der Ausbruchsoberfläche wird Ringspalt genannt. Dieser Bereich sollte durch das Einblasen von Sand oder anderen geeigneten Materialien verfüllt werden, damit ein vollflächiger Kontakt zwischen den Tübbingröhren und der Ausbruchsoberfläche gewährleistet werden kann. Dieses Maschinenkonzept wird meist mit Durchmessern zwischen eineinhalb und vierzehn Metern hergestellt. Die Vortriebsleistung hängt bei diesem Maschinentyp als auch bei einer TBM-O wesentlich vom Zeitbedarf für den Einbau der Stützmittel ab.



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

Abb. 2.8: Darstellung einer Tunnelbohrmaschine mit Einzelschild (TBM-S) (Quelle: Adaptiert nach Herrenknecht AG [14])

Der Materialtransport erfolgt in ähnlicher Weise wie bei der TBM-O. In der folgenden Abb. 2.9 ist der Materialtransport über den Räumer, die Kanäle sowie den Muckring zu den nachgeschalteten Förderbändern im Bereich des Bohrkopfes ersichtlich. Der Muckring ist dabei trichterförmig ausgebildet, was den Materialfluss zusätzlich begünstigt.

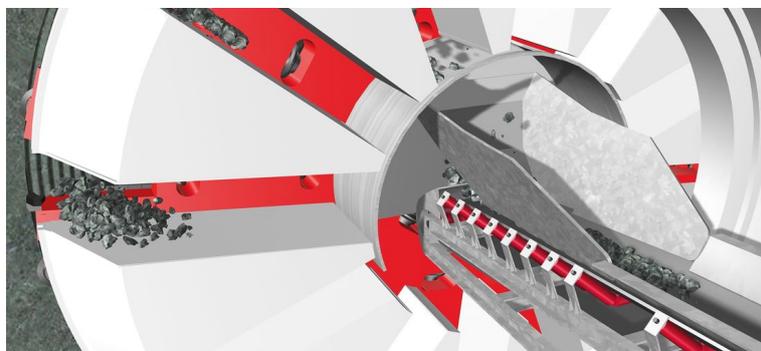


Abb. 2.9: Ansicht eines Muckrings (Quelle: Herrenknecht AG [14])

2.2.4 Doppelschildmaschinen

Doppelschildmaschinen (DSM) oder auch Teleskopschild-TBM werden bei Tunnelbauprojekten mit abschnittsweise sehr stark wechselnden Untergrundbedingungen eingesetzt. Sie können einerseits im standfesten Gebirge, andererseits auch in Bereichen mit massiven Störungszone eingesetzt werden. Dieses große Einsatzgebiet wird durch ein spezielles Maschinenkonzept erreicht. Die Maschine ist grundsätzlich in zwei Teile geteilt. Im vorderen Maschinenteil ist der Bohrkopf für den Gebirgsabbau, das Frontschild und die Hauptvortriebspresen für den Vorschub situiert. Im hinteren Maschinenteil sind die Hilfsvortriebspresen und die Grippereinheit situiert.

Zwischen vorderem und hinterem Bereich ist ein hydraulisch teleskopierbarer Bereich angeordnet, welcher um eine komplette Tübbingringlänge teleskopiert werden kann. In Abb. 2.10 ist eine Teleskopfuge in zusammengeschobenem Zustand ersichtlich. Man kann dabei die klare Trennung von Frontschild und Gripperschild erkennen, welche nur über die Verschiebezylinder des Teleskopschildes miteinander verbunden sind.

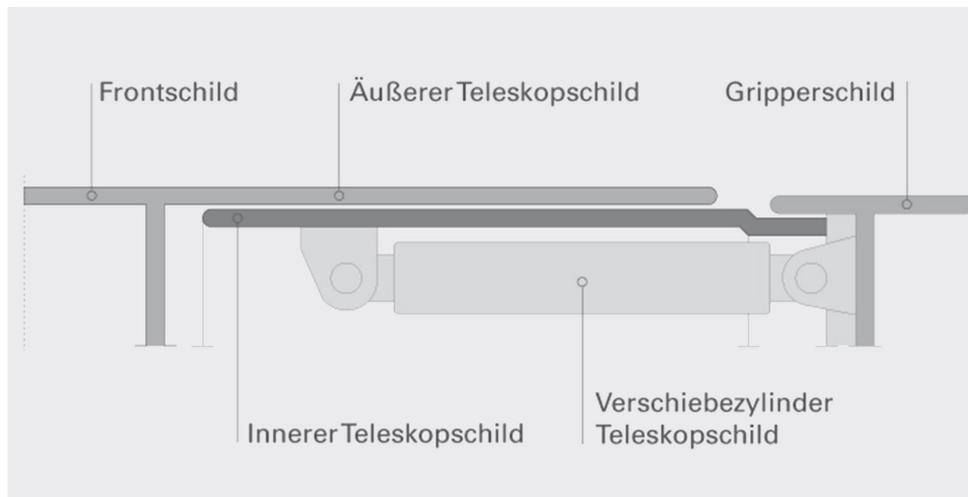
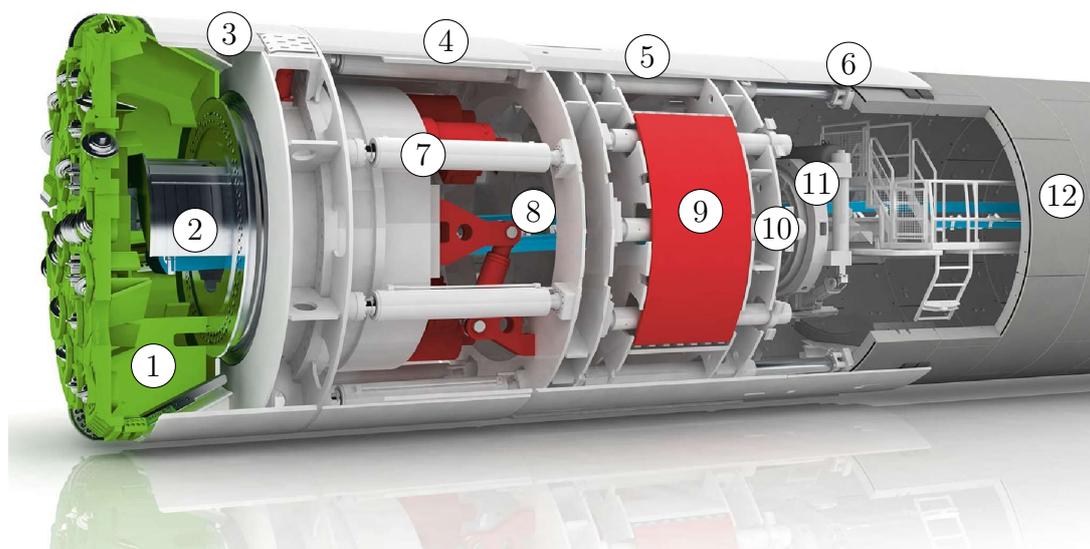


Abb. 2.10: Darstellung Teleskopfuge einer DSM (Quelle: Herrenknecht AG [15])

Dieses Maschinenkonzept vereint die Arbeitsweisen von TBM-O und TBM-S. Im standfesten Gestein kann die DSM wie eine TBM-O agieren. Dabei verspannt sich die Maschine mittels der Grippereinheit an der Ausbruchsoberfläche und das Vortriebsdrehmoment und die Vorschubkräfte werden über die Grippereinrichtung abgetragen. Bei einer nachbrüchigen Projektgeologie kann sich die Maschine auf die notwendige Tunnelauskleidung abstützen und somit ihre Vorschubkraft erzeugen und in den Untergrund ableiten. Dadurch ist es möglich, diese Maschine bei unterschiedlichen Geologien, die bei unterschiedlichen Projekten auftreten, einzusetzen. Dies beeinflusst die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dieses Maschinentyps positiv.

Laut DAUB¹⁵ kann durch die Fixierung des hinteren Maschinenteils die Montage der Tübbingringe im Schildschwanzbereich während des Bohrhubvorganges erfolgen. In dieser Arbeitskonfiguration dienen die Hilfsvortriebszylinder lediglich zur Lagesicherung der versetzten Betonsegmente. In Abb. 2.11 ist der Aufbau einer DSM mit den wichtigsten Bestandteilen ersichtlich.

¹⁵Vgl. [8] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V., S. 7 ff.



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

Abb. 2.11: Darstellung einer Doppelschildmaschine (DSM) (Quelle: Herrenknecht AG [15])

Bei *Herrenknecht*¹⁶ wird unter anderem erklärt, dass die Gripperschuhe nach dem Abschluss eines Vorschubtaktes gelöst werden und das Gripperschild dem Frontschild über die Hilfsvortriebszylinder nachgeschoben wird. Diese Umsetzphase ist von begrenzter Dauer, sprich sie passiert in wenigen Minuten. Daher kann man in diesem Zusammenhang auch von einem nahezu kontinuierlichen Vortrieb sprechen. In einer ausreichend standfesten Gebirgsformation kann sogar auf den Tübbingeinbau verzichtet werden.

Im nicht standfesten Gebirge bzw. in Störungszonen kann die DSM wie eine TBM-S agieren. Dabei wird der teleskopierbare Bereich zusammengefahren. Damit liegt der gesamte zuvor erwähnte vordere und hintere Maschinenbereich im Schutz des Schildes. Dadurch wird ein Einklemmen der Maschine bei der Teleskopfuge verhindert und eine mögliche Vortriebsunterbrechung unterbunden.

Wenn die Verspannung der TBM gegen die Ausbruchslaibung nicht möglich ist, kann sich dieses Maschinenkonzept mittels der Hilfsvortriebspressen auf den zuletzt versetzten Tübbingring abstützen. Somit kann die notwendige Vorschubkraft je nachdem, welche Gebirgsart angetroffen wird, auf zwei unterschiedliche Weisen bzw. Richtungen abgeleitet werden, einmal über die radiale Richtung der Grippereinheit und einmal über die axiale Abstützung über den zuletzt gebauten Tübbingring.

*Hofer*¹⁷ beschreibt, dass der Abtransport des abgebauten Materials ähnlich wie bei den Maschinenkonzepten in Kapitel 2.2.1 und Kapitel 2.2.3 erfolgt. Die gelösten Chips werden durch die Rotation des Bohrkopfes und die Schwerkraft über im Bohrkopf integrierte Kanäle zum

¹⁶Vgl. [15] Herrenknecht AG

¹⁷Vgl. [16] Hofer, S. 7 ff.

Zentrum der Maschine transportiert. In weiterer Folge wird das Bohrklein über trichterförmige Muckringe auf das nachstehende Förderband weitergeleitet. Danach wird es mit rad- bzw. gleisgebundenen Schuttereinrichtungen aus dem Tunnel gefördert.

Kapitel 3

Störungen und Vortriebsunterbrechungen im Tunnelbau – Grundlegendes, Definitionen, Ursachen, Auswirkungen und Maßnahmen

Störungen können eine Vielzahl von Ursachen haben. Dabei kann eine oder das Zusammenwirken von mehreren Ursachen zu einer Beeinträchtigung des Arbeitsfortschrittes führen. Im schlimmsten Fall wird durch eine Störung in weiterer Folge eine Vortriebsunterbrechung verursacht. Die verschiedenen Definitionen der Störungen, Ursachen für Störungen und im Speziellen ihre Auswirkungen sollen auf den nächsten Seiten näher behandelt werden.

3.1 Definitionen

Im folgenden Abschnitt der Arbeit werden die Definition der Störung der Leistungserbringung, die Definition des Regelvortriebs bzw. des Normalvortriebs, die Definition des erschwerten Vortriebs sowie die Definition der Vortriebsunterbrechung angeführt.

3.1.1 Leistungsstörung

*Stempkowski*¹⁸ beschreibt, dass es kaum Bauvorhaben gibt, bei denen es keine Leistungsstörungen gibt. Wenn sich Umstände bezüglich der Leistungserbringung ändern, bzw. andere Rahmenbedingungen vorliegen oder es zu Änderungen in der terminlichen Abwicklung kommt, kann dies zu einer Störung der Leistungserbringung führen. Die **ÖNORM B 2110**¹⁹ liefert folgende **Definition**:

Leistungsabweichung, deren Ursache nicht aus der Sphäre des Auftragnehmers (AN) stammt und die keine Leistungsänderung ist.

Beispiele sind vom Leistungsumfang abweichende Baugrundverhältnisse sowie Vorleistungen oder Ereignisse wie Behinderungen, die der Sphäre des Auftraggebers (AG) zugeordnet werden.

*Zöhner*²⁰ gibt in seiner Diplomarbeit (DA) folgende Definitionen über den Regelvortrieb, den erschwerten Vortrieb, sowie die Vortriebsunterbrechung an.

3.1.2 Regelvortrieb

Regelvortrieb: Dies entspricht jenem Vortrieb, bei dem die vertragsmäßig festgelegten Vortriebsleistungen erreicht werden oder auftretende, nicht prognostizierte Verzögerungen der Sphäre des Auftragnehmers zuzuordnen sind.

¹⁸Vgl. [33] Stempkowski, S. 4 ff.

¹⁹Vgl. [24] ÖNORM B 2110:2013 03 15, S. 9 ff.

²⁰Vgl. [36] Zöhner, S. 56 ff.

3.1.3 Erschwerter Vortrieb

Erschwerter Vortrieb: Von diesem ist dann die Rede, wenn die angebotene Leistung nicht eingehalten werden kann. Gründe dafür können unter anderem die Notwendigkeit von Zusatzmaßnahmen sowie das Vorliegen von Vortriebserschwernissen sein. Unter Vortriebserschwernissen versteht die *ÖNORM B 2203-2*²¹ zum Beispiel:

1. Wassererschwernisse,
2. hoher Verschleiß,
3. Klebrigkeit,
4. Hindernisse,
5. oder sonstige Erschwernisse: z.B. Blockigkeit, Verspannprobleme oder Stützflüssigkeitsverlust bei Schildmaschinen.

Die zuvor genannten Erschwernisse ziehen alle eine Minderung der Vortriebsleistung und gleichzeitig andere zusätzliche, meist nicht kalkulierte Leistungen nach sich. Diese Erschwernisse sollen in den folgenden Zeilen beschrieben werden.

Wassererschwernisse:

verursachen zum Beispiel zusätzliche Wasserhaltungsmaßnahmen, welche durch den nicht erwarteten überproportionalen Andrang von Bergwasser verursacht werden.

Hoher Verschleiß:

wird durch sehr abrasives Gestein verursacht, welches einen oftmaligen Austausch der Bohrwerkzeuge und eine damit in Zusammenhang stehende Leistungsminderung nach sich zieht.

Klebrigkeit:

bedingt Maßnahmen, die gesetzt werden müssen, um eine Verklebung des Abbaumaterials zu verhindern. Dies wird durch die Beigabe von Additiven, wie zum Beispiel Bentonit oder Polymeren erreicht. Durch die genannten Maßnahmen kann die Verklebungsgefahr im Abbauraum reduziert werden.

Blockigkeit:

ist eine Erscheinung beim Vortrieb im Festgestein, bei der es an der Ortsbrust oder innerhalb des Bohrkopfbereichs zum Ablösen größerer Gesteinsbrocken aus dem Gesteinsverband kommt.

Verspannprobleme:

treten zum Beispiel auf, wenn eine TBM-O eingesetzt wird und die Gripperschuhe im Bereich von Störungszonen keinen Widerhalt finden.

Stützflüssigkeitsverlust bei Schildmaschinen:

tritt auf, wenn im Bereich der Abbaukammer das Stützmedium (z.B. Suspension aus Bentonit und Ton) über Störungen im Gesteinsverband abfließen und dadurch der erforderliche Stützdruck für den Betrieb der Maschine nicht erreicht werden kann.

²¹Vgl. [25] ÖNORM B 2203-2:2005 01 01, S. 19 ff.

3.1.4 Gestörter Bauablauf nach Müller/Goger

Die Autoren *Müller/Goger*²² geben folgende Definition:

„Bei gestörten Bauabläufen treten Leistungsabweichungen (sowohl Leistungsänderungen als auch Störungen der Leistungserbringung) gegenüber dem vereinbarten Bau-Soll/Leistungsumfang auf. Dabei führen wechselseitige Überlagerungen einzelner Leistungsabweichungen (zB verspätete Auftragserteilung, verzögerter Baubeginn, verspätete Übergabe von Ausführungsunterlagen, fehlende Vorleistungen des AG, geänderte Baugrundeigenschaften) zu massiven baubetrieblichen Folgewirkungen auf die Leistungserbringung, deren bauwirtschaftliche und baubetriebliche Auswirkungen (Bauzeit und Kosten) im Einzelfall oft schwierig und nur mit großem Aufwand bewertet werden können.“

3.1.5 Vortriebsunterbrechung nach ÖNORM B 2203-2

Die *ÖNORM B 2203-2*²³ gibt folgende **Definition** zu einer **Vortriebsunterbrechung**:

„Zeit, in welcher im Vortrieb Arbeiten durchgeführt werden, die jedoch nicht nach vereinbarten Vortriebsklassen abgerechnet werden können.“

3.1.6 Vortriebsunterbrechung nach dem Autor

Der Autor versteht unter einer Vortriebsunterbrechung, dass die Arbeiten der Tunnelbohrmaschine gänzlich zum Erliegen kommen. In diesem Zusammenhang ist es aus der Sicht des Autors egal, ob diese Unterbrechung aus konstruktiver Sicht, z.B. Beseitigung von Verbrüchen oder aus bauablauftechnischer bzw. baubetrieblicher Seite, z.B. Engpass in der Tübbingproduktion notwendig werden.

Der einzige Gedanke, der zu diesem Zeitpunkt für das Baugeschehen zählt, ist, dass die Maschine keine weiteren Tunnelmeter auffahren kann. Der Autor weist an dieser Stelle darauf hin, dass durch diese Definition keinesfalls eine Sphärenaufteilung hinsichtlich der Verantwortlichkeit für die Ursache von Vortriebsunterbrechungen getätigt wird. Die Sphärenzuordnung hinsichtlich des Verschuldens einer Vortriebsunterbrechung sollte aus der Sicht des Autors für jede einzelne Situation individuell angesehen werden.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass sich die folgenden Ausführungen, sofern sie nicht direkte Zitate aus Literaturquellen sind, auf die in Abs. 3.1.6 getätigte Definition bezieht.

3.2 Ursachen Vortriebsunterbrechungen bzw. Störungen

Der Autor dieser Arbeit entschließt sich an dieser Stelle, selbstständig eine Zuordnung für die Vortriebsunterbrechungen zu treffen. Diese Unterscheidung soll dem Leser verdeutlichen, dass es auf der einen Seite Unterbrechungen gibt, die vor Beginn der Vortriebsarbeiten bekannt und abschätzbar sind. Auf der anderen Seite gibt es Gründe für Stillstände welche unerwartet auftreten und nicht nur Zeitverzögerungen hervorrufen können, sondern auch andere Prozesse negativ beeinflussen.

In den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 werden verschiedenen Beispiele für die beiden zuvor genannten Arten von Vortriebsunterbrechungen beschrieben und erläutert.

²²Vgl. [22]:2016, S. 40

²³Vgl. [25] ÖNORM B 2203-2:2005 01 01, S. 29 ff.

3.2.1 Ursachen für Vortriebsunterbrechungen, die vor Vortriebsbeginn bekannt sind

Unter dieser Art von Vortriebsunterbrechungen versteht man Ereignisse, die geplant sind und dadurch im Bauablauf bzw. der Termin- und Bauablaufplanung relativ gut berücksichtigt werden können. Zeitspannen für die einzelnen Vorgänge werden meist aus bereits abgewickelten Projekten generiert.

1. Revisions- und Kontrollarbeiten an der TVM:

Darunter sind Vortriebsunterbrechungen zu verstehen, die notwendig sind, um diverse Einrichtungen, wie zum Beispiel Hubzylinder zu warten bzw. zu servicieren. Unter Revisionsarbeiten versteht man weiters vorbeugende Austauscharbeiten, die eine plötzliche Unterbrechung der Vortriebsarbeiten verhindern sollen. Unter anderem sind bei Revisionsarbeiten die Bohrwerkzeuge, auch Disken genannt, zu kontrollieren. Diese können aus Sicherheitsgründen nur im stehenden Zustand der Maschine begutachtet und gegebenenfalls getauscht werden. *Leitner*²⁴ beschreibt in seiner Arbeit, dass sich Diskenstandzeiten je nach Abrasivität des abzubauenen Gesteins zwischen 200 m bis zu über 2.000 m bewegen. Eine Standzeit von 200 m bedeutet eine extrem hohe Abrasivität des Gebirges und Standzeiten über 2.000 m bedeuten eine sehr geringe Abrasivität. Die Revisionsarbeiten werden laut *Girmscheid*²⁵ möglichst zu täglichen bzw. wöchentlichen Fixterminen zusammengefasst.

2. Schichtwechsel:

Im Zuge eines Schichtwechsels kommt es ebenfalls meist zu einer Vortriebsunterbrechung, wenn auch nur zu einer kurzen. Während dieser Zeit werden die Maschinen übergeben und es findet zwischen den Vortriebsdritteln ein Informationsaustausch statt, welche Probleme bzw. Störungen in der abgelaufenen Schicht aufgetreten sind.

3. Verlängerung, Revision der Stetigförderanlagen:

Darunter sind Maßnahmen und Arbeiten für die Verlängerung von Förderbändern und Gleisschienen zu verstehen. Da die Schutterzüge und Förderbandanlagen bei einer kontinuierlich arbeitenden Maschine jederzeit verfügbar sein müssen, ist eine Erweiterung bzw. Revision der Schienenanlage oder der Förderbänder möglichst in jenen Zeitraum zu legen, wo gleichzeitig Revisionsarbeiten an der TVM vorgenommen werden.

4. Vermessungsarbeiten:

Darunter sind Arbeiten für die geodätische Aufnahme der Lage des Tunnelbauwerks zu verstehen. Des Weiteren können darunter Kontrollmessungen verstanden werden, die etwaige Deformationen bzw. Nachgiebigkeiten im Gebirge zu Tage fördern sollen.

5. Geologische Erkundung:

Um die Maschineneinstellungen auf bevorstehende bzw. anstehende Störungszonen optimal kalibrieren zu können, ist es oft notwendig, die Ortsbrust visuell zu begutachten bzw. zu befunden. Dazu muss der Vortrieb ebenfalls unterbrochen werden. Bei dieser Art der Vortriebsunterbrechung ist es meist nicht möglich, diese Begutachtungsarbeiten zeitlich mit anderen Vortriebsunterbrechungen zusammenzulegen, da sie in Abhängigkeit vom Verlauf der Gebirgseigenschaften notwendig werden. Im Anschluss an die geologischen Erkundungen an der Ortsbrust kann es auch notwendig sein, Erkundungsbohrungen in den Untergrund vorzutreiben.

²⁴Vgl. [21] Leitner, S. 70 ff.

²⁵Vgl. [10] Girmscheid, S. 403 ff.

6. Nachbau der Kabel und Wasserleitungen:

Unter dieser Art von Vortriebsunterbrechungen sind alle Maßnahmen und Arbeiten zu verstehen, um die Versorgungsinfrastruktur für Elektrizität und Wasser sicherstellen zu können und diese an den Vortriebsfortschritt anzupassen. *Hofer*²⁶ beschreibt, dass nicht nur für den Antrieb des Bohrkopfes, sondern auch für Installationen auf dem Nachläufersystem, wie zum Beispiel für die Ladeförderbänder, die Entstaubungsanlage und andere Förderbänder eine ausreichende Elektrizitätsversorgung sichergestellt werden muss. Ebenso wird elektrische Energie für diverse Sicherheitsbeleuchtungen, die Beleuchtung von Arbeitsplätzen sowie für Absperrbeleuchtungen auf der TVM benötigt. Die Arbeiten für Adaptierungen dieser Leitungen müssen, wenn es einen rad- oder gleisgebundenen Schutterbetrieb gibt, auf jeden Fall zeitlich mit dem Schutterkonzept abgestimmt werden, um etwaige Schäden von Beginn an verhindern zu können.

3.2.2 Ursachen für Vortriebsunterbrechungen, die vor Vortriebsbeginn nicht bekannt sind

Unter dieser Art von Vortriebsunterbrechungen versteht man Ereignisse, die geplant sind und dadurch im Bauablauf bzw. der Termin- und Bauablaufplanung relativ gut berücksichtigt werden können.

1. Instabile Ausbruchslaibung / Verklemmen der TVM:

Diese Art der Vortriebsunterbrechung kann zu sehr schwerwiegenden Folgen führen, da eine Verklemmung des Schildes, ein Blockieren des Bohrkopfes oder eine Beschädigung des Ausbaus meist zeitintensive Arbeiten nach sich ziehen. Daher können damit in Zusammenhang stehende instabile Ausbruchslaibungen großen Einfluss auf den weiteren Verlauf der Vortriebsarbeiten haben. Bei Störungszonen im Vortrieb mit TBM-O kann eine Verklemmung zu einem mehrere Monate dauernden Freilegungsprozess führen. *Hofer*²⁷ beschreibt, dass es durch eine instabile Ausbruchslaibung auch zu einem sogenannten Bergschlag kommen kann. Dies ist ein schlagartiges Ablösen von Gesteinsplatten durch Sprödbbruch. Dieses Ereignis wird in der Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG)²⁸ definiert.

2. Wassereinbruch:

Durch einen plötzlichen Wassereinbruch bzw. einen erhöhten Andrang von Bergwasser kann es zu einer Vortriebsunterbrechung kommen. In weiterer Folge ist es notwendig, die Wasserhaltung an den Andrang des Bergwassers anzupassen oder diesen durch etwaige Injektionen zu verringern. Die Vorrichtungen, um Injektionsarbeiten durchführen zu können, sind teilweise in den heutigen Maschinenkonzepten der Nachläufereinrichtungen integriert.

3. Gasvorkommen:

Im Zug von Tunnelvortriebsarbeiten können auch Gase in den Tunnelquerschnitt eintreten. Einige der im Folgenden aufgezählten Gase beschreibt *Hofer*²⁹ in ihrer Arbeit als toxisch und sie können somit Leib und Leben der Mineure bedrohen. Zu den schädlichen Gasen gehören:

- a) Kohlendioxid [toxisch]
- b) Kohlenmonoxid [toxisch]

²⁶ Vgl. [16] Hofer, S. 13 ff.

²⁷ Vgl. [16] Hofer, S. 11

²⁸ Vgl. [28] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (Hrsg.), S. 15

²⁹ Vgl. [16] Hofer, S. 10 ff.

- c) Schwefelwasserstoff [toxisch]
- d) Schwefeldioxid [toxisch]
- e) Stickstoff
- f) Stickstoffmonoxid [toxisch]
- g) Stickstoffdioxid [toxisch]
- h) Wasserstoff
- i) Methan

Zu den gefährlichsten Gasen zählen jedoch Methan und Wasserstoff, da sie bei einer gewissen Konzentration explosiv reagieren können. So kann es bei einer entsprechenden Konzentration zur Bildung eines Schlagwetters kommen. Des Weiteren sind Vortriebsunterbrechungen auch notwendig, wenn die MAK erreicht wird.

4. Maschinenbruch oder Ausfall der Nachläufereinrichtung:
Das Risiko für einen Ausfall oder Bruch der Maschine bzw. der NLE sollte durch periodische Wartungs- bzw. Revisionsarbeiten auf ein Minimum reduziert werden. *Leitner*³⁰ beschreibt, dass diese Art der Vortriebsunterbrechungen rein zufällig passiert und nicht vorhergesagt werden kann. Daher ist es wichtig, möglichst schnell darauf zu reagieren. Dies kann zum Beispiel durch ein Konsignationslager der wichtigsten Ersatzkomponenten der TVM gewährleistet werden.
5. Tübbingproduktion:
Wenn es bei Maschinenkonzepten wie einer TBM-S oder einer DSM zu einem Engpass an Tübbing kommt, führt das zu einer Vortriebsunterbrechung, da die notwendigen Sicherungsmittel für die Tunnelauskleidung nicht zur Verfügung stehen. Die Balance zwischen den Lagermöglichkeiten und dem Verbrauch für die richtige Produktionskapazität zu finden, ist oft schwierig, da die Produktion nicht so variabel an die Vortriebsgeschwindigkeit der TVM angepasst werden kann. Diese Art der Vortriebsunterbrechungen sollte tunlichst vermieden werden, da an dieser Stelle Kosten für Stillstände mit einer ausgereiften Logistik- bzw. Produktionsplanung der Tübbinge eingespart werden können.
6. Witterung:
In vielen Fällen liegen die Eingangsbereiche von Tunnelbauwerke in höher gelegenen Lagen. In der Jahreszeit von Herbst oder Winter kann es in diesen Bereichen sehr schnell zu einem Wintereinbruch kommen. Dadurch könnte eine Vortriebsunterbrechung entstehen, da zum Beispiel durch zu große Schneemassen der Schuttbetrieb mit großen radgebundenen Maschinen nicht aufrecht erhalten werden kann. In diesem Fall wäre ein durchgängig förderbandgebundener Materialtransport von Vorteil.

3.3 Auswirkungen von Vortriebsunterbrechungen und Verknüpfung mit dem Einarbeitungseffekt

Die Auswirkungen von Vortriebsunterbrechungen haben nicht nur auf den zeitlichen, sondern auch auf den wirtschaftlichen Kontext der Baustelle großen Einfluss, denn Geld und Zeit sind in der heutigen Bauwirtschaft in den meisten Fällen die wichtigsten Parameter.

³⁰Vgl. [21] Leitner, S. 108 ff.

Auf der einen Seite gibt es die wirtschaftlichen und auf der anderen Seite die zeitlichen Auswirkungen. Zuerst bezieht sich der Autor auf die zeitlichen Auswirkungen. Durch Vortriebsunterbrechungen kann es nicht nur zu einer punktuellen Verzögerung des Vortriebes kommen, sondern diese kann sich durch das gesamte verbleibende Projekt ziehen. Diese dauerhaft bleibenden Verzögerungen und die damit verbundenen Vortriebsunterbrechungen treten zu Tage, wenn die Projektdauer zu offensiv kalkuliert bzw. die Vortriebsleistungen zu hoch angesetzt werden. Dies ist leider im heutigen Tunnelbaugeschäft ein weit verbreiteter Alltag. Die anscheinend ständig zu langsamen Vortriebsleistungen können sich jedoch auch demotivierend auf das Arbeitsklima der Mannschaft auswirken. Des Weiteren kann eine zu hektische Arbeitsweise, welche durch einen zu knappen Zeitplan verursacht wird, zu Unfällen führen.

In diesem Zusammenhang ist anzuführen, dass die Bauzeitverlängerung nicht nur durch den Zeitraum des Stillstands verursacht wird, denn nach dem Wegfallen der Ursache für die Vortriebsunterbrechung beginnt die Phase der Einarbeitung. Die Summe der Differenz zwischen dem optimalen Aufwandswert des Vortriebs und des im Verlauf der wieder aufgenommenen Arbeiten besser werdenden Aufwandswerts über die Vortriebsdauer aufsummiert, kommt zur Bauzeitverlängerung nachteilig hinzu.

Wie am Anfang des Kapitels beschrieben, sind die zeitlichen und die kostenmäßigen Komponenten einer Tunnelbaustelle in der heutigen Zeit immer stärker voneinander abhängig. So kann sich ein und dieselbe Vortriebsunterbrechung nicht nur auf die Bauzeit, sondern durchaus massiv auf die Kosten der Baustelle auswirken. Dies will der Autor anhand eines Beispiels erläutern.

Wenn z.B. durch einen Stillstand oder ein Problem bei den Vortriebsarbeiten für eine gewisse Zeit der Einbau der Tunneltübblinge nicht durchgeführt werden kann, ist es wahrscheinlich nicht bzw. nur mit viel Aufwand möglich, die Tübblingproduktion zu reduzieren. In der Zeit nach dem Wegfall des Grunds für die Störung, müssen sich die Mannschaften erneut an die optimale Leistung heranarbeiten. In diesem Zusammenhang kommt der EAE voll zu tragen. Aus diesem Grund muss für die Zeit, in der ein Stillstand der Arbeiten vorliegt, ausreichend Platz für die Zwischenlagerung der Tübblinge vorhanden sein. Somit kann eine temporäre Unterbrechung des Vortriebs auch Kosten für die Miete eines zusätzlichen Grundstückes verursachen, auf dem die Tübblinge gelagert werden können. Durch dieses Beispiel will der Autor verdeutlichen, dass auch schon kleine Änderungen des Bauablaufs in Zusammenhang mit dem EAE erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Projekts haben können.

3.4 Maßnahmen zur Verminderung und zur Verkürzung von Vortriebsunterbrechungen

Um die richtigen Maßnahmen wählen zu können, ist es immer nötig, die möglichen Auswirkungen der angedachten Maßnahmen in Betracht zu ziehen. Des Weiteren ist der Aufwand gegenüber dem Nutzen zu betrachten.

In Abb. 3.1 ist eine grafische Übersicht der verschiedenen Maßnahmen geboten, welche helfen können, die Anzahl der Vortriebsstillstände zu vermindern bzw. weiterführende Schäden für Mensch und Maschine zu verhindern. Der Autor unterscheidet in Abb. 3.1 bewusst zwischen Ursachen für Stillstände, die vor dem Vortriebsbeginn bekannt sind, und Ursachen für Stillstände, die nicht bekannt sind bzw. plötzlich auftreten. Die tabellarische Auflistung ist für die in Abschnitt 3.2.1 und Abschnitt 3.2.2 behandelten Ursachen von Vortriebsunterbrechungen erstellt worden. Der Verfasser dieser Arbeit weist darauf hin, dass es noch viele andere Ursachen für Vortriebsunterbrechungen gibt, die an dieser Stelle nicht behandelt werden. Die Maßnahmen zur Verminderung von Stillständen in Abb. 3.1 sind in „Maßnahmen – konstruktiv“ und „Maßnahmen – baubetrieblich bzw. bauablauftechnisch“ eingeteilt. Dies soll verdeutlichen, dass es eine Fülle

von Maßnahmen gibt, die keine konstruktive Wirkung haben, jedoch auf den Tunnelbauprozess große zeitliche Auswirkungen haben können.

Im Zuge der Durchsicht der in Kapitel 5 und 6 behandelten Datensätze ist dem Verfasser aufgefallen, dass des Öfteren einige zeitlich ungünstig gewählte Vermessungs-, geologische Erkundungs-, Revisions- und Nachbaurbeiten von Leitungen durchgeführt wurden, die den Vortrieb verhältnismäßig lange stilllegen. An dieser Stelle wird empfohlen, diese Arbeiten möglichst in den Zeitraum von geplanten Revisionen zu verlegen, um Stillstandszeiten einsparen zu können. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass eine parallele Ausführung von zum Beispiel verhältnismäßig kleinen Wartungsarbeiten während einer Vermessungsarbeit einen nicht zu unterschätzenden zeitlichen Vorteil für den Vortrieb mit sich bringt. Des Weiteren schlägt der Autor dieser Arbeit einen prophylaktischen Wechsel des Bohrwerkzeuges während der Dauer von Stillständen vor. Dieser vorgezogene Werkzeugwechsel-Vorgang ist natürlich nur sinnvoll, wenn die Verschleißparameter des Werkzeuges einen baldigen Wechsel des Werkzeuges prognostizieren. Hierzu könnte ein Disc Cutter Rotation Monitoring (DCRM) System verwendet werden. Dieses System misst die Drehbewegung und Temperatur der Schneidrollen und kann somit Informationen über den Zustand des Bohrwerkzeuges liefern. Mit dieser Arbeitsweise könnten die Stillstandszeiten der einzelnen Vorgänge von einem linearen hintereinander erfolgenden Ablauf zu einem parallelen Ablauf überführen und somit einige zukünftige Stillstände des Vortriebs und somit anfallende Kosten vermeiden.

3.4.1 Maßnahmen – konstruktiv

Anker

Anker sind zusätzliche Sicherungsmaßnahmen, die als Zugglieder wirken. Sie nehmen die Kraft auf und leiten sie in den anstehenden Untergrund ein. Anker erhöhen durch die Einleitung der Zugkraft auch den Scherwiderstand. Man unterscheidet bei Ankern grundsätzlich zwischen radialem Anker und Ortsbrustanker.

Bodenvereisung

Hofer³¹ beschreibt, dass eine temporäre Vereisung eine Maßnahme darstellt, um ein tragendes Gewölbe herzustellen. Ein weiterer Vorteil der temporären Bodenvereisung ist auf der einen Seite, dass durch dieses Verfahren unter anderem auch die Ortsbrust stabilisiert werden kann. Auf der anderen Seite stellt dieses Bodenstabilisierungsverfahren keine Gefahr für die Umwelt dar. Dies ist mit der vollständigen Reversibilität des Verfahrens zu begründen. Voraussetzung für den Einsatz des Verfahrens ist eine gewisse Mindestwassermenge in den Bodenporen, um eine Eisschicht ausbilden zu können.

Drainage und Ausbau der Wasserhaltung

Die Drainage hat die Aufgabe, das anfallende Sickerwasser aus dem Gebirge zu sammeln und abzuführen. Laut Hofer³¹ wird dabei möglichst darauf geachtet, dass das Sickerwasser an der Tunnellaubung gefasst und mittels Rinnen oder Pumpensämpfen kontrolliert aus dem Tunnelbauwerk abtransportiert wird. Des Weiteren wird erklärt, dass sich durch Drainagemaßnahmen kein Wasserdruck hinter der Spritzbetonauskleidung aufbauen kann und dadurch Schäden am Bauwerk sowie baubetriebliche Störungen verursacht werden. Durch die Volatilität des Sicker- bzw. Kluftwassers kann es notwendig werden, die Wasserhaltung zu adaptieren. Je nachdem, wie groß die unterschiedlich ankommenden Wassermengen sind, müssen entweder nur die Pumpenleistungen vergrößert oder auch zusätzliche bauliche Maßnahmen getätigt werden.

³¹Vgl. [16] Hofer, S. 19 ff.

Injektion

Beim Vorgang der Injektion werden die natürlichen Klüfte, Spalten und Risse im Gebirge mittels Injektionsgut und hohem Einbringdruck verfüllt. Das Injektionsgut muss aus der Sicht von *Girmscheid*³² folgende Anforderungen erfüllen:

1. Das Injektionsgut oder Komponenten davon dürfen während der Applikations- und Nutzungsphase nicht toxisch oder korrodierend wirken.
2. Die Stabilität des Materials unter den vorhandenen Temperaturen muss gewährleistet sein.
3. Das Injektionsgut muss stabil im Gebirgswasser sein, auch bei Vorhandensein von aggressiven Stoffen oder extremen pH-Werten.
4. Die Injektionsmasse muss nach der Injektion erhärten.
5. Die Materialkosten sollten möglichst tief liegen, da sie einen wesentlichen Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens darstellen.
6. Praxisbedingte Forderungen wie z.B. Lagerfähigkeit müssen erfüllt sein.

Um das Injektionsgut noch besser an die gegebenen geologischen Verhältnisse anpassen zu können, werden laut *Girmscheid*³² folgende unterschiedliche Zusatzmittel beigegeben:

1. Verflüssiger:
Ein Verflüssiger dient zur Reduzierung der Viskosität. Das Injektionsmittel ist leichter verarbeitbar, da die Oberflächenspannung des Wassers verringert wird. Der Wasserbedarf kann herabgesetzt werden.
2. Stabilisatoren:
Um Ausfällungen und Sedimentationen zu verhindern, verwendet man Stabilisatoren. Wegen ihrer Wirkung werden sie auch als thixotropierende Mittel bezeichnet.
3. Härtemittel:
Insbesondere bei Silikatgelinejektionen kommen Härtemittel zum Einsatz.
4. Beschleuniger:
Falls der Erstarrungsprozess zu langsam ist, werden Beschleuniger benötigt, die die Dauer des Abbindeprozesses beeinflussen.

Rohrschirm

Ein Rohrschirm ist eine optimale Stabilisierungsmaßnahme, die vor allem am Beginn bei Tunnelbauprojekten im Felsgestein eingesetzt wird. Laut *Girmscheid*³³ müssen bei diesen Projekten im Felsgestein die ersten 50 - 250 m durch Lockergesteinsgeröllfelder geführt werden. Des Weiteren werden Rohrschirme sehr oft bei Tunnelbauwerken mit geringen Überdeckungen und minimalen Abständen zu Gebäuden oder Verkehrswegen eingesetzt.

Schaum

Schäume, die im Bauwesen laut *Girmscheid*³⁴ seit 1960 als Injektionsmittel zur Anwendung kommen, bestehen hauptsächlich aus Polyurethanen. Das Aufschäumen unter Druckentwicklung führt zu einer selbsttätigen Sekundärinjektion feiner Risse und Poren in der Umgebung des ursprünglich

³²Vgl. [10] Girmscheid, S. 280 ff.

³³Vgl. [10] Girmscheid, S. 240 ff.

³⁴Vgl. [10] Girmscheid, S. 294 ff.

injizierten Bereichs. Der Druck, der bei der Schaumbildung entsteht, liegt zwischen drei und zehn Bar. Durch die chemische Zusammensetzung der Polyurethane können viele Variationen vorgenommen und damit die Schäume an die verschiedensten Untergrundverhältnisse angepasst werden. Grundlegend unterscheiden sich die Schäume von den restlichen Injektionsmitteln durch die unter Gasentwicklung eintretende Reaktion des Aufschäumens. An dieser Stelle soll noch auf die mögliche Brandgefahr von nicht geschützten Polyurethanen hingewiesen werden. Dies kann eine nicht unerhebliche Gefahr darstellen, wenn in der Nähe der expandierten Schäume geschweißt werden muss.

*Hofer*³⁵ beschreibt in ihrer Arbeit, dass durch den schnell möglichen Einsatz von Schäumen längere Vortriebsunterbrechungen verhindert werden können.

Überschnitt und besondere Ausbildung des Schildmantels

Unter Überschnitt versteht man laut *DAUB*³⁶ das Differenzmaß zwischen Bohr- und Schildradius, gemessen an der Schildschneide. Der Überschnitt dient z.B. der Verbesserung der Kurvenfahrt, der Reduzierung der Mantelreibung oder der Gebirgsentspannung. Durch einen ausreichenden Überschnitt kann somit ein Verklemmen der TVM verhindert werden.

Wie *Schmitt*³⁷ in seiner Arbeit erklärt, kann die Ausführung eines konisch ausgebildeten Schildmantels einen planmäßigen Überschnitt bewirken und somit eine mögliche Vortriebsunterbrechung verhindern.

3.4.2 Maßnahmen – baubetrieblich bzw. bauablauftechnisch

Bewetterung

Durch eine ausreichend groß dimensionierte Bewetterung kann gewährleistet werden, dass die MAK von Gasen nicht überschritten wird. Laut *Bauarbeiterschutzverordnung - Novelle 2017*³⁸ muss für jeden im Untertagebau beschäftigten Arbeitnehmer eine Frischluftmenge von mindestens $2 \text{ m}^3/\text{min}$ und für jeden eingesetzten Verbrennungsmotor mindestens $4 \text{ m}^3/\text{min}$ pro kW Nennleistung zur Verfügung stehen. Um etwaige Gasvorkommen im Verlauf des Tunnelbauwerks abfedern zu können und damit die möglichen Vortriebsunterbrechungen so kurz wie möglich zu halten, ist der Verfasser dieser Arbeit der Meinung, dass eine ausreichend dimensionierte Leistungsreserve der Bewetterung eine sinnvolle Aufwendung für die Sicherheit der Vortriebsmannschaften darstellt.

Räumung und Evakuierung der Vortriebsmannschaften bzw. temporäre Einstellung der Baustelle

Sowohl die Räumung und Evakuierung der Vortriebsmannschaft als auch die temporäre Einstellung der Baustelle können in manchen Fällen die einzige Alternative sein. Das wird zutreffen, wenn zum Beispiel eine zu große Menge an Bergwasser in das Tunnelbauwerk einsickert oder die maximalen Arbeitsplatzkonzentrationswerte von Gasen über eine gewisse Zeit dauerhaft überschritten werden. Innerhalb dieser Zeit ist ein sicherer Vortrieb im jeweiligen Tunnelbauprojekt nicht möglich. Bei Baustellen im hochalpinen Gelände, bei denen das abgebaute Gestein durch einen radgebundenen Schutterbetrieb abtransportiert wird, kann es aufgrund von Wintereinbrüchen zu einer Vortriebsunterbrechung kommen, da die Schutterfahrzeuge ihren Weg zwischen der Deponie und dem Überladeplatz nicht sicher befahren können.

³⁵ Vgl. [16] Hofer, S. 21 ff.

³⁶ Vgl. [8] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V., S. 8 ff.

³⁷ Vgl. [31] Schmitt, S. 13

³⁸ Vgl. [1] Bauarbeiterschutzverordnung - Novelle 2017:2017 09 05, S. 40 ff.

Strukturiertes Transport- und Logistikkonzept

Durch ein organisatorisch ausgereiftes Transport- und Logistikkonzept können Vortriebsunterbrechungen im Bereich des Transports der Tübbinge unterbunden werden. Eine Möglichkeit besteht darin, eine Feldfabrik in der Nähe des Tunnelportals zu errichten. Dies stellt zwar eine sehr kostenintensive Baustellenfabrikation dar, jedoch ist man dadurch von jeglichen anderen Verkehrseinflüssen unabhängig, die den Transport zur Baustelle zusätzlich erschweren könnten. Nach der Produktion der Tübbinge können diese mittels gleisgebundenen Transportmitteln zur Nachläufereinheit der TVM gebracht werden. Wenn die Gleise sowohl für den Abtransport des Abbaumaterials, als auch für den Tübbingtransport zur TVM genutzt werden, ist dies ein großes Kosteneinsparungspotential für die Baustelle. Die Nutzung dieser transporttechnischen Synergien bedeutet auch eine geringere Gefahr einer Vortriebsunterbrechung, verglichen mit dem radgebundenen Schuttertransport, da ein gleisgebundener Transport seine fixen Fahrtstrecken aufweist.

Anpassbare Produktionskapazität

Da der Tunnelvortrieb stark vom anstehenden Gebirge abhängig ist, kann es zu großen Schwankungen im Bereich der täglichen Vortriebsleistungen kommen. Bei Tunnelbauprojekten mit Tübbingauskleidung bietet dies einen möglichen Grund für Vortriebsunterbrechungen, da es produktionsbedingt zu einem Engpass an Tübbingringen kommen kann. Die Tübbingproduktion kann bisher noch nicht so rasch an die Vortriebsleistungen angepasst werden, wie dies oft notwendig wäre. Der Verfasser dieser Arbeit ist der Meinung, dass sich für zukünftige Tunnelbauprojekte eine vollautomatische Fertigung der Tübbinge ohne menschliche Arbeitskraft bezahlt machen wird. Dadurch kann nicht nur menschliche Arbeitskraft eingespart werden, sondern durch einen digitalen Austausch zwischen TVM und Tübbingwerk die Produktionskapazität adaptiv an die zu dieser Zeit aktuellen Vortriebsleistungen angepasst werden.

Arbeiten in Zeitraum geplanter Revisionen legen

Bei der Durchsicht der in dieser Arbeit behandelten Datensätze ist dem Verfasser aufgefallen, dass des Öfteren einige lang andauernde Revisionsarbeiten an Maschinenteilen bzw. den Werkzeugen oder Vermessungsarbeiten, geologische Erkundungen sowie Nachbauten von Kabel- und Wasserleitungen durchzuführen waren. Diese Arbeiten nehmen alle sehr viel Zeit in Anspruch. Aus diesem Grund schlägt der Verfasser zur Verkürzung der Stillstände vor, diese Arbeiten in den Zeitraum geplanter Revisionen zu verlegen, sofern dies möglich ist.

Gleitende Schichtübergabe bzw. Mannschaftsbesprechung

Durch die stark differenzierten Bedingungen im Tunnelbau können die unterschiedlichen Vortriebsmannschaften von Schicht zu Schicht stark variierende Vortriebsbedingungen vorfinden. In diesem Fall ist es aus der Sicht des Autors sinnvoll, eine gleitende Schichtübergabe durchzuführen. In dieser könnte die abgehende Vortriebsmannschaft, welche schon eine gewisse Einarbeitung im aktuellen Abschnitt aufzuweisen hat, die ankommende Vortriebsmannschaft unterweisen und auf die Spezifika hinweisen. Dem Autor dieser Arbeit ist bewusst, dass dies einen weiteren, nicht unwesentlichen Kostenfaktor für Tunnelbaustellen bedeutet, jedoch könnten dadurch mit großer Sicherheit einige Vortriebsunterbrechungen im Verlauf des Projekts verhindert werden, da die Mannschaft schon weiß, auf welche Spezifika sie in der jeweiligen Schicht zu achten hat.

Langfristig geplante Revisionsarbeiten

Durch langfristig geplante Revisionsarbeiten könnten mehrere mögliche Gründe für eine Vortriebsunterbrechung verhindert werden. Auf der einen Seite wäre es möglich, dass man anstehende Revisionsarbeiten an der Maschine effizienter gestaltet, indem man punktuelle Kontrollen der einzelnen Aggregate durchführt. Andererseits könnte durch dauerhaft geplante Revisionszyklen die Gefahr eines Maschinenbruchs bzw. des Bruchs der Nachläufereinrichtung verhindert werden.

Vorhaltung Konsignationslager der Ersatzteile

Bei einem Konsignationslager hält der Maschinenhersteller gewisse Teile vor Ort vorrätig. Diese bleiben bis zur Entnahme durch einen Vertreter des Lagernutzers im Eigentum des Maschinenherstellers. Erst durch die Entnahme kommt in diesem Sinne ein kostenpflichtiges Rechtsgeschäft zu Stande. Durch die Vorhaltung eines Konsignationslagers der dauerhaft benötigten Ersatzteile können Vortriebsunterbrechungen zwar nicht verhindert, jedoch auf einen möglichst kurzen Zeitraum eingegrenzt werden.



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

Kapitel 4

Das Lernen und der Einarbeitungseffekt im maschinellen Tunnelbau

Das Lernen und der EAE, welche im folgenden Kapitel behandelt werden, stehen in einer sehr engen Beziehung zueinander, da nach einem abgeschlossenen Lernprozess die Arbeit auch in kürzerer Zeit erledigt werden kann. Die Verkürzung des Zeitaufwands pro Arbeitseinheit stellt vereinfacht den EAE dar.

4.1 Das Lernen im maschinellen Tunnelbau

Nach jeder Vortriebsunterbrechung setzt sich ein Vorgang der Anpassung in Gang. Bei manchen Unterbrechungen sind die Anpassungsprozesse größer und dauern dadurch länger und bei anderen Stillständen sind nur geringe Anpassungsarbeiten durchzuführen und diese sind kürzer. Die Anpassungsarbeiten stellen jedoch alle einen Lernprozess dar, welcher am Anfang nach einer Vortriebsunterbrechung die größte Zeitdauer beansprucht, und nimmt mit zunehmender Vortriebsstrecke ab. Somit ist in jeder Einarbeitungsphase ein gewisser Lernprozess implementiert. Im folgenden Abschnitt der Arbeit wird ein Überblick über die Grundlagen des Lernens gegeben und zwei verschiedene Theorien und ihre Übertragung auf die maschinellen Tunnelbauvorhaben erläutert.

Definition des Lernbegriffs

Für den Vorgang des Lernens gibt es in der Fachliteratur keine eindeutige Definition. *Wachter*³⁹ beschreibt, dass nur die Auswirkungen, sprich die Leistungserhöhungen während des Lernvorgangs bzw. bei späteren Durchführungen der Tätigkeiten ersichtlich sind. Führt man nun die unterschiedlichen Versuche einer Definition des Lernens zusammen, so erhält man laut dem zuvor erwähnten Experten³⁹ folgende Definition:

„Mit Lernen werden relativ überdauernde Änderungen der Verhaltensmöglichkeiten bezeichnet, soweit sie auf Erfahrung zurückgehen.“

In diesem Zusammenhang wird in der Fachliteratur erwähnt, dass der Begriff der Erfahrung meist durch Synonyme wie zum Beispiel Wiederholung, Übung oder Training beschrieben wird.

Lerntheorie – Reiz-Reaktion

Die Reiz-Reaktionstheorie rührt aus dem Umfeld der psychologischen Lernforschung her. Man bezeichnet diesen Bereich auch als Behaviorismus. Aus dem englischen Begriff *behaviour*, welcher zu Deutsch *Verhalten* bedeutet, kann man auf den Kontext des Themas schließen. Es handelt sich dabei nämlich um die Theorie der Wissenschaft in Hinsicht auf menschliches und tierisches Verhalten. Dabei wird laut einer digitalen Quelle⁴⁰ das menschliche Gehirn als sogenannte „*Black Box*“ angesehen. Des Weiteren bleiben die inneren Prozesse des Menschen wie zum Beispiel Emotion, Motivation oder Absicht zwar nicht geleugnet, aber sie werden bewusst nicht

³⁹Vgl. [34] Wachter, S. 83 ff.

⁴⁰Vgl. [17] Höhne

berücksichtigt. Laut einer Internetquelle⁴⁰ sind die grundlegenden Paradigmen des Behaviorismus das Reiz-Reaktions-Schema, sprich auf gewisse Reize folgen bestimmte Reaktionen. Das „Black Box“-Modell des Behaviorismus wird auch in Abb. 4.1 dargestellt. Das zentrale Thema im Behaviorismus ist, dass das Lernen als Verstärkung bzw. Abschwächung von Verhaltensweisen gesehen wird. In diesem Zusammenhang ist noch hinzuzufügen, dass die Reaktionen als Antwort auf die Reize zu Beginn eher einen zufälligen Charakter aufweisen, während sie zu einem späteren Zeitpunkt bewusst gewählt werden.

Lerntheorie – Kognitives Lernen

Bei der Reiz-Reaktionstheorie nimmt man als Grundlage an, dass die Umwelt durch Reize gekennzeichnet wird. Im Gegensatz dazu geht man bei der kognitiven Theorie davon aus, dass eine Problemsituation für den Lernenden durch Zeichen charakterisiert und dadurch der Weg zum geplanten Ziel ersichtlich ist. Da die Zeichen des Lernprozesses zu Beginn die Struktur des Problems nur sehr unvollkommen erscheinen lassen, wird der Lernende zunächst Annahmen über die gegenständliche Struktur machen und sein Verhalten seinen Zielen anpassen. Das Modell des Kognitivismus ist in Abb. 4.2 ersichtlich. Aus der Abbildung kann man ersehen, dass der Mensch im Kognitivismus nicht als *Black Box* gesehen wird, sondern die innerpsychischen Prozesse untersucht werden. Es wird in diesem Zusammenhang genau festgestellt, dass jede Person unterschiedlich auf verschiedene Reize reagiert und dadurch unterschiedliche Reaktionen hervorgerufen werden.

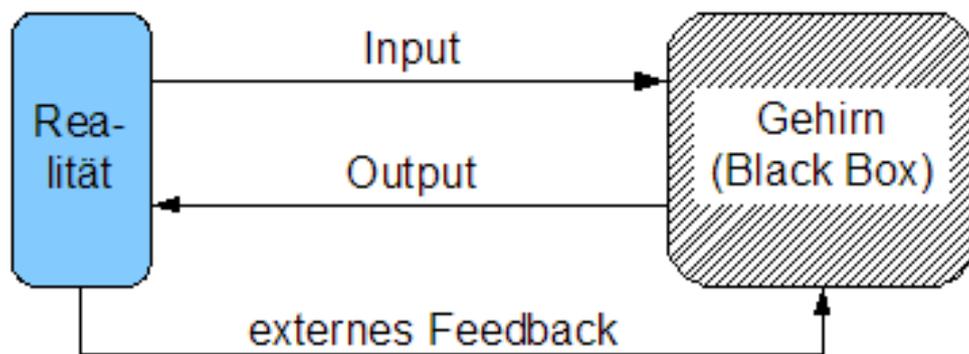


Abb. 4.1: Darstellung des „Black Box“- Modells des Behaviorismus (Quelle: Homepage Lernpsychologie, [17])

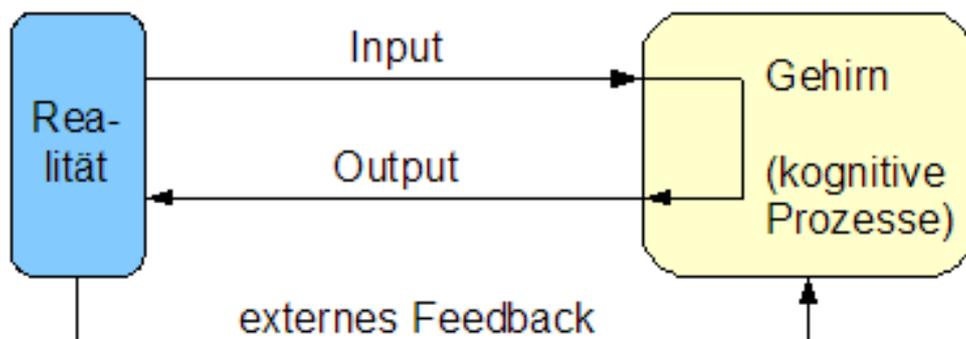


Abb. 4.2: Darstellung des Modells des Kognitivismus (Quelle: Homepage Lernpsychologie, [17])

Parallelen der Lerntheorien zum Lernen im maschinellen Tunnelbau

Die beiden behandelten Formen des Lernens sind beide im maschinellen Tunnelbau zu finden. Auf der einen Seite gibt es eine Verbesserung der Geschicklichkeit durch Übung, wie sie bei der Reiz-Reaktionstheorie behandelt wird. Dies ist laut Autor im Bereich der Ausführung zu finden. Im Gegensatz dazu spielt das organisatorische Lernen bei kognitiven Vorgängen eine größere Rolle. Dies ist im Bereich der Baustellenorganisation bzw. -verwaltung anzutreffen.

*Wachter*⁴¹ beschreibt, dass es für den Lernfortschritt bei der Reiz-Reaktionstheorie auf die Anzahl der Wiederholungen ankommt. Umgelegt auf den Tunnelbau kann man darunter die Hübe bzw. die zurückgelegte Vortriebsstrecke verstehen. Bei der kognitiven Theorie kommt es auf die Form des organisatorischen Lernens an, dies kann man im maschinellen Tunnelbau auf die Baustellenorganisation bzw. Baustellenplanung umlegen.

4.2 Der Einarbeitungseffekt im Tunnelbau

„Vor der Ortsbrust ist es schwarz.“ *Girmscheid*⁴².

Dieses Zitat soll verdeutlichen, dass zu Beginn eines Tunnelbauprojekts viele verschiedene Faktoren weitgehend unbekannt sind. Es werden zum Beispiel geologische Untersuchungen durchgeführt, jedoch sind dies Sondierungen, sprich punktuelle Stichproben. Wenn man die Oberflächen, die durch die Untersuchungen erkundet wurden, zum Einflussgebiet des Projekts in Beziehung setzt, haben diese meist ein Flächenverhältnis von eins zu zehntausend und mehr. Diese Aussage soll verdeutlichen, dass die Untersuchungen im Vorfeld eines Projektes jedenfalls ein guter Anhaltspunkt für die Projektierungen sind, jedoch kann eine Untergrunderkundung keine vollständige Kenntnis über das Untergrundgefüge darstellen.

Der Einarbeitungseffekt stellt das zentrale Thema dieser Arbeit dar und soll auf den nächsten Seiten eingehend behandelt werden.

Einleitung

Um einen Einarbeitungseffekt ermitteln zu können, ist es auf jeden Fall notwendig, zuerst einen gewissen Vorgang zu lernen. Wie *Wachter*⁴³ in seiner Arbeit beschreibt, ist das Lernen keine messbare Größe. Es können nur die Auswirkungen und Folgen des Lernens als Messgrößen erfasst werden. Unter dieser Prämisse, dass die zu messende Größe einfach erfassbar sein soll, beschäftigt sich das Kapitel 4.2.2 mit dieser Thematik näher.

In der stationären Industrie, wie zum Beispiel der Automobilindustrie, verwendet man den Einarbeitungseffekt schon seit längerer Zeit und setzt diesen auch in den Berechnungen für die Produktionsplanung an. Hingegen bei der Fertigung auf Baustellen ist man sich der Existenz dieses Phänomens bewusst, jedoch werden die Folgen des Einarbeitungseffekts laut *Wachter*⁵⁰ nicht in dem Ausmaß wie in der Automobilindustrie angesetzt. Im Folgenden werden die Gründe aufgezählt, welche die stationäre Industrieproduktion maßgeblich von der Baustellenproduktion, im Speziellen dem Tunnelbau, unterscheiden:

1. Sich änderndes Arbeitsumfeld im Verlauf des Projekts
2. Psychischer Stressfaktor bei Arbeiten unter Tage
3. Geologisch bedingte Änderungen des Arbeitsablaufs

⁴¹Vgl. [34] Wachter, S. 86 ff.

⁴²Vgl. [10] Girmscheid, S. 2

⁴³Vgl. [34] Wachter, S. 10 ff.

4. Betriebswirtschaftliche Unschärfen bei der Ermittlung des Leistungsstandards bzw. der einzelnen Leistungswerte
5. Individuell notwendige Anpassung der täglichen Arbeiten
6. Geringe Variationsmöglichkeit der Tätigkeiten

4.2.1 Definitionen in der Literatur

In diesem Abschnitt will der Autor dem Leser einen Überblick über die verschiedenen bzw. ähnlichen Definitionen der diversen Autoren aus der Literatur verschaffen und damit zeigen, dass bei gleichem Sinn sehr verschiedene Bezeichnungen verwendet werden können. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Einarbeitung natürlich auf unterschiedliche Weisen betrachtet werden kann. Wenn der Bauprozess aufgeteilt wird, ist es möglich, die Einarbeitung der reinen Arbeitstätigkeit separiert von der Einarbeitung anderer Bereiche, wie zum Beispiel der Logistik oder anderen Teilen des Bauprozesses, zu sehen. Aus Gründen der besseren Verständlichkeit für den Leser hat der Verfasser dieser Arbeit in Abb. 4.3 einen allgemeinen Vorgang der Einarbeitung dargestellt. Die folgenden Definitionen aus der Literatur bemühen sich alle, die Abb. 4.3 zu beschreiben.

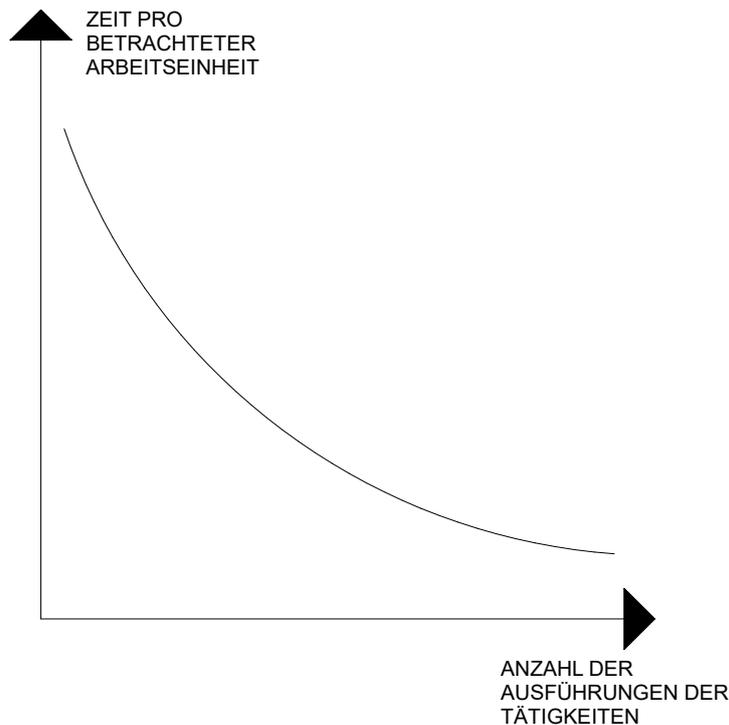


Abb. 4.3: Darstellung Einarbeitungseffekt

Einarbeitungseffekt nach Platz

Platz⁴⁴ beschreibt in seiner Arbeit, dass es sich beim Einarbeitungseffekt um die Verminderung des Zeit- bzw. Arbeitsaufwands für die Ausführung von sich wiederholenden, gleichbleibenden Arbeitsvorgängen bei der Produktion bzw. Disposition handelt. Die Schwierigkeit besteht darin, die Einflüsse der Einarbeitung aus der Fülle der endogenen und exogenen Faktoren zu separieren.

⁴⁴Vgl. [29] Platz, S. 130 ff.

Einarbeitungseffekt nach Stempkowski

Unter dem Einarbeitungseffekt versteht man laut *Stempkowski*⁴⁵ Folgendes: „Wird eine Leistung unter gleichen Rahmenbedingungen öfter wiederholt, stellt sich das Optimum erst nach einigen Wiederholungen ein.“ Außerdem wird vom genannten Autor beschrieben, dass die Mannschaft bei den ersten Takten logischerweise höhere Aufwands- bzw. niedrigere Leistungswerte bei ihren Arbeiten erzielt. Des Weiteren erläutert *Stempkowski*, dass der Einarbeitungseffekt von einer Fülle an Faktoren abhängt. Diese sollen näher im Kapitel 4.4 behandelt werden.

Einarbeitungseffekt nach Wachter

*Wachter*⁴⁶ beschreibt in seiner Arbeit, dass die Auswirkungen des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau besonders ausgeprägt sein können. Einarbeitungsphasen von drei Monaten und mehr sind durchaus üblich und können sich bis zu einem Dreivierteljahr erstrecken. Eine explizite Definition des Einarbeitungseffekts wird von *Wachter* nicht gegeben.

Einarbeitungseffekt nach Schmidberger

Unter dem Einarbeitungseffekt versteht man laut *Schmidberger*⁴⁷, dass die Ausführungsdauer einer Tätigkeit bei mehrfachen Wiederholungen und gleichen Randbedingungen reduziert werden kann. Umfang und Geschwindigkeit der Reduktion hängen zum einen von der Komplexität der Tätigkeit und zum anderen von der Lernfähigkeit des ausführenden Personals ab.

Einarbeitungseffekt nach Lang

Unter dem Einarbeitungseffekt versteht man laut *Lang*⁴⁸ Folgendes: „Die Einarbeitung ist das Überwinden des Ablaufwiderstandes auf der bestimmten Baustelle. Dieser Widerstand kommt durch die technischen und organisatorischen Bauwerksbedingungen, wie z.B. Grundrissgestaltung und Höhenentwicklung, zustande und hemmt die Ausführungen entsprechend.“

Einarbeitungseffekt nach Körner

Körner beschreibt in seiner Arbeit den Einarbeitungseffekt wie folgt: „Unter Einarbeitung wird die Verminderung des Arbeitsaufwandes bei sich wiederholenden Arbeitsvorgängen verstanden.“

4.2.2 Mögliche Messgrößen für den Einarbeitungseffekt im maschinellen Tunnelbau

Die Verwendung von Kostengrößen als Messgrößen für die Quantifizierung des Einarbeitungseffekts ist in der stationären industriellen Fertigung sehr beliebt. Dies rührt aus dem Umstand her, dass man die Kosten in der Industrie, bei welchen produktionsbedingt immer dieselben Prozesse unter den gleichen Rahmenbedingungen ablaufen, sehr gut erfassen kann. Dies ist bei einem Tunnelbauprojekt leider nicht der Fall, da es eine Fülle an unsicheren Kostenfaktoren gibt, die in der stationären Industrie nicht vorhanden sind.

So werden zum Beispiel in der stationären Industrie viele Materialien mittels Jahresverträgen bezogen, was dem Autor bei der Herstellung von Tunnelbauprojekten eher schwierig erscheint, da sonst das Risiko eines zu hohen Durchschnittseinkaufspreises eingegangen wird. Zum anderen spricht folgendes Argument gegen die Verwendung von Kosten als Messgröße. Die endgültige Kostenfeststellung kann immer erst mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung ermittelt werden. Daher ist die Verwendung von Kosten bei einer zeitnahen Analyse des Einarbeitungseffekts nicht ratsam.

⁴⁵ Vgl. [32] Stempkowski, S. 468 ff.

⁴⁶ Vgl. [34] Wachter, S. 41 ff.

⁴⁷ Vgl. [30] Schmidberger, S. 26 ff.

⁴⁸ Vgl. [20] Lang, S. 81 ff.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Baustellen ist es sinnvoll, sowohl Einsatzmengen, bezogen auf die hergestellten Einheiten, als auch hergestellte Einheiten bei gleichbleibender Einsatzmenge als Messgrößen heranzuziehen. Unter einer Einsatzmenge versteht man laut *Wachter*⁴⁹:

- Vortriebsstunden
- Maschinenstunden
- Stillstandsstunden
- Reparaturstunden
- Arbeitstage
- Arbeitswochen
- Arbeitsmonate

Die in der obigen Auflistung angeführten Messgrößen finden alle ihren Einfluss in der Vortriebsleistung. Um eine monetäre Bewertung verschiedener Leistungen durchführen zu können, kann noch immer über den Zusammenhang zwischen Vortriebsleistung und den damit verbundenen Kosten eine weiterführende Analyse durchgeführt werden.

Für die hergestellte Einheit hat man nicht so eine große Auswahl an Möglichkeiten wie bei der Einsatzmenge. Als sinnvollste Maßeinheit erscheint es dem Autor in diesem Zusammenhang, die Laufmeter aufgefahrene Tunnelstrecke zu verwenden.

Von diesem weitreichenden Fundament an Möglichkeiten der verwendbaren Messgrößenkombinationen stellt sich die Frage, in welcher Betrachtungstiefe man agieren will. Bevor man die Entscheidung über die Betrachtungstiefe fällt, muss klar sein, welche Informationen aus den Vortriebsdaten gefiltert werden sollen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu wissen, ob die Abweichungen bzw. Ausreißer der Daten gut erkennbar sein sollen oder ob eine geglättete Datenstruktur ermittelt werden soll. Diese Entscheidungen sind, wie bereits erwähnt, sehr stark davon abhängig, ob bzw. welche Informationen gefiltert werden sollen und ob diese für einen rudimentären Vortriebsdatenvergleich zwischen ähnlichen Projekten oder für eine genaue Bauablaufs- bzw. bauwirtschaftliche Analyse gedacht sind. In diesem Zusammenhang wird in den Ausführungen von *Wachter*⁵⁰ zwischen folgenden Betrachtungsebenen unterschieden:

- | | |
|-----------------|----------------|
| • Arbeitszyklus | • Dekade |
| • Hub | • Arbeitswoche |
| • Schicht | • Arbeitsmonat |

Der Einsatz einer größeren Zeitskala bei der Betrachtungsebene erscheint dem Autor aus Gründen der Vergleichmäßigung der Daten nicht sinnvoll. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit ergeben sich für die Messgrößen in Abhängigkeit der Betrachtungsebene folgende Variationsmöglichkeiten.

- | | |
|----------|---------------------|
| • h/m | • Hübe/Tag |
| • h/Hub | • Hübe/Arbeitswoche |
| • Hübe/h | • Hübe/Arbeitsmonat |

⁴⁹Vgl. [34] Wachter, S. 127 ff.

- Stillstandszeiten/m
- Stillstandszeiten/Hub
- Stillstandszeiten/Arbeitswoche
- Stillstandszeiten/Arbeitsmonat
- Arbeitszeit/m
- Arbeitszeit/Hub
- m/Arbeitswoche
- m/Arbeitsmonat

4.3 Auswahl der Messgrößen für die Erfassung des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau

Grundsätzlich ist der Einsatz aller in Kapitel 4.2.2 aufgezählten Messgrößen möglich, jedoch sollte aus Gründen des einfacheren Arbeitsablaufs bzw. der Vergleichbarkeit in den verschiedenen Projektstadien immer darauf geachtet werden, welche Maßeinheiten in der Kalkulation und Arbeitsvorbereitung verwendet wurden.

4.3.1 Anforderungen für die Auswahl der Messgröße zur Erfassung des Einarbeitungseffekts

Die Messgrößen müssen so erfasst werden können, dass dies keinen unverhältnismäßig hohen Aufwand während des laufenden Betriebs darstellt. Das bedeutet, dass man zum Beispiel ähnlich wie im Hochbau einen Bautagesbericht, so auch im Tunnelbau eine tägliche Vortriebsmeldung anlegt, in welcher unter anderem die gewünschten Messgrößen erfasst werden müssen.

Baustellenpraxis

Im Zuge der Fülle an Tätigkeiten im Baustellenalltag können sich folgende Probleme in Bezug auf die Durchführung der Aufzeichnungen von Messgrößen ergeben:

- Diskontinuierliche Aufzeichnungen
- Unleserliche Aufzeichnungen
- Unrichtiger Informationstransport innerhalb der Vortriebsmannschaft
- Falsche Begründung der Vortriebsunterbrechung
- Verspätete Weitergabe der Vortriebsinformationen an die übergeordnete Stelle

Aus der Sicht des Autors ist für die korrekte Ermittlung des Einarbeitungseffekts und die weitere Verwendbarkeit der Daten eine konsequente und zeitnahe Ermittlung der Vortriebsdaten durch eine Person des unproduktiven Baustellenpersonals, wie zum Beispiel eines Abrechnungstechnikers, notwendig.

4.3.2 Problem der Schwankungsbreiten von Messgrößen

In diesem Abschnitt will der Autor, wie auch Wachter⁵⁰ in seiner Arbeit, explizit darauf hinweisen, dass die Messgrößen einen erheblichen Einfluss auf die Schwankungsbreiten sowie auf die relativen Abweichungen haben. Dies soll anhand der beiden folgenden Abb. 4.4 und 4.5 veranschaulicht werden. In beiden Abbildungen sind exakt dieselben beliebig gewählten Vortriebsdaten in Form von Vortriebsleistung bzw. Tagesleistung, den Arbeitsstunden pro Tag und den daraus errechenbaren Aufwandswerten pro Laufmeter Tunnelstrecke angeführt. In

⁵⁰Vgl. [34] Wachter, S. 129 ff.

weiterer Folge werden sowohl in Abb. 4.4 und in Abb. 4.5 die relativen Abweichungen der Messgröße Tagesleistung als auch des Aufwandswerts berechnet. In Abb. 4.4 ist die Basis für die Berechnung der relativen Abweichung der Minimalwert aller fünf Vortriebsdaten und in Abb. 4.5 ist die Basis der relativen Abweichung der Datensatz des Vortags. Man kann nun anhand dieser Auflistungen erkennen, dass es außerordentlich wichtig ist, sich im Klaren zu sein, worauf die Messgrößen bezogen werden bzw. ob man Leistungswerte oder Aufwandswerte vergleicht. Der Umstand der großen Abweichungen ist aus der relativ einfachen Beziehung zwischen Aufwandswert und Leistungswerten erklärt, denn der Leistungswert ist nichts anderes als der Kehrwert des Aufwandswertes und vice versa.

Für die Verwendung der Messgrößen rät der Autor daher, eine dauerhaft gleich bleibende Wahl zu treffen, um etwaigen Verwechslungen vorbeugen zu können, welche zu wirtschaftlich unangenehmen Entwicklungen des Baustellenverlaufs führen könnten.

| | Vortriebsleistung [m/AT] VL | Arbeitsstunden [h] AH | Tagesleistung [m/AT] TL | Aufwandswerte [h/m] AW | Relative Abweichung Messgröße Tagesleistung vom geringsten Wert [%] $=((TL-\min\{TL\})/\min\{TL\})*100$ | Relative Abweichung des Aufwands vom geringsten Wert [%] $=((AW-\min\{AW\})/\min\{AW\})*100$ |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|--|
| Tag 1 | 16,00 m/h | 24,00 h | 16,00 m/h | 1,50 h/m | 87,50 % | 0,00 % |
| Tag 2 | 14,00 m/h | 24,00 h | 14,00 m/h | 1,71 h/m | 600,00 % | 14,29 % |
| Tag 3 | 6,00 m/h | 24,00 h | 6,00 m/h | 4,00 h/m | 200,00 % | 166,67 % |
| Tag 4 | 0,00 m/h | 24,00 h | 2,00 m/h | 12,00 h/m | 0,00 % | 700,00 % |
| Tag 5 | 8,00 m/h | 24,00 h | 8,00 m/h | 3,00 h/m | 300,00 % | 100,00 % |

Abb. 4.4: Darstellung relative Abweichung der Messgrößen bezogen auf den Minimalwert

| | Vortriebsleistung [m/AT] VL | Arbeitsstunden [h] AH | Tagesleistung [m/AT] TL | Aufwandswerte [h/m] AW | Relative Abweichung Messgröße Tagesleistung vom Vortag [%] $=((TL-T_{i-1})/T_{i-1})*100$ | Relative Abweichung des Aufwands vom Vortag [%] $=((AW-AW_{i-1})/AW_{i-1})*100$ |
|-------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|--|---|
| Tag 1 | 16,00 m/h | 24,00 h | 16,00 m/h | 1,50 h/m | / | / |
| Tag 2 | 14,00 m/h | 24,00 h | 14,00 m/h | 1,71 h/m | -12,50 % | 14,29 % |
| Tag 3 | 6,00 m/h | 24,00 h | 6,00 m/h | 4,00 h/m | -57,14 % | 133,33 % |
| Tag 4 | 0,00 m/h | 24,00 h | 2,00 m/h | 12,00 h/m | -66,67 % | 200,00 % |
| Tag 5 | 8,00 m/h | 24,00 h | 8,00 m/h | 3,00 h/m | 300,00 % | -75,00 % |

Abb. 4.5: Darstellung relative Abweichung der Messgrößen bezogen auf den Vortag

Zwischenergebnis – Messgrößen

In diesem Abschnitt wird ein Zwischenfazit über die Möglichkeiten und die Auswahl der Messgröße gegeben. Wie in der Einleitung von Abschnitt 4.2 zu lesen ist, muss man sich bewusst sein, dass der Produktionsprozess in der Bauwirtschaft, genauer im Tunnelbau, stark von dem der stationären Industrie abweicht. Ein sich kontinuierlich änderndes Arbeitsumfeld ist nur ein Grund, der eine deutliche Unterscheidung von der stationären Industrie darstellt. Trotz der einigermaßen gleichen Definitionen des Einarbeitungseffekts in der Literatur, weisen einige der Festlegungen auf die bereits erwähnte Diversität des Tunnelbaugeschehens hin und die damit oftmals verbundene Komplexität. In Abschnitt 4.2.2 werden einige der möglichen Messgrößen dargestellt, die zur Ermittlung des Einarbeitungseffekts herangezogen werden können. Im weiteren Text wird auf das Problem der exakten Datenerfassung im Baustellenalltag sowie die Schwankungsbreite der Messgrößen hingewiesen. Anhand der Abb. 4.4 und der Abb. 4.5 ist zu erkennen, dass die richtige Auswahl der Messgrößen eine äußerst wichtige Entscheidung für die Datenerfassung und Vergleichbarkeit der Datensätze darstellt.

Aus der Sicht des Autors dieser Arbeit muss man sich immer im Klaren sein, welche Auswertungen während und nach Abschluss der Bauarbeiten durchgeführt werden sollen. Um die Aussagekraft der Datenerfassung zu optimieren, empfiehlt der Autor eine Erfassung, die die vorhandene Volatilität der Daten nicht in den Vordergrund rückt und somit in weiterer Folge die

Darstellung einer geglätteten Einarbeitungskurve ermöglicht. In diesem Zusammenhang schlägt der Autor eine Erfassung des Aufwands für die Vortriebsarbeiten in einer sinnvollen Zeitskalierung vor. Diese ergibt sich für den Verfasser ansteigend ab einer Größe von „Stunden/Hub“.

4.4 Einflussgrößen des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau

In diesem Abschnitt der Arbeit beschreibt der Autor ohne Anspruch auf Vollständigkeit eine möglichst große Anzahl an Einflussfaktoren, welche sich negativ auf den Einarbeitungseffekt und damit auf die Vortriebsleistungen auswirken können. Diese Einflussfaktoren können die unterschiedlichsten Gründe haben und treten teilweise einzeln oder auch in Kombination auf und wirken sich auf den Verlauf der Vortriebsarbeiten aus.

Beschreibung der diversen Einflussgrößen auf den Einarbeitungseffekt im maschinellen Tunnelbau

Die folgende Auflistung soll einen ersten Überblick über die Einflussgrößen des Einarbeitungseffekts geben. Diese werden in der Folge genauer beschrieben. Eine exakte und vollständige Ermittlung der folgenden Einflussgrößen ist aufgrund der nur mit extrem hohem personellen und zeitlichen Aufwand verbundenen Erfassungen möglich und aufgrund der großen Schwankungen aus monetärer Sicht nicht empfehlenswert.

1. Örtliche geologische Gegebenheiten
2. Komplexität der Arbeit
3. Eignung des Maschinenkonzepts für den anstehenden Untergrund
4. Eignung und Kompetenz der Arbeitskräfte
5. Qualität und Intensität der Arbeitsvorbereitung
6. Art und Höhe der Entlohnung
7. Dauer der Zusammenarbeit der Vortriebsmannschaft
8. Psychologischer Faktor im maschinellen Tunnelbau
9. Optimale Partiestärke

Örtliche geologische Gegebenheiten

Durch eine große Variabilität der Eigenschaften des anstehenden Gebirges kann bzw. müssen sich die Vortriebsmannschaften bei vielen Tunnelbauprojekten auf sich rasch ändernde Untergrundverhältnisse einstellen. Das führt bei jeder Änderung des Untergrundes zu einer neuen Phase der Einarbeitung und wirkt sich nachteilig auf die Vortriebsleistungen aus.

Komplexität der Arbeit

Die Komplexität der Arbeit hat einen wesentlichen Einfluss auf den Einarbeitungseffekt. Das aufwendigere Prozedere der Einarbeitung spiegelt sich laut *Stempkowski* in der Dauer bzw. der Anzahl der Wiederholungen, die bis zum Erreichen des optimalen Leistungswerts notwendig sind, wider.

In der einschlägigen Literatur⁵¹ wird beschrieben, dass man zum Beispiel bei Arbeiten mit hoher

⁵¹Vgl. [32] Stempkowski, S. 470 ff.

Komplexität einen Einarbeitungseffekt von bis zu 200 Prozent erreichen kann. Das bedeutet, dass die Differenz zwischen dem Aufwandswert der ersten Wiederholung und dem Aufwandswert der Wiederholung, bei der die optimale Dauer erreicht wird, 200 Prozent beträgt. Zusammenfassend kann man sagen, dass es möglich ist, die Arbeit in der Hälfte der zu Beginn der Arbeiten benötigten Zeit zu erledigen. Im Bezug auf Tunnelbaustellen gibt Stempkowski⁵¹ an, dass es bis zu 50 Takte, sprich 50 Hubvorgänge dauern kann, um die optimale Zeit pro Hub zu erreichen. Bei einfacheren Tätigkeiten, wie zum Beispiel Mauer- oder Betonierarbeiten im Hochbau, kann die optimale Arbeitszeit pro Einheit bereits nach dem zweiten oder dritten Takt erreicht sein. Der Einarbeitungseffekt an sich verändert sich im Verlauf der Zeit und im Verlauf von ablaufbedingten Störungen, welche aus einer höheren Komplexität des Vortriebs resultieren können. Der zuvor beschriebene Umstand ist in der von *Stempkowski* veröffentlichten Abb. 4.6 zu sehen.

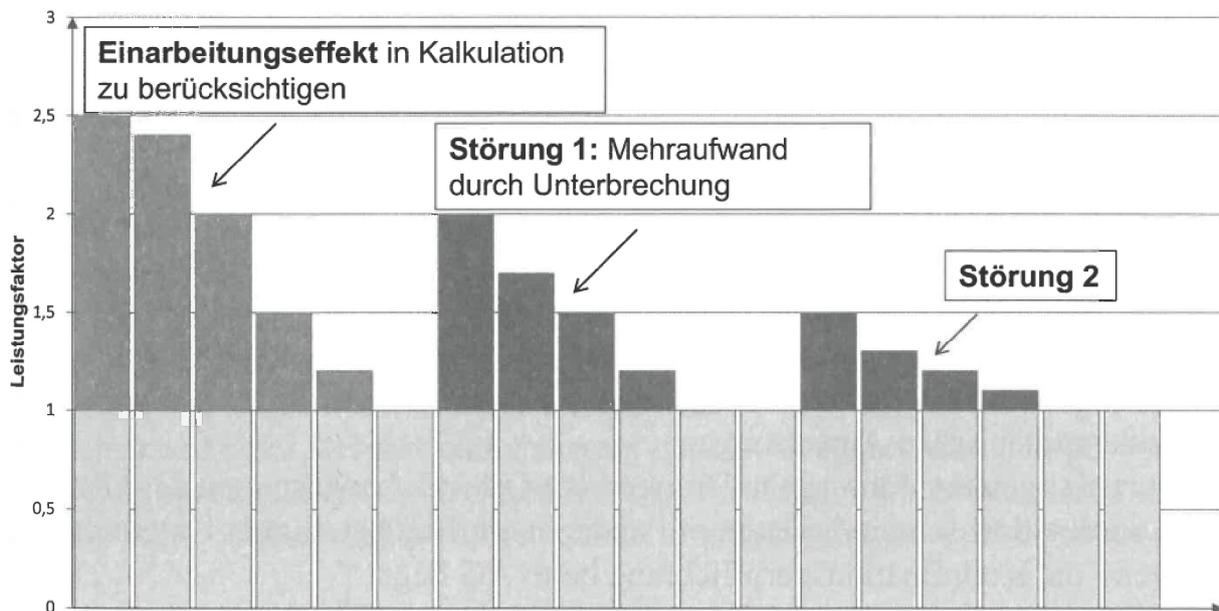


Abb. 4.6: Einarbeitungseffekt im Verlauf des Projekts (Quelle: Stempkowski [32, S. 470])

Eignung des Maschinenkonzepts für den anstehenden Untergrund

Die Eignung der TVM für das anstehende Gebirge hat einen wesentlichen Einfluss auf den EAE. Daher ist es wichtig, die geologischen Gegebenheiten genau zu erkunden und zu dokumentieren. Diese Erkenntnisse müssen in weiterer Folge bei der Dimensionierung bzw. Konzeption des Maschinenkonzepts einfließen, um eventuelle Störungszonen im Gebirge ohne größere Vortriebsunterbrechungen durchhören zu können.

Eignung und Kompetenz der Arbeitskräfte

Durch eine dementsprechende Erfahrung der Mitglieder der Vortriebsmannschaften kann eine wesentlich kürzere Einarbeitungsdauer als bei sehr jungen Vortriebsmannschaften erreicht werden, da sich die Mitarbeiter durch ihre lange bergmännische Tätigkeit schneller an geänderte Umstände anpassen können. Dies kann in weiterer Folge zu einem zeitlich effizienteren Vortrieb führen.

Qualität und Intensität der Arbeitsvorbereitung

Durch eine dementsprechend genaue Arbeitsvorbereitung kann in vielen Fällen kostbare Zeit eingespart werden. Dadurch ist es unter anderem auch möglich, die Dauer für die Einarbeitung zu reduzieren. Eine genaue und qualitativ hochwertige Arbeitsvorbereitung muss für jeden Produktionsschritt im Laufe der Errichtung eines Tunnelbauwerks einen genauen Produktionsab-

lauf vorsehen. Des Weiteren müssen die möglichen Probleme und Lösungsvorschläge Teil einer qualitativ ansprechenden Arbeitsvorbereitung sein.

Art und Höhe der Entlohnung

Die Art bzw. die Höhe der Entlohnung kann einen motivierenden Einfluss auf die Vortriebsmannschaften darstellen. Bei Zahlung von Leistungsprämien kann zudem die Bereitschaft für eine raschere Lösung von Vortriebsproblemen ungemein höher sein. Dadurch ist es möglich, die Einarbeitungsdauer nicht nur zu Beginn des Projekts, sondern auch nach jeder Vortriebsunterbrechung auf ein Minimum zu reduzieren. Die negative Seite von Prämienzahlungen in Bezug auf die Einarbeitung erscheint dem Autor im Bereich der Infrastruktur zu liegen. Aus der einschlägigen Literatur ist zu erkennen, dass bei hohen Vortriebsleistungen oft der Nachbau der Infrastruktur, wie zum Beispiel von Lüftungssystemen, vernachlässigt wird, da sich die Prämie nur an der Länge des aufgefahrenen Tunnelabschnitts orientiert.

Dauer der Zusammenarbeit der Vortriebsmannschaft

Die Dauer der Einarbeitung und damit der Einfluss auf den Einarbeitungseffekt hängt sehr stark mit der Dauer der Zusammenarbeit zwischen den Mineuren zusammen. Die Kenntnis der gewohnten Arbeitsweise und der Genauigkeit der Mineure erlaubt es dem Drittführer schon im Vorhinein, sich auf die wesentlichen Punkte, an denen es zu Problemen kommen könnte, zu konzentrieren.

Psychologischer Faktor im maschinellen Tunnelbau

Der Einfluss auf den Einarbeitungseffekt im maschinellen Tunnelbau kann alleine durch den Umstand des Arbeitsplatzes unter Tage gegeben sein. Die ständige Arbeit unter künstlicher Beleuchtung und der Gefahr eines geologisch bedingten Verbruchs ist für den ein oder anderen Mineur nicht konzentrations- bzw. leistungsfördernd. Dieser psychologische Einfluss auf den Einarbeitungseffekt wirkt sich wahrscheinlich bei Berufsanfängern wesentlich höher aus, als dies bei erfahrenen, lang gedienten Mineuren der Fall ist.

Optimale Partiestärke

Die Stärke der Vortriebsmannschaft wirkt sich im maschinellen Tunnelbau bei Einhaltung der Normalbesetzung sehr gering auf den Einarbeitungseffekt aus, da jeder Mitarbeiter an der TVM seinen fest zugewiesenen Arbeitsplatz hat und dadurch eine Forcierung durch eine erhöhte Mitarbeiterzahl keine namhaften Auswirkungen auf den Einarbeitungseffekt haben wird. Dieser Einfluss der Mitarbeiteranzahl schlägt im zyklischen Tunnelbau viel mehr zu Tage als im maschinellen Tunnelbau. In der Arbeit von Goger⁵² ist ersichtlich, dass zwischen den verschiedenen Varianten der Mannschaftsstärken, in Abhängigkeit der Vortriebsklassen, mehr als 30 Prozent Differenz in der Vortriebsleistung liegen können.

⁵²Vgl. [12] Goger, S. 63 ff.

4.5 Möglichkeiten der Berechnung des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau

In den folgenden Absätzen werden vom Verfasser dieser Arbeit ausgewählte Ansätze und Herangehensweisen für die Berechnung des Einarbeitungseffekts von ausgewählten Autoren erläutert. Dabei betont der Autor an dieser Stelle, dass die folgenden Absätze keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben können, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde.

4.5.1 Einarbeitungseffekt nach Drees/Spranz

*Drees/Spranz*⁵³ beschreiben, dass der Einarbeitungseffekt in der Arbeitsvorbereitung bzw. der Bauablaufsplanung nur innerhalb der ersten drei Wiederholungen berücksichtigt wird. Das bedeutet, dass der Leistungswert des Normalfalls für die ersten drei Wiederholungen der Tätigkeit mit prozentuellen Erhöhungen beaufschlagt wird. Hierbei unterscheiden *Drees/Spranz*⁵³ bei der Erhöhung der Aufschläge in schwierige und einfache Arbeiten. Somit ergeben sich laut der zuvor erwähnten Quelle für einfachen Arbeiten folgende Zuschläge:

- 40-50% für die 1. Ausführung
- 25% für die 2. Ausführung
- 10% für die 3. Ausführung

Im Vergleich dazu werden laut dem bereits in diesem Absatz genannten Autor⁵³ bei der Ausführung von schwierigen Arbeiten folgende Zuschläge für die ersten drei Wiederholungen der Tätigkeiten angesetzt:

- 100% für die 1. Ausführung
- 50% für die 2. Ausführung
- 25% für die 3. Ausführung

4.5.2 Einarbeitungseffekt nach Körner

*Körner*⁵⁴ versucht in seiner Veröffentlichung von einem rein theoretischen Ausgangspunkt ein einfaches Abschätzverfahren zu entwickeln, das in der Praxis Anwendung findet und mit dem der Einarbeitungseffekt näherungsweise bestimmt werden kann. *Körner* bedient sich für die Herleitung seiner Formel zur Berücksichtigung des Einarbeitungseffekts der Ergebnisse mehrerer Fachautoren, die in der Arbeit von *Wachter*⁵⁵ zu finden sind. Für die Anwendung der Gleichung 4.1 sind laut dem zuvor genannten Autor⁵⁵ folgende Annahmen zugrunde zu legen:

- Es muss die Möglichkeit gegeben sein, den Aufwand für jeden Arbeitsprozess zu vermindern.
- Die Anzahl der Veränderungen ist beschränkt und der Aufwand kann nicht null werden.
- Der Arbeitskraft muss es möglich sein, bei jeder Wiederholung des Arbeitsvorganges einen Anteil des Arbeitsablaufs zu lernen.

⁵³Vgl. [9] Drees und Spranz, S. 77 ff.

⁵⁴Vgl. [19] Körner, S. 225 ff.

⁵⁵Vgl. [34] Wachter, S. 119 ff.

$$A(n) = \lambda_j + (1 - \lambda_j) \cdot e^{-cn} \quad (4.1)$$

Legende:

- $A(n)$ Anteil vom Ausgangswert A_0
- n Anzahl der Wiederholungen
- λ_j Mögliche Reduzierbarkeit des Vorganges
- c Lernfähigkeit der Kolonne

Beschreibung der Formel

Die Terme λ und c beeinflussen essentiell den Verlauf der Kurven der Einarbeitung. Der Wert λ ist abhängig vom Verhältnis der Maschinenarbeit zur manuellen Arbeit und vom Grad bzw. der Tiefe der Organisation und Arbeitsvorbereitung. Des Weiteren hängt der Parameter λ von mehreren anderen Prozessen ab. Dazu zählt unter anderem der Einfluss der Witterung. Der Parameter c stellt die Lernfähigkeit der einzelnen Mitarbeiter als Gruppe dar und wird hauptsächlich durch das Verhalten und die Eigenschaften der in der Gruppe arbeitenden Menschen beeinflusst. In Tabelle 4.1 werden Bereichsgrenzen angegeben, innerhalb derer sich die Parameter λ und c im Normalfall bewegen.

Tab. 4.1: Größenordnung für die Parameter λ und c

| | klein | hoch |
|-----------|-------|------|
| λ | 0,40 | 0,90 |
| c | 0,01 | 0,10 |

Das Verfahren von *Körner* wurde bereits in der stationären Fertigteilindustrie erprobt und die Anwendung der Formel beschränkt sich auf die Ermittlung der Parameter λ und c .

4.5.3 Einarbeitungseffekt nach Platz

Platz hat sich in seiner Arbeit⁵⁶ mit dem Einarbeitungseffekt von konventionellen Tunnelvortrieben befasst. Er beschreibt, dass aus den Daten für ungestörte Bereiche eine hinreichend genaue Produktionsfunktion ermittelt werden kann und damit unter Verwendung von Regressionsanalysen und graphischer Darstellung der verbleibenden Restabweichung der eigentliche Einfluss der Einarbeitung quantifiziert werden kann. Laut *Platz* ist es daher bei Einzelbeobachtungen nur sehr schwer möglich, den instationären Anteil des Arbeitsaufwands zu beobachten und quantifizieren zu können. *Platz* verwendet in ähnlicher Weise wie *Körner*⁵⁷ eine Lernkurve, die eine Abhängigkeit von der Anzahl der durchgeführten Wiederholungen aufweist. Diese Formel, welche unter 4.2 in allgemeiner Form dargestellt ist, zeigt, dass sich der Verlauf der Einarbeitung sehr gut durch eine Exponentialfunktion beschreiben lässt.

$$A(n) = \tau + (1 - \tau) \cdot e^{-cn} \quad (4.2)$$

⁵⁶Vgl. [29] Platz, S. 131 ff.

⁵⁷Vgl. [19] Körner, S. 225 ff.

Platz verfolgt noch eine andere Herangehensweise, um den Einarbeitungseffekt darzustellen. Diese ist in der Gleichung 4.3 ersichtlich. Der Einarbeitungsfaktor ist hierbei von den n Wiederholungen des Arbeitsschrittes abhängig.

$$1 + \beta_E = 1,0 + (\tau - 1) \cdot e^{-cn} \quad (4.3)$$

Als Alternative zur Formel 4.3 kann der Einarbeitungsfaktor auch in Abhängigkeit von der Station der Ortsbrust angegeben werden. Diese Formulierung ist der Gleichung 4.4 zu entnehmen.

$$1 + \beta_E = 1,0 + (\tau - 1) \cdot e^{-cl} \quad (4.4)$$

Legende:

- $\tau = A_1/A_0$ ist der Quotient zwischen dem Anfangswert A_1 und dem Endwert A_0 der Einarbeitung.
- c Konstante, die die Lernfähigkeit beschreibt
- n Anzahl der Wiederholungen
- β_E Einarbeitungsfaktor
- l Station der Ortsbrust

Beschreibung der Formeln

In der Gleichung 4.2 wird die Variable τ verwendet. Diese stellt, wie bereits in der Legende beschrieben, den Quotienten zwischen dem Anfangswert A_1 und dem Endwert A_0 der Einarbeitung dar. Der Wert hängt maßgeblich von der Schwierigkeit der Aufgabe ab und befindet sich laut Platz für den konventionellen Vortrieb in einem Schwankungsbereich zwischen $1,5 < \tau < 2,5$. Die Konstante c beschreibt die Lernfähigkeit des Arbeitssystems und damit des bedienenden Personals. In der Arbeit⁵⁸ beschreibt Platz, dass die Konstante c für maschinelle Arbeiten eine viel höhere Veränderungsrate aufweisen kann als für vorrangig manuelle Arbeiten. Dies kann auf weitgehend automatisierte Abläufe bei maschinellen Arbeiten zurückgeführt werden. Mit der Gleichung 4.3 kann der Einarbeitungsfaktor β_E in Abhängigkeit von der Station der Ortsbrust im Vergleich zum Endwert, sprich nach abgeschlossener Einarbeitung, angegeben werden. Der Endwert des Einarbeitungsfaktors hat den Wert eins. Dadurch ähnelt der graphische Verlauf von der Gleichung 4.3 bzw. 4.4 den weitläufig bekannten Diagrammen, die den Einarbeitungseffekt behandeln. Zur besseren Verständlichkeit des vorlaufenden Absatzes werden in Abb. 4.7 Einarbeitungsverläufe gegenübergestellt, bei denen sich der Wert c um das Doppelte unterscheidet. Das bedeutet, dass die Kurve mit einem hohen Wert c eine sehr große Lernfähigkeit aufweist und jene Kurve mit niedrigem Wert von c eine geringe Lernfähigkeit hat.

⁵⁸Vgl. [29] Platz, S. 133 ff.

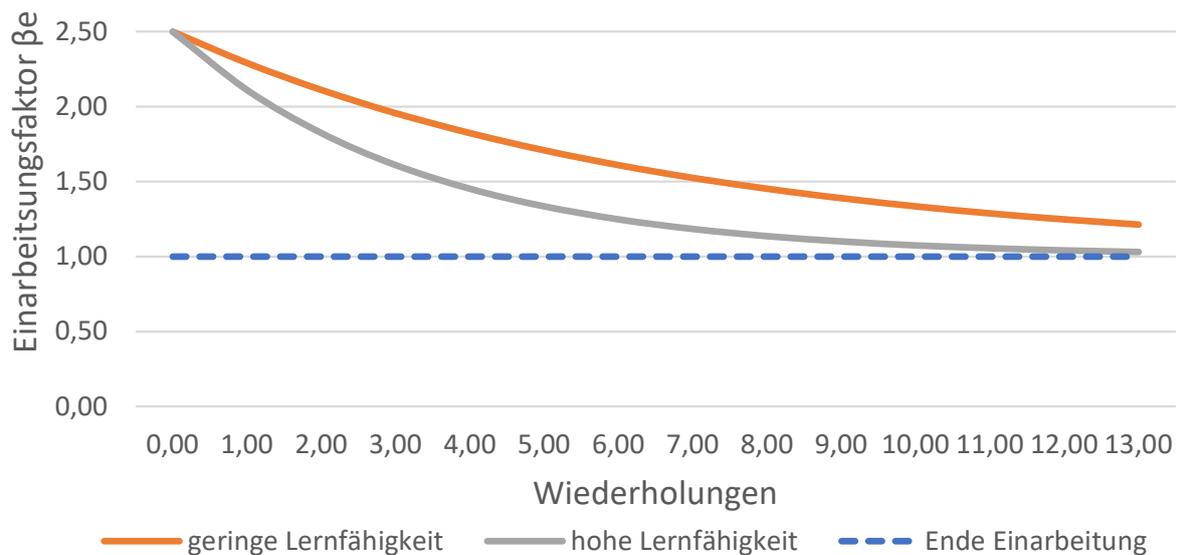


Abb. 4.7: Darstellung des Einflusses der Konstante c auf den Lernverlauf

4.5.4 Einarbeitungseffekt nach Lang

Von *Lang* wurden laut *Wachter*⁵⁹ im Zuge seiner Forschungstätigkeit⁶⁰ Untersuchungen zum Einarbeitungseffekt durchgeführt. Seine Forschungstätigkeiten⁶⁰ beziehen sich in erster Linie auf den Einarbeitungseffekt bei Schalungsarbeiten. Die wissenschaftlichen Arbeiten von *Lang* zeigen, dass die Verteil-, Warte- und Erholzeiten wesentlich größere Einarbeitungsgewinne verursachen, als dies bei der reinen Arbeitstätigkeit der Fall ist. Dies kann man unter anderem darauf zurückführen, dass der Mitarbeiter bei gleichbleibender Tätigkeit die Arbeiten so effizient wie möglich durchführt und dadurch keine unnötige physische Beanspruchung erleidet. In weiterer Folge benötigt der Mitarbeiter nicht so viele Arbeitspausen, um die gleiche Menge an Arbeit zu erledigen. Die zusammenfassende Aussage der Publikationen ist, dass die Einarbeitung laut *Lang* nach der dritten Wiederholung der Tätigkeit abgeschlossen ist. Auf die zuvor genannte Publikation⁶⁰ baut *Lang* mit einem neuen Vorschlag für die Berücksichtigung des Einarbeitungseffekts auf. In seinen neuen Ausarbeitungen legt *Lang* den Fokus auf den gestörten Bauablauf und die damit verbundene Behinderung der Einarbeitung. Um den Sprung in einem Leistungsdiagramm, welcher für eine Störung charakteristisch ist, quantifizieren zu können, ist es essentiell, für alle nötigen Arbeiten der Baustelle entsprechende Kennzahlen zu ermitteln. Ein derartiges System von spezifischen Kennzahlen hat *Lang* bereits für Betonarbeiten, Mauerarbeiten und Schalarbeiten zusammengestellt.

Dieses System berücksichtigt folgende Besonderheiten:

- Schwierigkeit der Störungen
- Zusammensetzung und Lernfähigkeit der Arbeitskolonne
- Zeitpunkt und Länge der Störung

Um die vorlaufend genannten Besonderheiten berücksichtigen zu können, wurde eine Aufwandsfunktion entwickelt. Diese ist in Gleichung 4.5 zu sehen und dient zur Berechnung des Aufwands für den i -ten Einsatz.

⁵⁹Vgl. [34] Wachter, S. 121 ff.

⁶⁰Vgl. [20] Lang, S. 81 ff.

$$W_i = W_o \cdot f_L \cdot ((f_{E_i} - 1) \cdot f_{St} + 1) \quad (4.5)$$

Legende:

- W_i Aufwandswert des i-ten Einsatzes
- W_o Grundwert der Arbeitszeit
- f_L Einfluss der Länge der Störung i
- f_{St} Lernfähigkeit der Kolonne
- f_{E_i} Einarbeitung des i-ten Einsatzes unter Berücksichtigung des Schwierigkeitsgrades

Beschreibung der Formel

Der Wert W_o ist ein Basiswert der Arbeitszeit, der auf den Werten der Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau (ARH) oder sonstigen einschlägigen Tabellen aufbaut. In einem Teil der einschlägigen Fachliteratur⁶¹ wird festgehalten, dass die Arbeitszeit-Richtwerte keine direkten Vorgabewerte darstellen, sondern nur als Grundlage für die Ermittlung von betrieblichen Vorgabewerten dienen. Die Richtwerte der Arbeitszeit sind in Stunden je Einheit angegeben und stellen somit einen Aufwandswert dar. Der Wert f_L berücksichtigt den Einfluss der Störung in Abhängigkeit zu ihrer Länge. Diese Variable kann zum Beispiel bei 100 % Einfluss-Störung den Wert 1,0 annehmen. Der Wert f_{St} beschreibt die Lernfähigkeit der Kolonne und ist damit sehr stark von der Konfiguration der jeweiligen Kolonne und deren Einsatzbereitschaft abhängig. Die Variable f_{St} kann einen Wert zwischen 0,81 und 1,22 annehmen. Dabei bedeutet ein Wert über eins eine negative Lernfähigkeit der Kolonne und ein Wert unter eins eine positive Lernfähigkeit. Der Wert f_{E_i} ist aus diversen Tabellen zu ermitteln und berücksichtigt, dass man von Wiederholung zu Wiederholung einer gleichbleibenden Arbeit die Produktivität steigern kann. In den Abb. 4.8 und Abb. 4.9 sind diese Abhängigkeiten von der Anzahl der Durchführungen beispielhaft für Seiten- und Fugenschalungen bzw. für Schachtschalungen ersichtlich.

| Kategorie | Anzahl der Einsätze | | | | |
|-----------|---------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Kat. 1 | 1,39 | 1,18 | 1,09 | 1,03 | 1,00 |
| Kat. 2 | 1,55 | 1,30 | 1,20 | 1,13 | 1,08 |

Abb. 4.8: Darstellung der Faktoren für den Faktor f_{E_i} für Seiten- und Fugenschalungen (Quelle: Lang [20, S. 87])

| Kategorie | Anzahl der Einsätze | | | | | |
|--------------|---------------------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Kat. 1 und 2 | 1,52 | 1,27 | 1,15 | 1,09 | 1,05 | 1,00 |

Abb. 4.9: Darstellung der Faktoren für den Faktor f_{E_i} für Schachtschalungen (Quelle: Lang [20, S. 87])

⁶¹Vgl. [35] Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. Industriegewerkschaft Bauen – Agrar – Umwelt, S. 3

Mehraufwand der Einarbeitung bzw. Gesamtaufwand der Leistungserbringung

In vielen wirtschaftlichen Belangen bzw. Untersuchungen ist nur der Mehraufwand, der sich durch die Einarbeitung ergibt, interessant. In diesem Fall sollte die Gleichung 4.6 herangezogen werden.

$$W_i = W_o \cdot A \cdot f_L \cdot \sum_1^n \cdot ((f_{Ei} - 1) \cdot f_{St}) \tag{4.6}$$

Aus Gründen der Vollständigkeit wird mit der Gleichung 4.7 die Formel für die Berechnung des Gesamtaufwands angegeben.

$$W_i = W_o \cdot A \cdot f_L \cdot \sum_1^n \cdot ((f_{Ei} - 1) \cdot f_{St}) + (m - n) \cdot W_o \cdot A \tag{4.7}$$

Legende:

- W Gesamtaufwand der Leistungserbringung
- W_E Mehraufwand der Einarbeitung
- n Anzahl der Ausführungen mit Einarbeitung
- m Gesamtzahl der Ausführungen
- A Fläche eines Abschnittes

Gegenüberstellung - Möglichkeiten der Berechnung des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau

In der folgenden Tab.4.2 wird ein Vergleich und eine Bewertung hinsichtlich des Aufwandes und des Mehrwerts zur Berechnung des Einarbeitungseffekts durchgeführt. In horizontaler Richtung der Tabelle reihen sich die Begriffe Verfahrensname, Aufwand der Berechnung, Nutzen und Genauigkeit aneinander. Die Bewertung der Verfahren wird mit den folgenden Zeichen durchgeführt:

- „+“ für einen geringen Aufwand, hohen Nutzen und hohe Genauigkeit
- „≈“ für einen durchschnittlichen Aufwand, Nutzen und eine durchschnittliche Genauigkeit
- „-“ für einen hohen Aufwand, geringen Nutzen und eine geringe Genauigkeit

Tab. 4.2: Berechnungsmöglichkeiten des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau

| Verfahren nach | Aufwand der Berechnung | Nutzen | Genauigkeit |
|----------------|------------------------|--------|-------------|
| Drees/Spranz | + | - | - |
| Körner | + | ≈ | ≈ |
| Platz | + | + | ≈ |
| Lang | + | - | ≈ |

Erläuterung zur Gegenüberstellung der Berechnungsmöglichkeiten des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau

Das erste Verfahren in Tab. 4.2 ist die Methode von Drees/Spranz. Hinsichtlich der Berechnung ist dieses Verfahren relativ einfach zu handhaben, da bei dieser Methodik die Berücksichtigung der Einarbeitung nur innerhalb der ersten drei Wiederholungen über eine prozentuelle Minderung des Aufwandswerts erfolgt. Hinsichtlich des Nutzens und der Genauigkeit erhält dieses Verfahren eine negative Bewertung, denn der Nutzen einer pauschalen Aussage ist sehr gering. Des Weiteren ist der Verfasser der Meinung, dass sich durch die Genauigkeit einer fixen Abnahme des Aufwandswerts innerhalb der ersten drei Wiederholungen keine realitätsnahe Aussage tätigen lässt. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass für schwierige Arbeiten die prozentuellen Aufwände der ersten Wiederholung für einfache Arbeiten pauschal mit dem Faktor zwei multipliziert werden.

Bei der zweiten Methode zur Berechnung des Einarbeitungseffekts handelt es sich um das Verfahren nach Körner. Der Aufwand für die Berechnung ist verhältnismäßig klein, da nur eine geringe Anzahl an Parametern zu bestimmen ist. Dies sind wie in Kapitel 4.5.2 zu sehen die Parameter λ_j und c . λ_j stellt die mögliche Reduzierbarkeit des Vorgangs und c die Lernfähigkeit der Kolonne dar. Der Nutzen und die Genauigkeit sind nur mittelmäßig bewertet, da der Wert λ unter anderem vom Verhältnis der Maschinenarbeit zur manuellen Arbeit und der Parameter c von der Lernfähigkeit der einzelnen Mitarbeiter abhängt. Aus der Sicht des Verfassers dieser Arbeit ist die Bestimmung dieser beiden Werte sehr schwierig, da sowohl die Lernfähigkeit als auch das Verhältnis der Arbeitsaufteilung zwischen maschineller und manueller Arbeit stark schwankt.

Im dritten Verfahren zur Berechnung des Einarbeitungseffekts handelt es sich um die Methode nach Platz. Hierbei wurde der Aufwand zur Berechnung positiv bewertet, da man zwei Parameter bestimmen muss, um ein Ergebnis aus der Formel ziehen zu können. Zum einen ist die Kennzahl τ zu ermitteln. Diese stellt den Quotienten zwischen dem Anfangswert A_1 und dem Endwert A_0 der Einarbeitung dar. Der zweite Faktor, der zu bestimmen ist, stellt die Lernfähigkeit c dar. Weiterführend ist anzumerken, dass man die Berechnung des Einarbeitungsfaktors, wie in Abschnitt 4.5.3 beschrieben, entweder bezogen auf die Anzahl der Wiederholungen oder bezogen auf die Station der Ortsbrust durchführen kann. An dieser Stelle ergibt sich durch die zuvor erklärte Variabilität für den Verfasser ein positiver Nutzen der Formel. Hinsichtlich der Genauigkeit wurde das Berechnungsverfahren von Platz nur mit einem Durchschnitt bewertet, da der Faktor c in den Varianten der Formel enthalten ist. Dieser Parameter beschreibt die Lernfähigkeit, die aus der Sicht des Verfassers sehr schwer messbar gemacht werden kann.

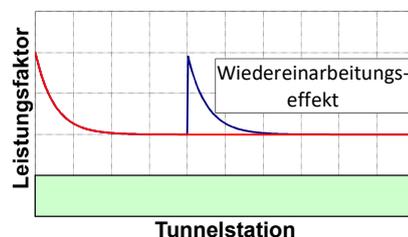
Das letzte Verfahren, das in Tab. 4.2 behandelt wird, ist die Berechnungsmethodik nach Lang. Der mit der Berechnung dieser Formel verbundene rechentechnische Aufwand wurde durchschnittlich bewertet, da die Bestimmung der benötigten Parameter aus der Sicht des Verfassers einen durchschnittlichen Aufwand darstellt. Diese drei Parameter sind der Grundwert der Arbeitszeit W_o , der Einfluss der Länge der Störung $i f_L$, die Lernfähigkeit der Kolonne f_{St} und die Einarbeitung des i -ten Einsatzes unter Berücksichtigung des Schwierigkeitsgrades f_{St} . Ein Problem stellt in diesem Zusammenhang jedoch das Fehlen der entsprechenden Kennzahlen für den Tunnelbau dar, die zur Auswertung des Formalismus notwendig sind. Derzeit sind diese Kennzahlen nur für Betonarbeiten, Mauerarbeiten und Schalarbeiten vorhanden. Aus diesem Grund wurde der Nutzen für den Tunnelbau negativ bewertet. Die Genauigkeit des Formalismus nach Lang wurde ähnlich der Formel von Platz mit einem Durchschnitt bewertet, da der Verfasser der Meinung ist, dass die Lernfähigkeit messtechnisch sehr schwierig erfasst werden kann bzw. die Erfassung einen sehr hohen Aufwand nach sich zieht.

4.6 Arten von Einarbeitungseffekten im maschinellen Tunnelbau

Die verschiedenen Arten des Einarbeitungseffekts werden von Zöhner⁶² übernommen und anhand der Bilder von Hechenblaickner⁶³ erklärt.

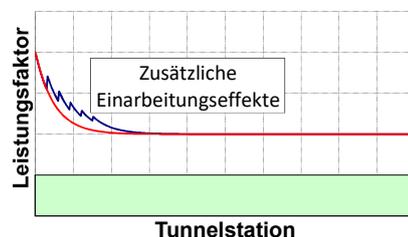
Einarbeitungseffekte durch Vortriebsunterbrechungen

Nach der Beendigung einer längeren Vortriebsunterbrechung, deren Dauer genau beziffert werden kann, kommt es in der Folge zu einem erneuten Einarbeitungseffekt. In der nebenstehenden Abbildung ist die Auswirkung des Wiedereinarbeitungseffekts einer einzelnen Unterbrechung im Vergleich zum Bau-SOLL in blau dargestellt.



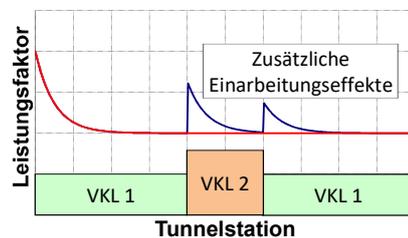
Einarbeitungseffekte durch mehrmalige Störungen bzw. Leistungsänderungen in einem Vortriebsabschnitt

Durch mehrmalige, wenn auch nur geringfügige Abänderung der vertraglichen Leistungserbringung in einem Abschnitt, deren Einzelzeiten erfasst werden können, entstehen sich überlagernde Einarbeitungseffekte. In der nebenstehenden Abbildung ist die Auswirkung der Wiedereinarbeitungseffekte mehrerer Unterbrechung im Vergleich zum Bau-SOLL in blau dargestellt.



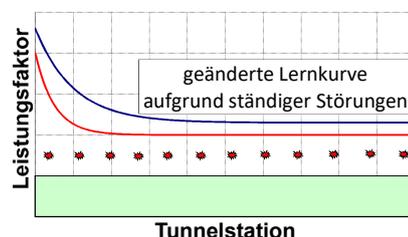
Einarbeitungseffekte durch geänderte Vortriebsklassenverteilung

Bei jedem VKL-Wechsel kommt es grundsätzlich zu Einarbeitungseffekten. Wurden diese prognostiziert und sind sie in den Ausschreibungsunterlagen ersichtlich, so hat eine Berücksichtigung der Effekte durch den AN zu erfolgen. Anderenfalls fallen Einarbeitungseffekte durch den Wechsel der VKL in die Sphäre des AG's. In der nebenstehenden Abbildung ist die Auswirkung der Wiedereinarbeitungseffekte nach zweimaligem Wechsel der VKL im Vergleich zum Bau-SOLL in blau dargestellt.



Auswirkung bei laufendem Auftreten von Störungen

Wird von Anfang an auf eine andere VKL, als ausgeschrieben, getroffen, können die vorgesehenen Ressourcen nicht mehr optimal eingesetzt werden und der Effekt der Einarbeitung wird möglicherweise stärker ausgebildet. In der nebenstehenden Abbildung ist die Auswirkung anderer Anfangsbedingungen auf den Einarbeitungseffekt im Vergleich zum Bau-SOLL in blau dargestellt.

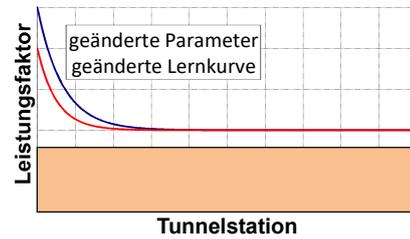


⁶²Vgl. [36] Zöhner, S. 70 ff.

⁶³Vgl. [13] Hechenblaickner, S. 11 ff.

Einarbeitungseffekte durch andere Vortriebsklasse als erwartet

Kommt es entlang einer Tunnelstrecke laufend zu Störungen der Leistungserbringung, so wirkt sich dies nicht nur auf den Einarbeitungseffekt am Anfang des Vortriebs aus, sondern kann die Leistung im gesamten Streckenabschnitt reduzieren. Dieser Effekt wird in der nebenstehenden Abbildung gezeigt. Die Gesamtleistung ist durch die laufenden Unterbrechungen geringer im Vergleich zum Bau-SOLL und der Einarbeitungseffekt am Anfang der Tunnelstrecke ist stärker ausgeprägt.



Einarbeitungseffekt in Kalkulation und Bauzeit

Wie der Leser in den Teilabschnitten 4.2, 4.3 und 4.4 dieses Kapitels erfahren hat, ist das Thema der Einarbeitung bzw. des Einarbeitungseffekts sehr komplex und es gibt eine Unzahl an Einflussgrößen. Es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, wie man diese Einflüsse des Einarbeitungseffekts in der Kalkulation bzw. in weiterer Folge in der Bauzeitplanung berücksichtigt. Aus der Sicht des Verfassers wird derzeit in der Bauwirtschaft bei Projektkalkulationen der EAE sehr oft als eine pauschale Größe angesetzt. Die Berücksichtigung wird mit einem einzigen Wert für die gesamte Bauzeit angenommen. Diese Herangehensweise in Kalkulation bzw. in der Bauzeitplanung ist aus der Sicht des Verfassers dieser Arbeit nicht richtig, da hier die Anzahl der Störungen im Vortrieb und die darauffolgenden Einarbeitungsphasen nicht realitätsnah abgebildet bzw. berücksichtigt werden können. *Stempkowski*⁶⁴ beschreibt die Berücksichtigung des ersten Einarbeitungseffekts in einem Projekt wie folgt: „Grundsätzlich muss der AN den ersten Einarbeitungseffekt für jede Taktfolge in seiner Kalkulation berücksichtigen. Entweder er weist diesen Effekt der zusätzlichen Einarbeitungsstunden explizit in seiner Herleitung der Leistungsansätze im K7-Blatt aus, oder er verwendet einen Mischwert, der sich aus den geringeren Leistungswerten der ersten Taktfolgen und einem optimalen Leistungswert ab jenem Takt, bei dem kein Einarbeitungseffekt mehr spürbar ist, zusammensetzt.“ Der Ausweisung von exakten Werten im K7-Blatt werden die wenigsten ausführenden Unternehmen positiv gestimmt gegenüberstehen, da sie dadurch einen Teil der firmeninternen Kalkulationsstrategie offenlegen müssten. Die Verwendung eines Mischwerts, wie es *Stempkowski* vorschlägt, erscheint dem Verfasser sehr sinnvoll, da durch den vorgetragenen Ansatz der gesamte Zeitraum der Einarbeitung Berücksichtigung findet und dadurch keine pauschalierten Aussagen mehr getroffen werden müssten. Hinsichtlich der weiteren Einarbeitungseffekte, die nach Störungen während des Vortriebs im laufenden Projekt auftreten, sollte der EAE mit der Vortriebsklasse verknüpft werden und dadurch in die Projekte einfließen. Der Verfasser könnte sich eine Lösung in der Form vorstellen, dass pro Unterbrechung des Vortriebs, in Abhängigkeit von der Vortriebsklasse, ein gewisser prozentueller Anteil der Kosten sowie der Stillstandszeit für die Deckung der anfallenden laufenden Baustellenkosten sowie eine Verlängerung der Bauzeit dem AN zuerkannt werden. Diese Verfahrensweise erscheint aus der Sicht des Verfassers sowohl für den AN, als auch für den AG in Bezug auf die Abrechnung bzw. für die Fortschreibung der Bauzeitpläne als fair.

4.7 Zwischenfazit zur Grundlagenermittlung

Am Ende der Grundlagenermittlung ist es dem Verfasser dieser Arbeit ein Anliegen, in einer kurzen Repetition ein Zwischenresümee über das bisher Gelesene zu geben. Im den beiden ersten Kapiteln 1 und 2 standen neben einer Begriffs- und Abkürzungsdefinition die Grundlagener-

⁶⁴Vgl. [32] *Stempkowski*, S. 468 ff.

mittlung über die in den folgenden Projekten eingesetzten Maschinenkonzepte im Vordergrund. In Kapitel 3 wurde der Begriff des Lernens aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet und der Begriff der Einarbeitung, sowie die Einflussgrößen auf die Einarbeitung erläutert. Des Weiteren wurden mehrere Methoden zur Berechnung des Einarbeitungseffekts, die es in der Literatur gibt, behandelt. An dieser Stelle war zu sehen, dass es Verfahren gibt, die sich für den maschinellen Tunnelbau eher eignen würden, und Verfahren, die im Tunnelbau eher fehl am Platz sind. Laut der Einschätzung des Autors zählt das Verfahren nach *Platz* zu den geeignetsten. Unter anderem beschäftigt sich dieses Kapitel gegen Ende auch mit der Berücksichtigung des EAE in der Kalkulation und der Bauzeitplanung. Zu diesem Thema gibt es einen guten Ansatz von *Stempkowski*, der die Verwendung eines Mischwerts für die erstmalige Einarbeitung vorschlägt. Zur Berücksichtigung der nach Stillständen auftretenden Einarbeitungsphasen während des laufenden Projekts schlägt der Autor eine Verknüpfung der Vortriebsklasse und der Störungsdauer über einen prozentuellen Wert vor, die dem AN in Form einer Deckung der anfallenden Baustellenkosten sowie einer Bauzeitverlängerung zuerkannt werden sollen.

Auf den kommenden Seiten setzt sich der Autor mit den realen Projekten und den zugehörigen Datensätzen auseinander.



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

Kapitel 5

Projektbeschreibungen

In diesem Kapitel sollen real abgewickelte, bzw. zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit im Bau befindliche Projekte vorgestellt und in den folgenden Abschnitten untersucht werden. Die darin beschriebenen Projekte wurde aufgrund einer ausreichend guten Lage des Datenbestands ausgewählt, um in dieser Arbeit weiterverarbeitet werden zu können.

5.1 Projekt A

Die Beschreibung von Projekt A wird in dieser Diplomarbeit nicht veröffentlicht. Sie ist in *Forschungsbericht – Beschreibung und Analyse von ausgewählten Projekten hinsichtlich des Einarbeitungseffekts* [5], ausgearbeitet von Bisenberger und Hochwimmer, enthalten.

5.2 Projekt B

Die Beschreibung von Projekt B wird in dieser Diplomarbeit nicht veröffentlicht. Sie ist in *Forschungsbericht – Beschreibung und Analyse von ausgewählten Projekten hinsichtlich des Einarbeitungseffekts* [5], ausgearbeitet von Bisenberger und Hochwimmer, enthalten.

5.3 Projekt C

Auf den folgenden Seiten wird die Beschreibung des Projekts 5.3 durchgeführt. In diesem Zusammenhang werden die Projektparameter, die geologische Situation sowie die TVM beschrieben.

5.3.1 Projektparameter

Das Projekt E liegt im Norden des europäischen Kontinents und umfasst die Errichtung eines Infrastrukturtunnels. Beim genannten Projekt handelt es sich um die Errichtung eines Eisenbahntunnels zwischen Arna und Floen, welcher den Ulriken, der den höchsten der sieben Berge um die skandinavische Stadt Bergen darstellt, durchörteren soll. Neben dem neu zu errichtenden Tunnel UUT21, gibt es einen bereits im Jahre 1964 fertiggestellten, parallel verlaufenden Bestandstunnel. Aufgrund der sehr stark frequentierten eingleisigen Bahnstrecke, mit zirka 120 Zugfahrten des Personenverkehrs und 14 Zugfahrten des Güterverkehrs pro Tag war es notwendig, das Tunnelnetz in diesem Bereich der Strecke zu erweitern. Laut dem norwegischen Eisenbahninfrastrukturamt Jernbaneverket ist die eingleisige Strecke bis zur Errichtung des zweiten Tunnels die mit der höchsten Verkehrsdichte in Europa.

Des Weiteren dient die Errichtung einer zweiten Tunnelröhre der Erhöhung der Verkehrssicherheit sowie der Kapazität im Personen- und Güterverkehr auf dieser Strecke. Der unterirdische Verkehrsweg soll die Stationen Arna und Bergen in Westnorwegen, welche im Verlauf der Bahnlinie Bergensbanen zwischen Bergen und Oslo liegen, miteinander verbinden. Dieses Projekt stellt eine Premiere auf norwegischem Territorium dar, denn es ist der erste Einsatz einer Tunnelbohrmaschine in diesem Land. Der einspurige Tunnel weist eine Gesamtlänge von 7.640 m auf und wird vom Portal Arna in Richtung Floen/Bergen vorgetrieben. In Abb. 5.1 ist eine Übersicht über die Lage des Tunnelbauwerks gegeben.



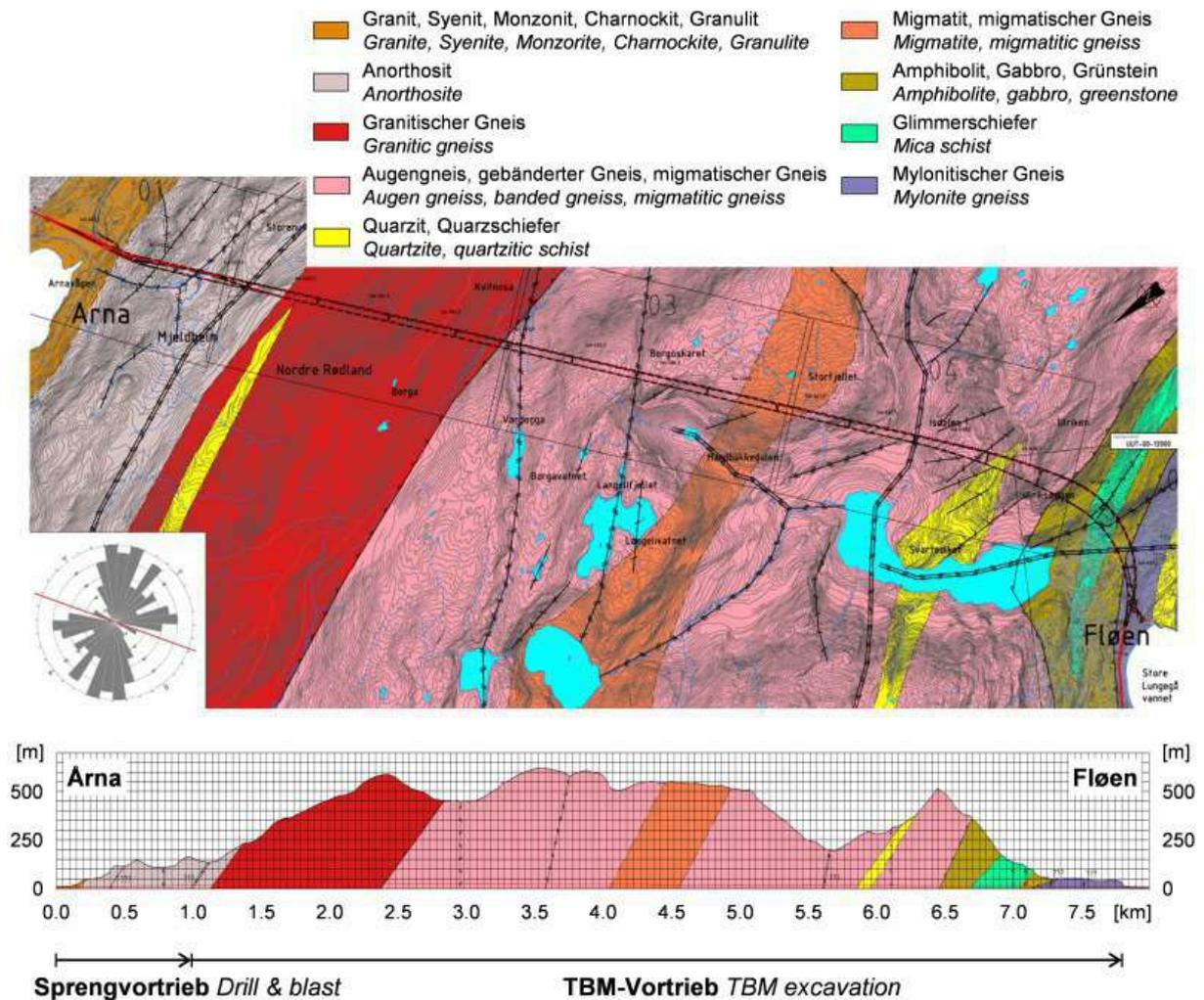


Abb. 5.2: Übersichtsplan Geologie (Quelle: Tunnel-Online Homepage [3])

neuen Tunnel entfernt ist und damit die Erschütterungen eines Sprengvortriebs unabschätzbare Folgen haben könnten.

5.3.2 Geologische Situation

Der von Arna aus startende Vortrieb kann aus geologischer Sicht zu Beginn mit einem stark metamorphen bzw. magmatischen Untergrund rechnen. In der Abb. 5.2 ist ein geologischer Grundriss sowie ein geologischer Längenschnitt gegeben. Des Weiteren ist der Abbildung zu entnehmen, bis zu welchem Punkt des Tunnels der Sprengvortrieb eingesetzt wird und ab welchem Punkt die TVM die Vortriebsarbeiten übernimmt.

Im ersten Abschnitt des Tunnels ist der Untergrund eher durch Gesteinsarten wie Granit, Syenit, Monzonit und andere Hartgesteine gekennzeichnet. Im mittleren Abschnitt des Tunnelvortriebs besteht der Untergrund aus granitischem Gneis, Augengneis, gebändertem Gneis, migmatischem Gneis und anderen, sehr druckfesten Gesteinsarten. Im letzten Bereich des Vortriebs, nämlich dem westlichen Teil des Tunnelbauwerks Richtung Fløen bzw. Bergen ist der Untergrund geprägt durch Amphibolit, Gabbro, Grünstein und Glimmerschiefer sowie mylonithischen Gneis. Es ist anhand der einzeln beschriebenen Abschnitte zu erkennen, dass jeder Abschnitt mit sehr harten Gesteinsarten durchzogen ist, den einzelnen Abwandlungen des Gneises.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass skandinavischer Gneis, wie er im Projektgebiet vorkommt, mit bis zu 300 Megapascal Druckfestigkeit als absoluter Härtestest für den maschinellen Tunnelvortrieb gilt. Die Maschine, die diesen Härtestest auf der Baustelle bestehen soll, wird in Abschnitt 5.3.3 beschrieben. Die Gesteine der einzelnen Abschnitte zeichnen sich durch eine sehr hohe Druckfestigkeit aus und haben damit auch eine hohe Abriebfestigkeit bzw. verursachen einen hohen Werkzeugverschleiß an den Disken der TVM.

In weiterer Folge ist bei Gesteinen wie Granit oder anderen quarzhaltigen Untergründen die Gefahr von Silikose ernst zu nehmen. Diese Erkrankung kann durch den während der Vortriebsarbeiten entstehenden Feinstaub in die Lunge der projektbeteiligten Personen gelangen und dort Ablagerungen und entzündliche Prozesse in Gang setzen.

5.3.3 Tunnelbohrmaschine

Die TVM, die bei diesem Projekt verwendet wird, ist die erste TBM-O bzw. auch Gripper Tunnelbohrmaschine genannt, die in Norwegen zum Einsatz kommt. Die genaue Bezeichnung des Maschinentyps lautet Hard Rock Gripper TBM S-935. Der Durchmesser der TVM beträgt 9,30 m und die Maschine weist mit Nachläufern eine Länge von 155 m auf.

Die Antriebsleistung der Maschine beträgt bis zu 4.200 kW, was in etwa 5.710 PS entspricht. Aus der zuvor genannten Antriebsleistung kann ein maximales Drehmoment von 10.238 kNm generiert werden, um den Tunnel im extrem harten Gestein vorzutreiben. Durch die zuvor genannten Antriebsleistungen der Maschine ist es möglich, während des Betriebs 68 m² Ausbruchfläche abzubauen bzw. freizulegen. In weiterer Folge ist der Bohrkopf aufgrund des großen Anteils an Hartgesteinen im Untergrund mit bis zu 62 19 Zoll Disken ausgestattet. Davon sind 54 Stück sogenannte „Single disks“ und vier Stück „Double disks“. Die höchste Drehzahl, die der Bohrkopf im Verlauf der Vortriebsarbeiten erreichte, waren 6,4 Umdrehungen pro Minute.

Nach dem Bohrkopf wird das ausgebrochene Gestein über Förderbänder, die sich auf den Nachläufereinheiten befinden, weitergeleitet. In der Folge wird das Material mittels LKW zu vier bis acht Kilometer entfernten Deponien verbracht. Die Überdeckung der Maschine durch das Gebirge beträgt im Verlauf der Tunnelstrecke bis zu 600 m. Aufgrund einiger Änderungen der Bauabläufe ist es notwendig, die Maschine vor dem Portal des Vortunnels zu montieren. In weiterer Folge entwickelte das Joint Venture der ausführenden Unternehmen mit dem Hersteller der Maschine ein spezielles Schreitwerk, das es ermöglicht, den Bohrkopf mit montiertem Nachläufer in Zwei-Meter-Schritten nachzuziehen. An dieser Stelle ist weiters zu erwähnen, dass die TVM im Endzustand ein Gesamtgewicht von 1.800 Tonnen aufweist.

Da die Tunnelbohrmaschine eine TBM-O ist und der Tunnel während des Vortriebs größtenteils nicht ausgekleidet ist bzw. nur Betonplatten mit Schienen für die Nachläufereinrichtungen installiert sind, müssen während des Vortriebs vorausseilende Sicherheits- und Abdichtungsmaßnahmen gesetzt werden. Diese bestehen unter anderem aus einer vorausseilenden Abdichtungsinjektion mit einer Länge von 30 m, sowie Spießschirmen mit einer Länge von 15 m. Diese Sicherheitseinrichtungen sind in Abb. 5.3 grafisch dargestellt. Des Weiteren kommen Stahlbögen, Gesteinsanker sowie Bewehrungsmatten in Kombination mit Spritzbeton als Sicherheitsmaßnahmen zur Ausführung. Von den Gesteinsankern wurden im Verlauf der Vortriebsstrecke insgesamt zirka 9.300 Stück verbaut. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Maschine beachtliche Vortriebsleistungen im Festgestein erbracht hat. So wurden als beste Monatsleistung 671,5 m vorgetrieben. Im Vergleich dazu betrug die durchschnittliche sowie die beste Tagesleistung 13 m bzw. 37,5 m.

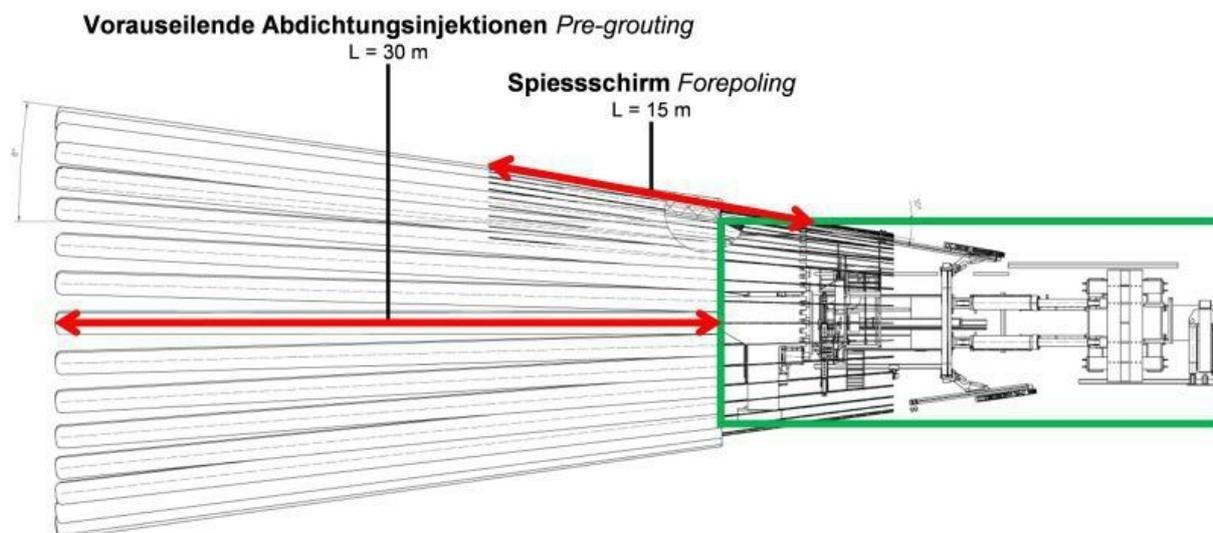


Abb. 5.3: Vorseilende Sicherungs- und Abdichtungsmaßnahmen (Quelle: Tunnel-Online Homepage [3])

5.4 Projekt D

Auf den folgenden Seiten wird die Beschreibung des Projekts 5.4 durchgeführt. In diesem Zusammenhang werden die Projektparameter, die geologische Situation sowie die TVM beschrieben.

5.4.1 Projektparameter

Projekt D ist ein Teilabschnitt eines technischen Infrastrukturprojekts, welches den fünften Ausbauabschnitt des Wassertransportnetzes eines Staates im Nahen Osten darstellt. Dieses Wasserversorgungssystem existiert seit dem Jahre 1956 und es ist notwendig, dieses aufgrund des steigenden Wasserbedarfs stetig auszubauen. Die im Nahen Osten befindliche Baustelle stellt ein wichtiges Projekt in Hinblick auf die Wasserversorgung des Landes dar. Diese Ausbaustufe des Wassernetzes umfasst eine 40 km lange Wasserleitung, wovon 13 km unter Tage geführt werden und der Rest ober Tage. Die Wassertransportleitung beginnt am See Genezareth, welcher eine Hauptwasserquelle für das Land darstellt. Das Wasser wird nach der Aufbereitung, in Wasserentsalzungsanlagen, mittels Pumpen in die Hauptstadt Jerusalem gebracht.

Die zu bauende Trinkwasserleitung ist auf einen maximalen Durchsatz von 65.000 m³ pro Stunde ausgelegt und überwindet bei ihrem Transport durch das Land mehr als 900 Höhenmeter. Da die Wasserversorgungsleitung auf dem Weg in die ewige Stadt über eine größere Strecke durch ein Naturschutzgebiet verlaufen soll, wurde die Entscheidung gefällt, diesen 13 km langen Abschnitt nicht wie den Rest der Strecke in offener Bauweise herzustellen, sondern mittels einer TVM unter Tage aufzufahren. Die Tunnelröhre führt in ihrem Verlauf vom Gebiet Eshtaol nahe Beit Shemesh nach Ein Kerem. Die TVM soll im Durchschnitt eine Leistung von 21 m pro Tag erbringen und damit die Tunnelröhre mit einem Durchmesser von 3,9 m auffahren. Aufgrund der hohen Drücke, die im Wasserleitungsnetz für den Transport über solch lange Strecken notwendig sind, werden die hergestellten Tunnel nach der Fertigstellung der Bohrarbeiten mit einem Stahlrohr mit 100 Zoll (=2,54 m) Durchmesser ausgekleidet. Der zwischen Stahlrohr und Tunnelinnenwandung freibleibende Bereich wird verfüllt, sodass eine kraftschlüssige Verbindung vorhanden ist und Beanspruchungen des Rohrkörpers, die aus dem unter hohem Druck transportierten Wasser im Stahlrohr entstehen, sicher in den Untergrund abgeleitet werden können.

Die Wasserleitung soll im Verlauf der projektierten Strecke mit einer Neigung zwischen ein und drei Grad hergestellt werden. An dieser Stelle sollte noch erwähnt werden, dass dieser Tunnel der derzeit längste Tunnel der Welt ist, um Wasser, welches unter enorm hohem Druck steht, zu transportieren. Durch dieses Projekt der technischen Infrastruktur ist es nach heutigem Wissensstand möglich, die Wasserversorgungsprobleme und den steigenden Wasserbedarf des Landes bis zum Jahr 2065 zu lösen bzw. abzudecken.

5.4.2 Geologische Situation

Der anstehende Untergrund ist durch Schichten aus Kalkstein, Lehm und Dolomit gekennzeichnet. Anhand der verschiedenen Gesteinsarten ist erkennbar, dass der Untergrund des Projektgebiets hauptsächlich aus Weichgesteinen aufgebaut ist. Dieser Umstand muss natürlich auch bei der Auswahl der TVM berücksichtigt werden, welche in Abschnitt 5.4.3 erläutert wird. Bei diesem Projekt kann sich je nach Grundwasserhaushalt eine typische lithologische Erscheinung ausbilden, nämlich der sogenannte Karst. Dabei beruhen Karsterscheinungen nicht auf einer primären Porosität des Gesteins, sondern die Porosität des Gesteins nimmt mit der Zeit zu.

Der Vorgang der Karstbildung besteht aus zwei Prozessen, nämlich der Kohlensäureverwitterung und der Lösungsabfuhr. Durch den Vorgang der Verkarstung des Kalkgesteins können sich unterirdische Hohlräume bilden, deren Inneres durch Stalaktiten bzw. Stalakmiten gekennzeichnet sind. Diese unterirdischen Gesteinsausbildungen werden auch als Tropfsteinhöhlen bezeichnet. Die zuvor genannten petrographischen Vorkommnisse sind auch in Abb. 5.4 zu sehen.



Abb. 5.4: TBM in Karsthöhle (Quelle: Soziale Netzwerkseite ARGE [18])

Die oben erläuterte petrographische Ausbildung kann natürlich auch zu Erschwernissen im Zuge des maschinellen Tunnelvortriebs führen bzw. im äußersten Fall auch zu Vortriebsunterbrechungen. Weiters enthält der anstehende Untergrund Lehm. Dieser entsteht als Verwitterungsprodukt von Sand, Ton und Schluff. Lehm weist je nach Grundwasserstand unterschiedliche Zustände auf. Bei Wasserzutritt quillt die Gesteinsart stark auf und vergrößert ihr Volumen. Ein länger andauernder Wasserzufluss führt dazu, dass sich die Festigkeit verringert und damit der Untergrund bzw. das anstehende Gestein seine Zustandsform ändert. Dadurch kann es zu instabilem

Verhalten während des Tunnelvortriebs kommen. In umgekehrter Weise führt ein Austrocknen des Untergrundes zu einer Volumensverminderung. Das Sinken des Grundwassers und die damit in Zusammenhang stehende Abnahme des Porenwinkelwassers in bindigen Böden führt zur Reduktion der sogenannten Scheinkohäsion. Durch diesen Umstand ist kein Zusammenhalt mehr zwischen den Gesteinskörnern gegeben und die Stabilität des Bodens ist gefährdet. Dies kann im Zuge eines maschinellen Tunnelvortriebs auch zur Destabilisierung des Untergrundes und zu einem Verbruch führen.

Die genannten Szenarien und daraus resultierenden Gefahren sind bei der Vorbereitung und Planung des maschinellen Tunnelvortriebs besonders zu beachten. Bevor die Maschine jedoch bei diesem Projekt zum Einsatz kommt, wird sie im Zuge einer Generalüberholung erneuert.

5.4.3 Tunnelbohrmaschine

Bei diesem Bauvorhaben wird für den Vortrieb der Wasserleitung eine TBM-O verwendet, welche bereits im Jahr 1988 gebaut wurde. Die Besonderheit der TVM ist, dass sie mit zwei Paar Gripperschuh ausgestattet ist. Dadurch ist ein besserer Niveausgleich der Maschine während des Vortriebs möglich. Die zuvor genannten Gripperschuhe sind in Abb. 5.5, im linken Bereich der Abbildung, ersichtlich.



Abb. 5.5: TVM beim Aufbau (Quelle: Fachmagazin - THIS [4])

Die TVM kam schon bei mehreren Tunnelbaustellen in Europa zum Einsatz. Durch diesen Umstand stellt sich die Wirtschaftlichkeit der Maschine in einem anderen Licht dar, als wenn der Einsatz nur auf ein Projekt beschränkt wäre.

Die Maschine weist mit einem Durchmesser von 3,90 m, der für die Errichtung des Wassertransportweges notwendig ist, einen verhältnismäßig kleinen Durchmesser für eine TVM auf. Die Maschine hat ein Gewicht von insgesamt 580 Tonnen und misst vom Bohrkopf bis zum Ende der Nachläufereinheit eine Länge von 250 m.

Um die TVM von Europa in den Nahen Osten zu bringen, waren insgesamt 30 Container notwendig, in denen die Einzelbestandteile der Maschine eingelagert wurden. Die Tunnelvortriebsmaschine wurde nach der Verschiffung vor Ort zusammengebaut und in Betrieb genommen. Sie ist zur sofortigen Gebirgsunterstützung mit folgenden Sicherungseinheiten ausgestattet. Eine Einheit der Maschine ist für die Montage von Bewehrungsmatten und die Ausbringung von Spritzbeton vorhanden. Von einem anderen Abschnitt der Maschine aus ist es möglich, Stahlbögen zur Sicherung der Tunnellaibung zu montieren. Eine andere Sicherungsmaßnahme des anstehenden Gesteins, die von der Maschine aus durchgeführt werden kann, ist das Setzen von Ankern. Hier ist es möglich, sowohl Reibungsanker als auch verpresste Anker in den Untergrund einzubringen. Bei verpressten Ankern wird ein Medium wie Harz oder Zementmörtel in den Bereich zwischen Anker und Bohrlochwandung injiziert, um eine bessere Kraftübertragung zu ermöglichen.

Gegenüberstellung Projekte

In Tabelle 5.1 ist eine Gegenüberstellung der in diesem Kapitel beschriebenen und in Kapitel 6 untersuchten Projekte dargestellt. Hinsichtlich der Geologie merkt der Autor an, dass in Tab. 5.1, aufgrund beschränkter Platzverhältnisse, nur die wesentlichen Gesteinsarten aufgelistet werden können.

Tab. 5.1: Gegenüberstellung der untersuchten Projekte

| Projekte | untersuchte Länge | DM | TVM Typ | Geologie (wesentliches Gestein) |
|----------------------|-----------------------------|--------|---------|---------------------------------|
| Projekt A Vortrieb 1 | siehe Forschungsbericht [5] | / | / | / |
| Projekt A Vortrieb 2 | siehe Forschungsbericht [5] | / | / | / |
| Projekt B | siehe Forschungsbericht [5] | / | / | / |
| Projekt C | 6.314 m | 9,30 m | TBM-O | div. Gneise u. Schiefer |
| Projekt D | 7.604 m | 3,90 m | TBM-O | Kalkstein, Lehm, Dolomit |

Kapitel 6

Forschungsmethodik und Datenanalyse

Aufgrund der Diversität der einzelnen Projekte und Datensätze, die aus unterschiedlichen Gründen herrühren kann, ist es notwendig, den Prozess der Datenanalyse als einen iterativen Vorgang zu durchlaufen. In diesem Zusammenhang ist es nicht ungewöhnlich, dass zur Findung eines passenden Algorithmus mehrere Entwicklungsschritte notwendig sind, dies war auch bei dieser Arbeit der Fall. Das Ziel dieses Kapitels ist eine Formel bzw. ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die Einarbeitungsdauer in Abhängigkeit von der Störungsdauer berechnet werden kann.

6.1 Forschungsmethodik

Im folgenden Kapitel soll genauer auf die methodischen Vorgehensweisen und die Überlegungen hinter den Entwicklungsschritten eingegangen werden. Es war notwendig, die Arbeitsweisen aufgrund von aufgetretenen Umständen anzupassen. Daher ist erkennbar, dass der Vorgang der Datenauswertung ein teilweise iterativer ist. In den folgenden Kapiteln 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3 und 6.1.4 werden die Vorgehensweisen in den einzelnen Iterationsschritten der Datenanalyse genauer beschrieben.

6.1.1 Versuch 1 – Datenauswertung – Aufwandswerte pro Tunnelmeter bezogen auf Vortriebstage bzw. laufende Tunnelmeter

Bei der Durchführung des ersten Auswerteversuchs wurden die überlieferten Daten und Tabellen mittels eines Tabellenkalkulationsprogramm (TKP) geordnet. Im weiteren Verlauf der Auswertung ergaben sich die Vortriebsleistungen, gemessen in Metern pro Stunde bzw. die Aufwandswerte pro Tunnelmeter, gemessen in Stunden pro Meter.

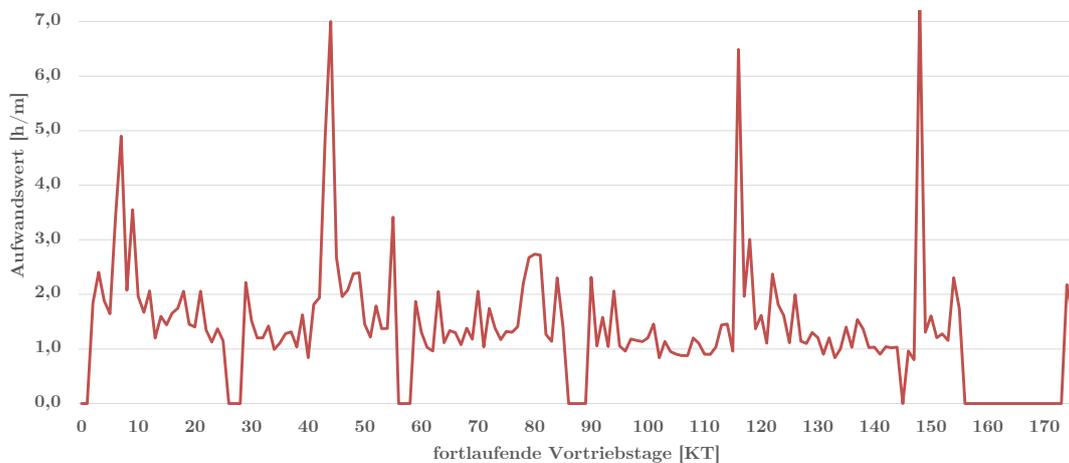


Abb. 6.1: Darstellung zur Datenauswertung – Versuch 1 – Aufwandswert pro Tunnelmeter bezogen auf Vortriebstage

Um einen vermeintlich besseren Überblick über die Daten zu bekommen, wurden die Aufwandswerte pro Tunnelmeter in Abhängigkeit von der Tunnelkilometrierung in Diagrammen zusammengefasst. Beispielhaft sind in Abb. 6.1 und Abb. 6.2 die grafischen Ergebnisse der zuvor beschriebenen Ausarbeitungen dargestellt. In der ersten Abbildung ist der Verlauf des Aufwandswerts gegenüber den fortlaufenden Arbeitstagen ersichtlich. In diesem Zusammenhang weist der Autor nochmals auf die sehr starke Volatilität der Daten hin. In Abb. 6.2 stellt sich eine ähnliche Situation dar, wie bereits verbal beschrieben. Der Unterschied zu Abb. 6.1 ist, dass die X-Achse als Einheit Tunnelmeter aufweist und keine fortlaufenden Kalendertage wie in Abb. 6.1.

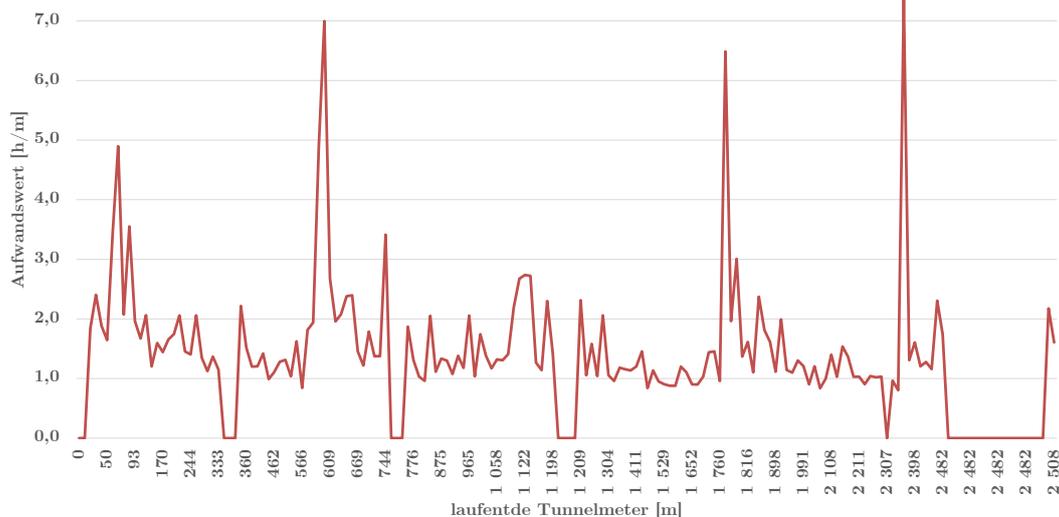


Abb. 6.2: Darstellung zur Datenauswertung – Versuch 1 – Aufwandswert pro Tunnelmeter bezogen auf laufende Tunnelmeter

Der Verfasser dieser Arbeit erhoffte sich, durch die grafische Darstellung Regelmäßigkeiten der Daten erkennen zu können. Die zeichnerischen Ausgaben des TKP der Vortriebsdaten brachten nur einen geringen Mehrwert. Hinsichtlich der Identifizierung von Stellen der Vortriebsstörung bzw. Vortriebsunterbrechung und der anschließenden Wiedereinarbeitung führten die Ausgaben des TKP zu keinem befriedigenden Ergebnis, da die Werte sehr hohen Schwankungen unterworfen waren und die Gründe dafür nicht immer klar zugeordnet werden konnten. In weiterer Folge war es auch wichtig, ein Kriterium festzulegen, ab dem ein erschwerter Vortrieb bzw. ein Stillstand der Vortriebsarbeiten und eine darauffolgende Wiedereinarbeitung vorliegt.

Der Autor dieser Arbeit entschloss sich nach eingehenden Überlegungen zu folgender Vorgehensweise. Es wurde ein um 10 % erhöhter Mittelwert als Grenze für den erhöhten Vortriebsaufwand angesetzt. Es ist zu erwähnen, dass der Mittelwert über alle Vortriebsdaten des jeweiligen Projekts gebildet wurde. Bei der Durchsicht der Auswertungen konnte rasch festgestellt werden, dass dieser Ansatz kein befriedigendes Fazit ans Tageslicht fördern würde, da die Volatilität der Daten zu groß war und in vielen Zeitpunkten des Vortriebs die zuvor erwähnte 10 %-Marke massiv überschritten hatte.

Ein weiteres Thema ist in diesem Zusammenhang die Bestimmung der Einarbeitungszeit. Dies ist jene Zeit, die die Belegschaft benötigt, um nach dem Wegfall der Störung auf den Leistungsfaktor eins zu kommen, oder anders ausgedrückt, um sich einzuarbeiten. Die Einarbeitungszeit wird als Differenz zwischen dem Aufwandswert pro Tunnelmeter während der Einarbeitungsphase und dem Normalaufwand für den Vortrieb pro Tunnelmeter über die vorgetriebenen Tunnelmeter integriert. Da die Vortriebsdaten nicht zu jedem Zeitpunkt des Vortriebs gemessen, sondern mit

zeitlichen Abständen erhoben wurden, war eine mathematisch definitionsgemäße Integration nicht möglich. Aus diesem Grund wurde die Vorgehensweise auf die Bildung von Riemannsummen geändert. Hier war es für den Autor der Arbeit sehr schwierig festzustellen, ab welchem Zeitpunkt die Einarbeitung abgeschlossen ist, da der Konnex zwischen der Störung, welche zur Vortriebsunterbrechung und der zum Beispiel nachfolgenden schleppenden Einarbeitung oft nicht genau ersichtlich war. Aus diesem Grund wurde die Untersuchung der Daten mittels eines um 10 % erhöhten Mittelwerts als Grenze für den erschwerten Vortrieb ad acta gelegt.

6.1.2 Versuch 2 – Datenauswertung – Ermittlung Ende der Einarbeitungsphase

In weiterer Folge wurde eine andere Herangehensweise der Datenauswertung gewählt. Anhand der aus der Literatur bekannten und im zyklischen Tunnelbau in Verwendung befindlichen Formel nach Platz sollte die Datenauswertung durchgeführt werden. Bei dieser Vorgehensweise ergab sich ein Problem, das dem in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen sehr ähnelt. Zur Auswertung der in Abschnitt 4.5.3 beschriebenen Formel ist es notwendig, das Ende der Einarbeitung zu kennen. Da dies aufgrund der Volatilität der Daten nicht genau festlegbar war, wurde auch diese Vorgehensweise verworfen. Die angesprochene Wechselhaftigkeit und Diskontinuität bei der Abnahme des Aufwandes pro Meter Vortrieb ist in Abb. 6.3 nachzuvollziehen.

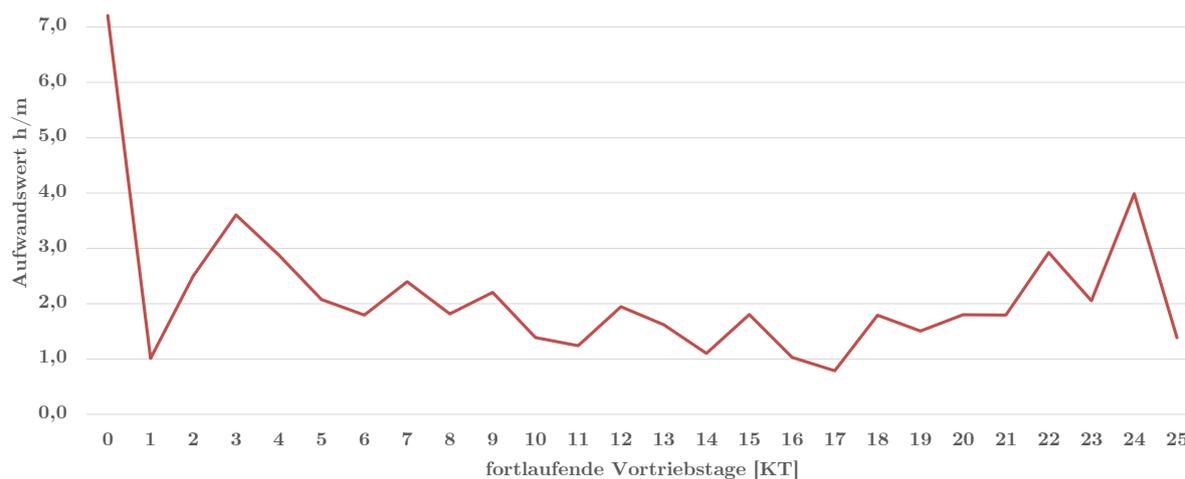


Abb. 6.3: Darstellung zur Datenauswertung – Versuch 2 – Aufwandswert in h/m bezogen auf Vortriebstage

6.1.3 Versuch 3 – Datenauswertung – Aufwandswert pro Woche bezogen auf Kalenderwochen

In einem weiteren Versuch der Datenauswertung überlegte sich der Autor, dass eine passende Skalierung einen Fortschritt in der Bestimmung des Endpunktes der Einarbeitungsphase bringen könnte. Die Skalierung wurde so gewählt, dass die Aufwandswerte pro Tunnelmeter auf eine Zeitdauer von einer Woche miteinander verglichen wurden. In Abb. 6.4 ist ersichtlich, wie sich die durchschnittlichen Aufwandswerte pro Meter Vortrieb von einer Woche zur nächsten um das Doppelte und mehr voneinander unterscheiden. Nach kurzem Vergleich der Daten wurde ersichtlich, dass die Daten noch immer eine relativ hohe Volatilität aufwiesen und somit erneut keine qualifizierte Aussage über das Ende der Einarbeitungsphase zu treffen war.

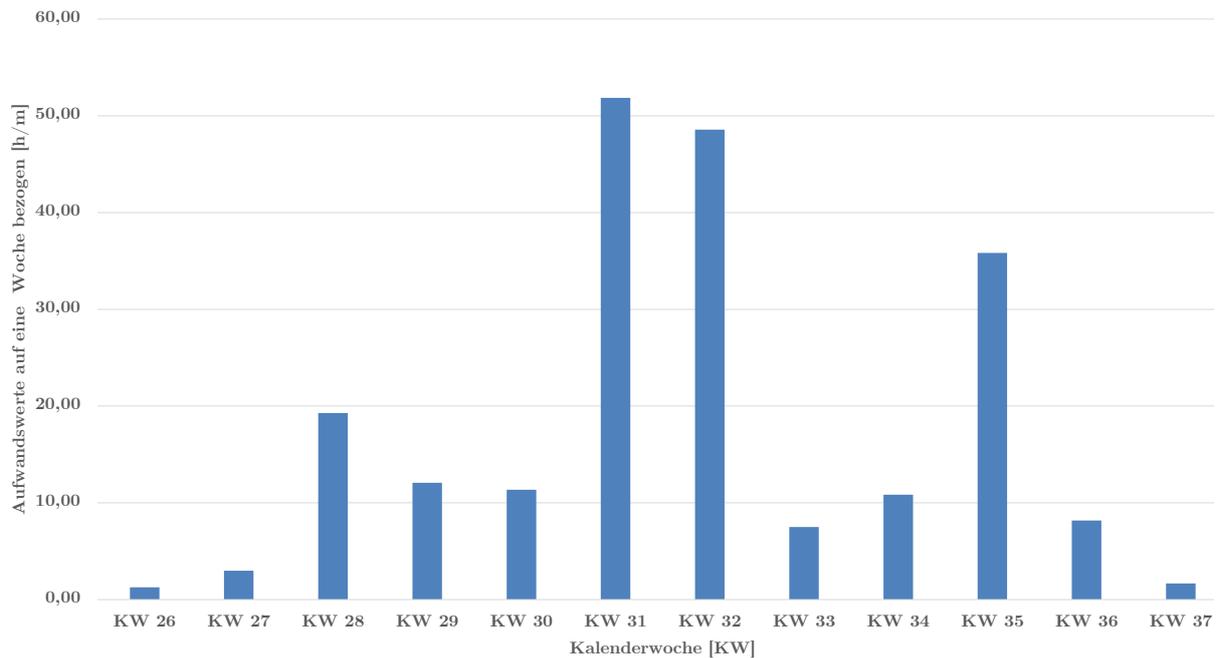


Abb. 6.4: Darstellung zur Datenauswertung – Versuch 3 – Aufwandswert pro Woche bezogen auf Kalenderwochen

6.1.4 Versuch 4 – 30 Hübe in 3 Abschnitten

Im vierten Versuch der Datenauswertung hat der Verfasser versucht, die Ermittlung des Endpunktes der Einarbeitungsphase mit einem neuen Formalismus und einer geänderten Skalierung der Daten zu erreichen. Des Weiteren wurde festgelegt, dass ab diesem Zeitpunkt nur mehr Vortriebsunterbrechungen untersucht werden, da aufgrund der Volatilität der Daten eine Ermittlung des Wegfalls der Erschwernis beim erschwerten Vortrieb nicht feststellbar ist. Um dies genauer zu verfolgen, wurden die Ist-Bauzeitpläne anhand der Vortriebsdaten im TKP erstellt. Hinsichtlich der Ermittlung der Einarbeitungszeit wurde die Formel 6.1 verwendet.

$$\begin{aligned}
 \text{Zusätzliche Einarbeitungszeit} &= \sum \text{Dauer 10 Hübe Abschnitt 1} \\
 &+ \sum \text{Dauer 10 Hübe Abschnitt 2} \\
 &+ \sum \text{Dauer 10 Hübe Abschnitt 3} \\
 &- 3 \cdot \sum \text{Dauer 10 Hübe Abschnitt 3}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Gedanklich kann man sich die Formel 6.1 wie folgt verdeutlichen. Es wird die Summe der nach der Vortriebsunterbrechung folgenden 30 Hübe in drei Abschnitte zu je 10 Hüben eingeteilt. Die Summen dieser drei Abschnitte werden addiert, danach subtrahiert man den dritten Abschnitt, in dem die Einarbeitung bereits abgeschlossen sein sollte, drei Mal. In diesem Ansatz wurde vom Verfasser jedoch nicht berücksichtigt, dass die Einarbeitungsphase auch länger als 30 Hübe dauern kann. In diesem Zusammenhang möchte der Verfasser noch einmal auf das Kapitel 4.4 hinweisen, in dem *Stempkowski* erläutert, dass es bis zu 50 Hubvorgänge dauern kann, bis der optimale Aufwandswert pro Hub erreicht wird. In weiterer Folge wurde bei der Auswertung klar, dass diese

Formel keine zielführenden Ergebnisse liefern kann, da sie sogar negative Einarbeitungsdauern als Ergebnis hervorbrachte, was in diesem Zusammenhang kein sinnvolles Resultat darstellt.

6.1.5 Versuch 5 – Datenauswertung – Prozentuelle Grenzen bei der Einarbeitung

Im fünften Anlauf der Datenauswertung wurde in einem ersten Schritt eine Klasseneinteilung aller Hubzeiten durchgeführt. Diese Klassengrenzen verlaufen dabei von 30 Minuten bis zu über 50.000 Minuten pro Hub.

Aufbauend auf der Häufigkeitsverteilung wurde eine Summenhäufigkeit erstellt, welche im folgenden Unterkapitel 6.2 für die einzelnen Projekte zu sehen ist. Anhand der Häufigkeitsverteilung wurde die Anzahl aller Hübe, die im Kapitel 6.2 untersucht werden, ermittelt. In weiterer Folge wurden alle Hubdauern über 25.000 min ausgewertet. Zur Verifizierung und Bestätigung des Datentrends in der Untersuchung mit einer Dauer über 25.000 min Hubzeit wird daraufhin noch die Klasse mit den Hubdauern von 15.000 bis 25.000 min, in ausgewählten Projekten auch darunter liegend, ausgewertet. Hinsichtlich der Ermittlung des Endes der Einarbeitungsphase wurde folgender Weg gegangen. In diesem Schritt der Datenauswertung ist man dazu übergegangen, die Arbeitszeit in Stunden pro Woche zu ermitteln. Damit wurde im weiteren Auswertungsvorgang ein durchschnittlicher Aufwandswert in Stunden pro Meter und Woche für den Vortrieb ermittelt. Anhand dieser durchschnittlichen Werte wurde nach Überlegungen folgende Syntax entwickelt. Zur Identifizierung des Endpunktes der Einarbeitung wurden die wochenweisen Aufwandswerte gegenübergestellt.

Anschließend ist der Verfasser daran interessiert, den möglichen Beginn einer Vortriebsunterbrechung besser erkennen zu können, wenn die Aufwandswerte pro Woche steigen. Aus diesem Grund wurde vom Autor angedacht, den Aufwandswert der aktuellen Woche mit dem Mittelwert der Aufwandswerte der vergangenen drei Wochen zu vergleichen. Des Weiteren wurden Grenzen festgelegt, ab denen das TKP anzeigen muss, dass ein „fallender Vortriebsaufwand“ bzw. ein „steigender Vortriebsaufwand“ sich in den letzten drei Wochen entwickelt hat. Als Grenzwert wurden fünf Prozent festgelegt. Sollten nun die Aufwandswerte der aktuellen Woche im Vergleich zum Mittelwert der letzten drei Wochen größer als 1,05 oder kleiner als 0,95 sein, dann würde das bedeuten, dass die Fünf-Prozent-Marke nach oben oder unten überschritten wird und somit das Programm die Textierung „Vortriebsaufwand fallend“ bzw. „Vortriebsaufwand steigend“ ausgeben muss.

Durch diese Analyse und Skalierung der Daten war es möglich, die zeitliche Entwicklung der Daten gut verfolgen zu können. Im Fortgang des Datenauswertungsprozesses ist vom Autor gewählt worden, dass die Einarbeitungsphase so lange andauert, bis die Fünf-Prozent-Grenze über- bzw. unterschritten wird oder der Vortriebsaufwand sich im Steigen befindet. Anschließend war es essentiell, die Einarbeitungsdauern nach den Vortriebsunterbrechungen zu ermitteln. Der Formalismus für die Ermittlung der zusätzlichen Arbeitszeit soll im Folgenden dargelegt werden.

$$\text{Dauer zusätzliche Einarbeitungszeit} = \sum (\text{Hubdauern}/60) \cdot (K_m 1 - K_m 2) \cdot \text{Aufwandswert aktuelle Woche} \quad (6.2)$$

Legende:

- $\sum(\text{Hubdauern}/60)$: Summe der Hubdauern seit der Vortriebsunterbrechung bis zum Ende der Einarbeitungsphase
- $K_m 1$: Kilometrierung der Vortriebsunterbrechung
- $K_m 2$: Kilometrierung Ende der Einarbeitungsphase = Normalaufwand

- *Aufwandswert aktuelle Woche*: Das ist der Aufwandswert der aktuellen Woche, in der die Einarbeitungsphase endet

Im nächsten Schritt der Auswertung wurden Diagramme im TKP erstellt, welche eine Gegenüberstellung der Störungsdauer [h] und Wiedereinarbeitungszeit [h] zeigen. Um aus den Punkten im Diagramm des TKP einen Trend generieren zu können, wurden die Daten der ausgewerteten Punkte in ein Mathematikprogramm (MP) geladen, um dort mittels spezieller Software-Tools ein Daten-Fitting und damit eine möglichst allgemeine Aussage über das Verhältnis von Vortriebsunterbrechungsdauern und anschließender Einarbeitungszeit generieren zu können.

Dabei standen folgende Ermittlungen im Fokus der Ausarbeitung. Besonders interessierte den Verfasser, wo die Grenze des Beginns einer zusätzlichen Einarbeitungszeit liegt, anders ausgedrückt bis zu welcher Dauer einer Vortriebsunterbrechung keine zusätzliche Einarbeitungszeit anfällt. Mit Hilfe des MP wurde eine Gleichung, welche unter Formel 6.3 zu sehen ist, mit allgemeinen Parametern erarbeitet, bei welcher für jedes Projekt die Parameter a,b, und c eigens angepasst wurden. Anschließend wurden für die Anpassung der Gleichung an die Daten des Projekts statistische Kennzahlen verwendet, welche dazu beitragen sollen, die Gleichung möglichst nahe an die erhobenen Vortriebsdaten heranzuführen.

Des Weiteren sollen diese Werte zeigen, ob die Gleichung beim jeweiligen Projekt eine sinnvolle Vorhersage der Projekte geliefert hätte. Zum einen wurde Root mean square error (RMSE), zu Deutsch, die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsummen, verwendet. Diese Kennzahl zeigt auf, wie gut eine Funktionskurve an die aufgezeichneten Daten der TVM angepasst wurde bzw. wie stark eine Prognose im Durchschnitt von den Daten bzw. den Beobachtungen abweicht. Berechnen kann man den Kennwert RMSE aus der Quadratwurzel des durchschnittlichen Prognosefehlers. Die Aussage des RMSE stellt sich wie folgt dar. Grundsätzlich gilt, je höher der ermittelte Wert, desto schlechter ist die Anpassung an das Modell. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass das Verhältnis zwischen den Achswerten und dem ermittelten RMSE-Wert in Bezug zu setzen ist und danach dem Modell erst eine positive oder negative Güte ausgesprochen werden kann. Diese Denkweise rührt daher, dass es einen Unterschied macht, ob der RMSE-Wert ein Drittel der Achswerte ausmacht oder ob das Verhältnis zwischen Achswerten und RMSE-Wert ein Zehntel ist. Folglich muss das Ziel sein, diesen Wert im Verhältnis zu den Achswerten so gering wie möglich zu halten, um die Güte des Modells und die damit verbundene Funktion zu optimieren.

Zum anderen wurde die statistische Kennzahl Root-square (R^2) verwendet. Diese wird auch das Bestimmtheitsmaß genannt und ist in der Statistik eine Kennzahl dafür, wie gut das Modell zu den Messwerten passt. Das Bestimmtheitsmaß wird durch eine Quadratsummenzerlegung ermittelt und hat im Normalfall einen Wert zwischen null und eins. Bei einem Bestimmtheitsmaß von eins sind die Residuen, sprich die Abweichungen zwischen Modell und Datenpunkten, null. Es kann also eine perfekte Beschreibung der Daten durch das Modell und die damit verbundene Funktion erfolgen. Auf der anderen Seite gibt es den Extremfall, dass das Bestimmtheitsmaß null ist. In diesem Fall eignet sich das Modell überhaupt nicht, um die Datenpunkte zu beschreiben.

$$y = a \cdot (1 - \exp(-(x - b)/c)) \quad (6.3)$$

Legende:

- a: Grenzwert der Funktion
- b: Grenze der Störungsdauer, ab der zusätzliche Einarbeitungsdauer anfällt
- c: Zeitkonstante

- x: Störungsdauer in Stunden

Beschreibung der generierten Formel

Die Formel zur Ermittlung der zusätzlichen Einarbeitungszeit in Abhängigkeit von der Störungsdauer ähnelt hinsichtlich des Funktionsverlaufs dem einer logarithmischen Funktion, jedoch war dem Autor bewusst, dass die Anwendung einer logarithmische Funktion in diesem Zusammenhang keinen Zweck haben kann. Diese Überlegung ergibt sich aus dem Umstand, dass die Funktionswerte bei einer Logarithmusfunktion bei Fortschreiten in X-Richtung, wenn auch nur geringfügig, steigen und keinen endgültigen Grenzwert erreichen. Mit der in Formel 6.3 angeführten Funktion kann in allgemeiner Form die Ermittlung des Grenzwertes, ab dem eine zusätzliche Einarbeitungszeit anfällt, durchgeführt werden. Für diesen Vorgang muss dem MP der Grenzwert der maximalen Einarbeitungsdauer angegeben werden. Diese Vorgaben können mittels der Auswertungen, welche aus den untersuchten Vortriebsdaten generiert werden, durchgeführt werden.

Aus der Sicht des Verfassers dieser Arbeit kann bei einer optimalen Anpassung der Parameter von Formel 6.3 an die Gegebenheiten des Projekts folgender Mehrwert sowohl für die AN - Seite als auch für AG - Seite gezogen werden. Sobald die Ursache der Unterbrechung des Vortriebs beseitigt und die Dauer der Stillstände ermittelt wurde, kann man die Dauer der Einarbeitung prognostizieren. Dies kann auf der einen Seite helfen, die verschiedenen Logistikketten sowie dem Bohrprozess zuspieldende Arbeiten schneller an die neuen Umstände anpassen zu können. Auf der anderen Seite ist eine schnellere Ermittlung eines Teils der Bauverzögerung, welche sich durch die Einarbeitung ergibt, möglich. In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, dass dadurch Bauzeitpläne bzw. Bauzeittabellen schneller fortgeschrieben bzw. aktualisiert werden können. Aus der Sicht des Verfassers ist eine direkte Verknüpfung der Formel mit den Vortriebsklassen nicht gegeben. Eine derartige Kopplung ist jedoch auch bei einem Großteil der gesichteten Berechnungsverfahren der Literatur, welche im Zuge der Grundlagenermittlung dieser Arbeit durchgeführt wurde, nicht ersichtlich.

Der in den Kapiteln 6.1.1 bis 6.1.5 iterativ entwickelte Algorithmus zur Berechnung der Einarbeitungszeit in Abhängigkeit von der Störungsdauer wird im folgenden Kapitel 6.2 praktisch angewendet und auf seine Tauglichkeit für den praktischen Einsatz geprüft. Durch die unterschiedlichen Projekte ergeben sich natürlich auch differenzierte Rahmenbedingungen und damit unterschiedliche Daten, die jedoch alle mit ein und dem demselben Algorithmus bearbeitet werden sollen.

6.2 Datenauswertung

6.2.1 Projekt A – Vortrieb 1

Für das in *Forschungsbericht – Beschreibung und Analyse von ausgewählten Projekten hinsichtlich des Einarbeitungseffekts [5]* beschriebene Projekt A Vortrieb 1 wird die Datenauswertung in dieser Diplomarbeit nicht veröffentlicht. Der zuvor genannte Tunnelvortrieb wird in *Forschungsbericht – Beschreibung und Analyse von ausgewählten Projekten hinsichtlich des Einarbeitungseffekts [5]* analysiert und ausgewertet.

6.2.2 Projekt A – Vortrieb 2

Für das in *Forschungsbericht – Beschreibung und Analyse von ausgewählten Projekten hinsichtlich des Einarbeitungseffekts [5]* beschriebene Projekt A Vortrieb 2 wird die Datenauswertung in dieser Diplomarbeit nicht veröffentlicht. Der zuvor genannte Tunnelvortrieb wird in *Forschungsbericht – Beschreibung und Analyse von ausgewählten Projekten hinsichtlich des Einarbeitungseffekts [5]* analysiert und ausgewertet.

6.2.3 Projekt B

Für das in *Forschungsbericht – Beschreibung und Analyse von ausgewählten Projekten hinsichtlich des Einarbeitungseffekts [5]* beschriebene Projekt B wird die Datenauswertung in dieser Diplomarbeit nicht veröffentlicht. Der zuvor genannte Tunnelvortrieb wird in *Forschungsbericht – Beschreibung und Analyse von ausgewählten Projekten hinsichtlich des Einarbeitungseffekts [5]* analysiert und ausgewertet.

6.2.4 Projekt C

Für das in Kapitel 5.3 beschriebene Projekt werden im folgenden Abschnitt die Maschinendaten ausgewertet und analysiert.

Bauzeitpläne

In Abb. 6.5 ist der IST-Bauzeitplan zu sehen, welcher aus den durch die TVM aufgezeichneten Daten erstellt werden kann. Aus dem zuvor genannten Diagramm ist abzulesen, dass es während des gesamten Projekts insgesamt nur sechs erwähnenswerte Vortriebsunterbrechungen gab. Diese sind auch durch einen vertikalen Abschnitt in Abb. 6.5 zu identifizieren.

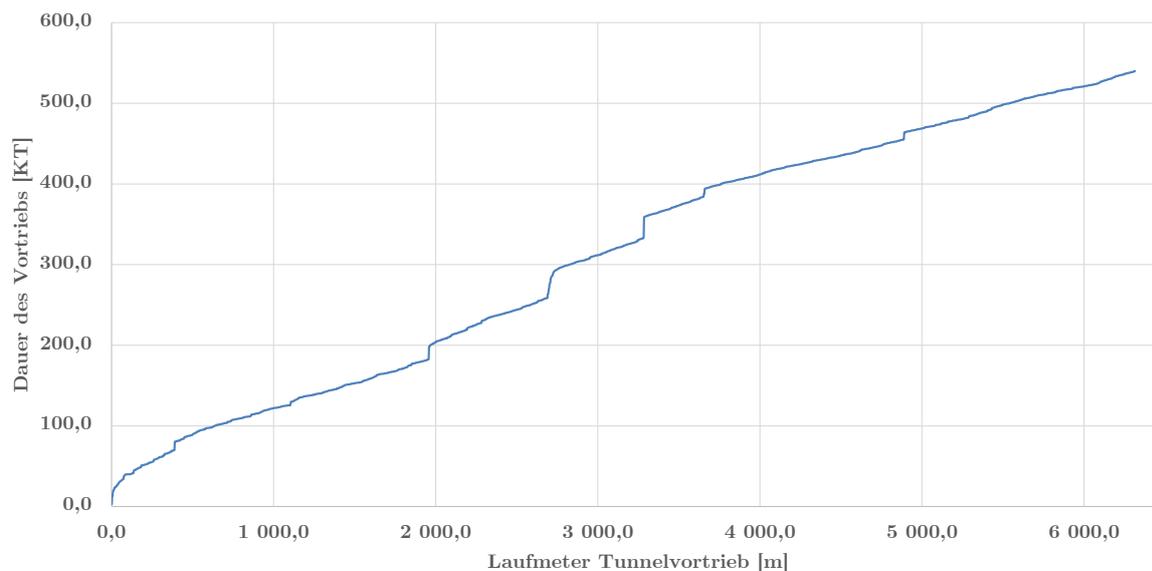


Abb. 6.5: Projekt C, Ist Bauzeitplan – Variante 1

Des Weiteren ist zu sagen, dass die Steigung des Verlaufs im zuvor genannten Diagramm über die gesamte Dauer des Vortriebs gleichmäßig ist. Durch diesen Umstand kann man auf ein eingespieltes Vortriebsteam schließen. Die Mehrheit der Vortriebsunterbrechungen hat sich im Bereich zwischen Tunnelmeter 2.000 und 4.000 ergeben.

Anhand Abb. 6.9, welche unter anderem den geologischen Längenschnitt des Projekts enthält, ist ersichtlich, dass sich die meisten Störungen im Bereich des granitischen Gneises, des Augengneises, des gebänderten Gneises und des migmatischen Gneises ergeben. Die in diesem Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse können auch aus Abb. 6.6 generiert werden. Diese hat der Verfasser nur zur leichteren Lesbarkeit aufgrund der den verschiedenen Lesern unterschiedlich gewohnten Darstellung beigelegt.

Der nächste Schritt der Datenanalyse ist die Einteilung der Hubzeiten in Klassen. Die in der Folge verwendeten Linienarten sind die gleichen wie in 6.2.1 und werden daher an dieser Stelle nicht explizit wiederholt. Tab. 6.1 und Abb. 6.7 zeigen die Einteilung der Daten sowohl in tabellarischer als auch in grafischer Form. Aus der zuvor genannten Abb. 6.7 sowie der Tab. 6.1 ist ersichtlich, dass in diesem Projekt die größte Häufigkeit in den Klassen mit der Obergrenze 100 min bzw. 140 min Hubdauer vorhanden ist.

Bemerkenswert ist an diesen Projektdaten, dass es insgesamt nur drei Vortriebsunterbrechungen gibt, die länger als 15.000 min dauern. Vergleicht man dies mit vorhergehenden Projekten, so ist ersichtlich, dass die Anzahl derselben nur 20 bis 30 % der üblichen beträgt. Die geringe Anzahl an Ausprägungen in der Klasse mit höheren Hubdauern macht es notwendig, dass alle Hübe, die eine Hubdauer größer als 4.000 min aufweisen, für die Datenanalyse herangezogen werden.

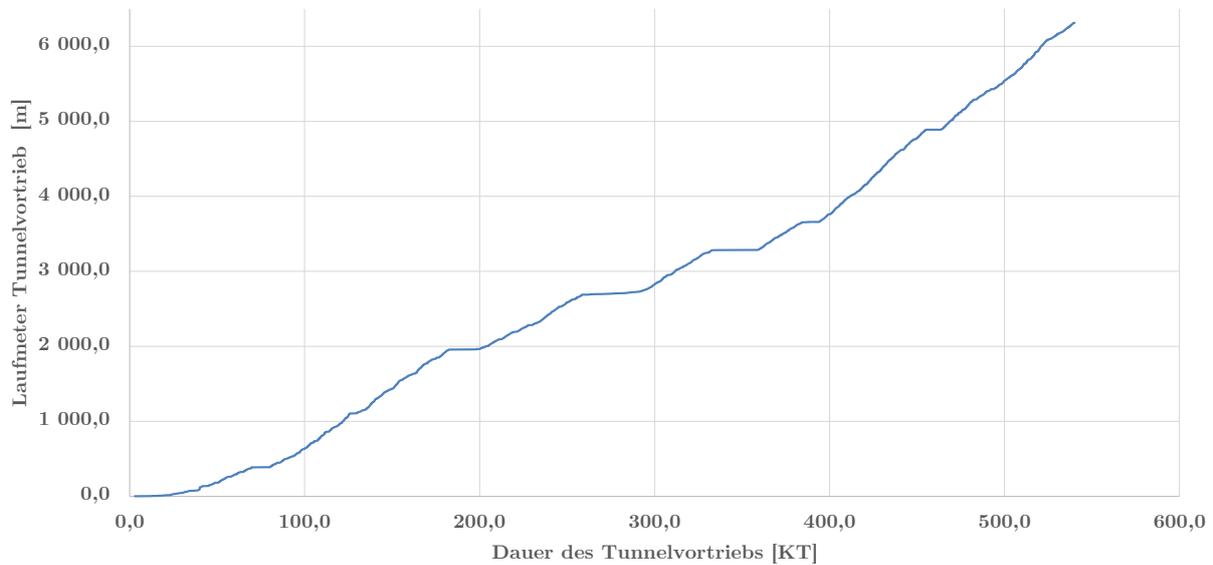


Abb. 6.6: Projekt C, Ist Bauzeitplan – Variante 2

Tab. 6.1: Projekt C, Tabelle Klasseneinteilung Hubzeiten

| Klasse [min] | Häufigkeit | Kumuliert [%] |
|--------------|------------|---------------|
| 30 | 25 | 0,82% |
| 45 | 8 | 1,09% |
| 60 | 268 | 9,91% |
| 75 | 414 | 23,55% |
| 100 | 634 | 44,43% |
| 140 | 640 | 65,51% |
| 200 | 378 | 77,96% |
| 290 | 170 | 83,56% |
| 400 | 120 | 87,52% |
| 600 | 157 | 92,69% |
| 870 | 87 | 95,55% |
| 1.410 | 87 | 98,42% |
| 5.000 | 39 | 99,70% |
| 15.000 | 6 | 99,90% |
| 25.000 | 2 | 99,97% |
| 35.000 | 0 | 99,97% |
| 50.000 | 1 | 99,99% |
| und größer | 0 | 100,00% |

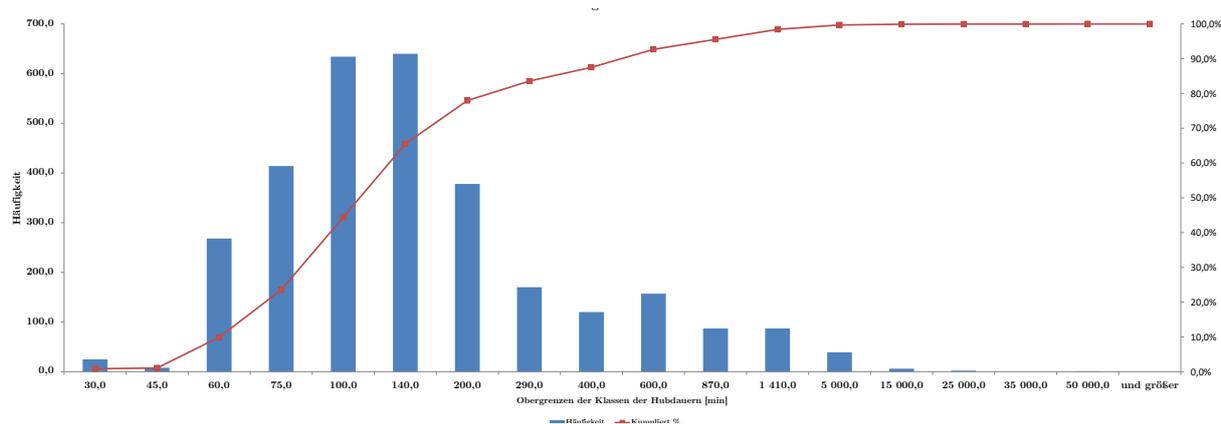


Abb. 6.7: Projekt C, Klasseneinteilung und Summenhäufigkeit der Hubdauern

In der grafischen Gegenüberstellung von Störungsdauer zu Wiedereinarbeitungszeit in Abb. 6.8 zeigt sich, dass es keinen eindeutigen Datentrend gibt und daher auch die Anpassung der Formel 6.3 an die Stichprobenpunkte sich als problematisch erweist.

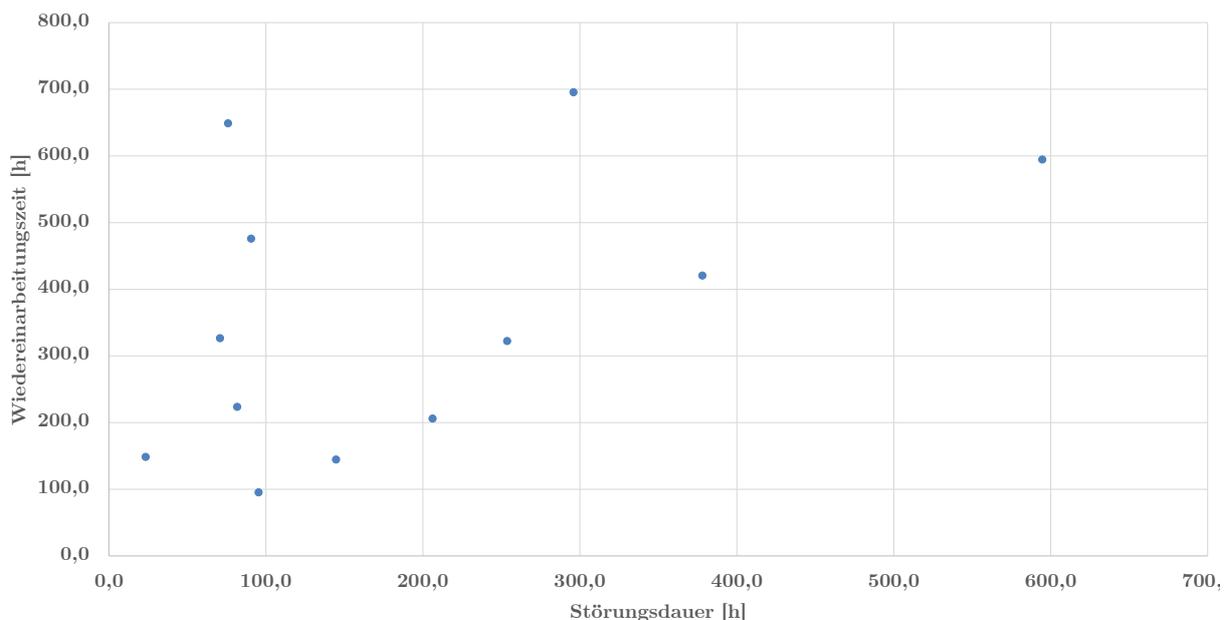


Abb. 6.8: Projekt C, Gegenüberstellung Störungsdauer – Wiedereinarbeitungszeit – [über 4.000 min Hubdauer]

In weiterer Folge ist der Verfasser daran interessiert, ob die Dauer der Vortriebsunterbrechung in einem Zusammenhang mit dem räumlichen Standort der TVM steht, sprich ob die dauernde Belastung der TVM während des Vortriebs die Störungsdauern mit fortschreitender Vortriebsstrecke erhöht. Anhand Abb. 6.9 ist ersichtlich, dass die Streuung bei diesem Projekt sehr groß ist und damit keine Aussage getätigt werden kann.

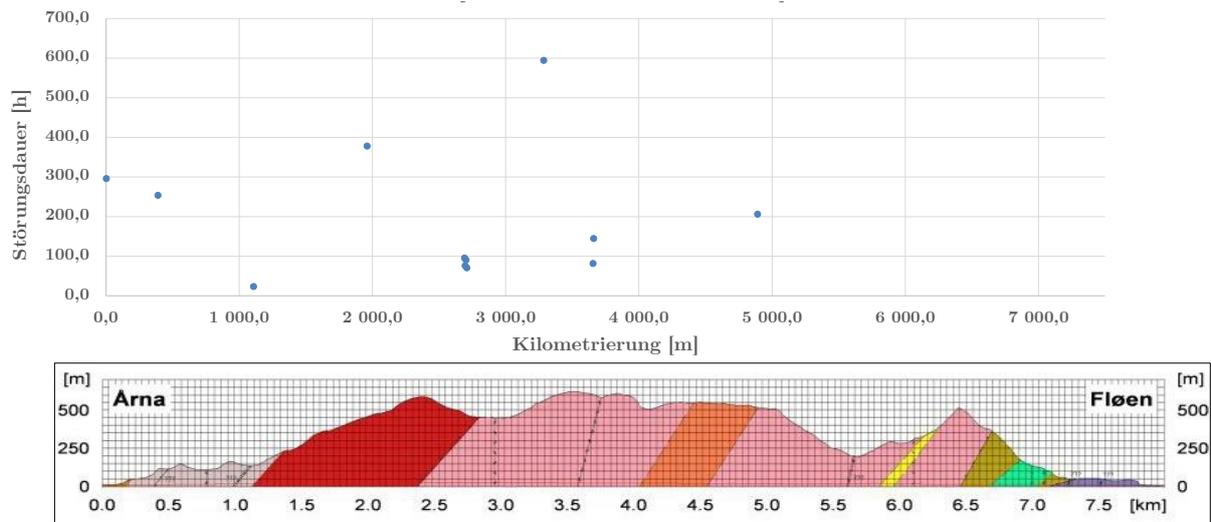


Abb. 6.9: Projekt C, Gegenüberstellung Kilometrierung – Störungsdauer – [über 4.000 min Hubdauer]

In der folgenden Auflistung sind die statistischen Kennzahlen sowie die Parameter a, b und c für die Formel 6.3 angeführt:

- a = 1.800 Stunden
- b = -345,4 Stunden
- c = 2.400 Stunden
- RMSE = 182.4 Stunden
- $R^2 = 0,2281$

In graphischer Form ist das Ergebnis der Anpassung in Abb. 6.10 ersichtlich.

Anhand des Ergebnisses der Parameter ist zu erkennen, dass sich die entwickelte Formel zur allgemeinen Beschreibung der Daten aufgrund zu großer Streuungen des Datensatzes in diesem Projekt nicht eignet. Diese Behauptung wird durch die Tatsache bestätigt, dass sich ein negativer Grenzpunkt, ab dem keine zusätzliche Einarbeitungszeit anfallen würde, ergibt.

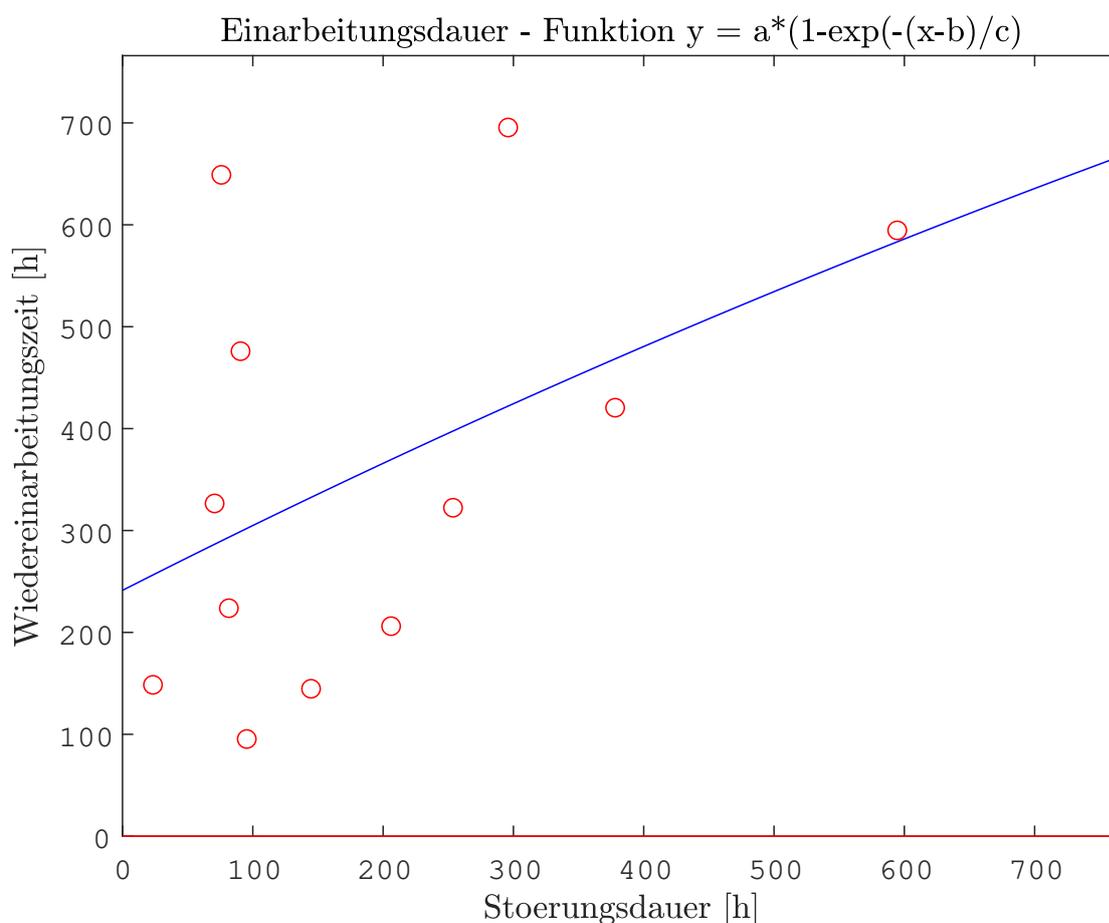


Abb. 6.10: Projekt C, Anpassung – Störungsdauer – Wiedereinarbeitungszeit

6.2.5 Projekt D

Die Daten des in Abschnitt 5.4 vorgestellten Projekts werden im Folgenden genauer behandelt.

Bauzeitpläne

In dem in Abb. 6.11 ersichtlichen Diagramm sind die Daten, welche während des Tunnelvortriebs aufgezeichnet wurden, in Form des IST-Bauzeitplans dargestellt.

Bei einer genaueren Betrachtung des Diagramms fällt auf, dass es zu Beginn des Vortriebs gravierende Stillstände und Vortriebsunterbrechungen gab. Diese sind im Diagramm anhand vertikal verlaufender Abschnitte ersichtlich. Die Gründe für einen suboptimalen Vortrieb zu Beginn sind auf unterirdische Höhlen sowie Störungszonen zurückzuführen. Diese sind jedoch im Zuge der Vortriebsarbeiten unumgänglich und müssen durchörtert werden.

Des Weiteren ist in Abb. 6.11 zu sehen, dass die Neigung der Kurve mit zunehmender Vortriebsstrecke abflacht. Dies lässt auf einen immer besser eingespielten Vortrieb schließen. Im Verlauf der Arbeiten ist ersichtlich, dass es im Vergleich zum Beginn des Vortriebs nur mehr kurze Unterbrechungen der Vortriebsarbeiten gibt. In Abb. 6.12 ist der gleiche Inhalt ersichtlich, da die Achsen nur gegeneinander vertauscht sind. Dies hat der Verfasser dieser Arbeit angedacht, um den Lesern eine gewohnte Lesbarkeit der Diagramme zu ermöglichen.

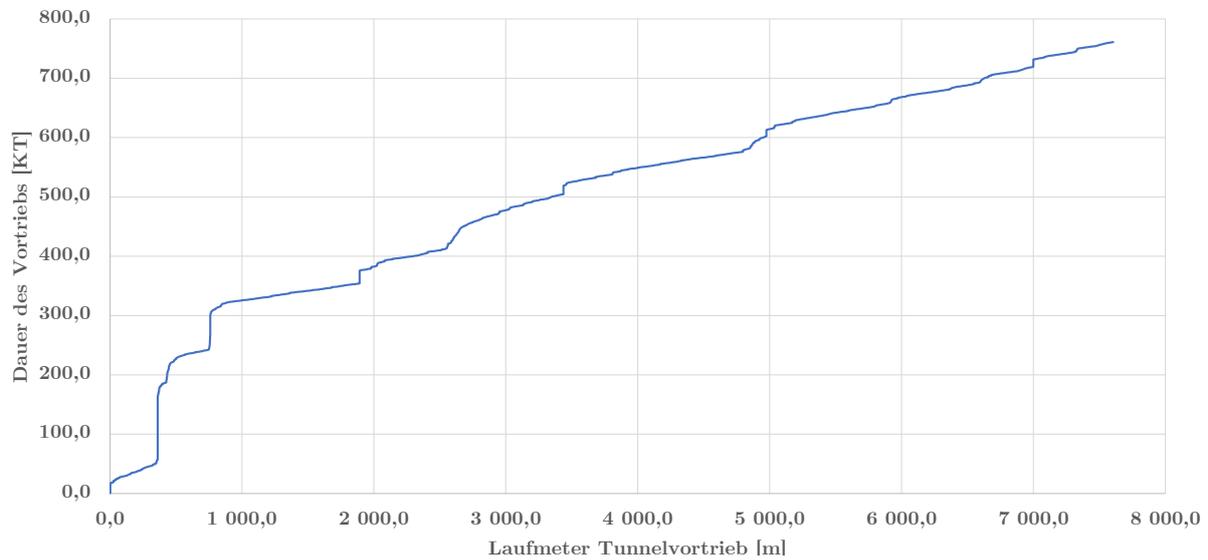


Abb. 6.11: Projekt D, Ist Bauzeitplan – Variante 1

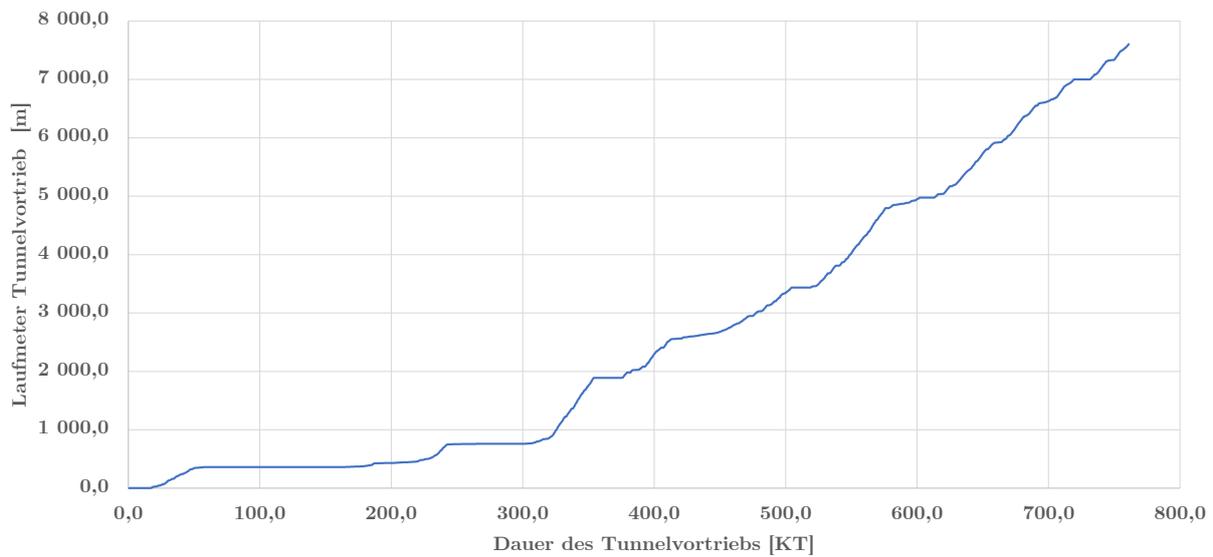


Abb. 6.12: Projekt D, Ist Bauzeitplan – Variante 2

Im weiteren Verlauf der Datenanalyse sollten die Hubzeiten in Klassen eingeteilt werden. Dies ist jedoch aufgrund folgender Aufzeichnungsmodalitäten dieses Projekts nicht möglich, denn die Datenaufzeichnung erfolgt jeweils nach 12 Stunden und nicht nach einem einzelnen Hub. Dies führt dazu, dass die Anzahl der unter 12 Stunden andauernden Hubzeiten nicht quantifizierbar und somit eine Darstellung in einem Balkendiagramm nicht sinnvoll ist. Aus diesem Grund hat sich der Verfasser entschlossen, die Tabelle sowie die grafische Darstellung der Hubdauerklassifizierung, wie sie in den vorhergehenden Projekten ersichtlich ist, für dieses Projekt nicht abzubilden. Aufgrund der bereits erwähnten ungünstigen Aufzeichnung der Daten während des Vortriebs und der geringen Anzahl an Datenpunkten im Bereich der länger andauernden Vortriebsunterbrechungen ist es notwendig, alle Vortriebsunterbrechungen über 4.000 min Dauer zur Verifizierung der Daten heranzuziehen. Dieser Umstand ist in Abb. 6.13 zu sehen.

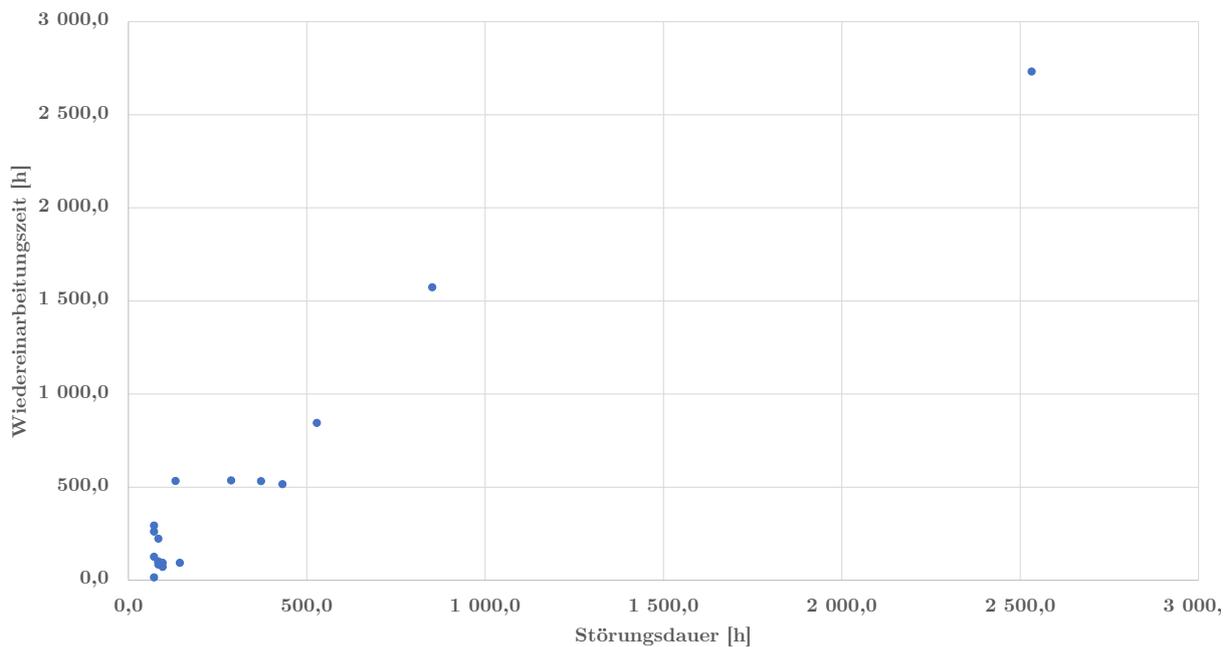


Abb. 6.13: Projekt D, Gegenüberstellung Störungsdauer – Wiedereinarbeitungszeit – [über 4.000 min Hubdauer]

Aus Abb. 6.13 lässt sich jedoch eine lineare Beziehung zwischen Störungsdauer und Wiedereinarbeitungszeit ermitteln.

In weiterer Folge ist der Verfasser daran interessiert zu ermitteln, ob die Dauer der Vortriebsunterbrechung in einem Zusammenhang mit dem räumlichen Standort der TVM steht, sprich ob die dauernde Belastung der TVM während des Vortriebs die Störungsdauern mit fortschreitender Vortriebsstrecke erhöht. Anhand Abb. 6.14 ist ersichtlich, dass die Mehrheit der Vortriebsunterbrechungen sich in einer annähernd identen Höhe der Störungsdauer befindet. Bis auf einen Ausreißer gibt es mit zunehmender Strecke des Vortriebs keine Unterbrechungen, die außerhalb des gewohnten Bereichs liegen und damit eine Abnutzung der Maschine mit fortschreitender Vortriebsdauer anzeigen.

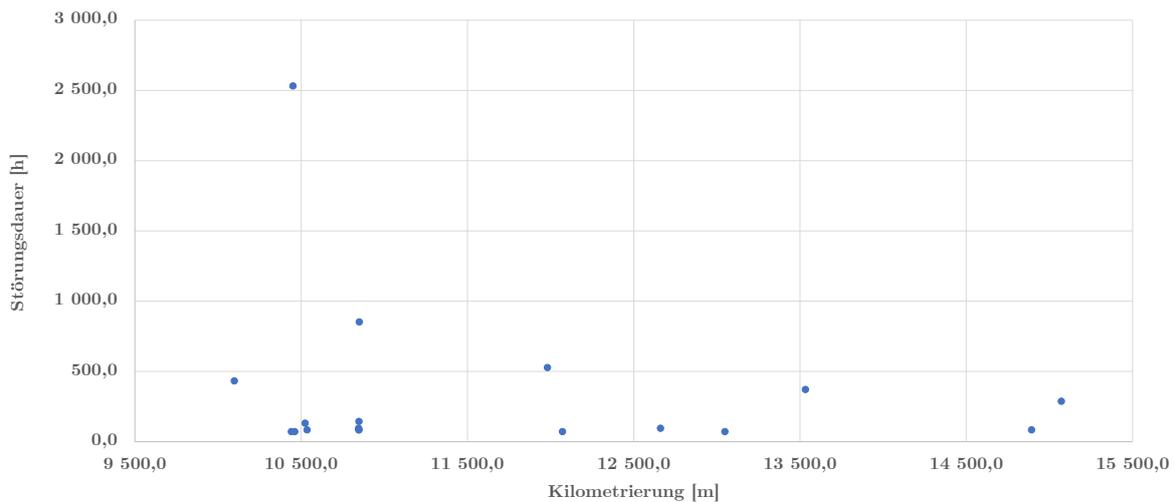


Abb. 6.14: Projekt D, Gegenüberstellung Kilometrierung – Störungsdauer – [über 4.000 min Hubdauer]

Im Folgenden werden nun die Parameter der Formel 6.3 manuell festgelegt und die zu ermittelnden Parameter durch die Einpflegung der Daten in ein MP ermittelt. Im Zuge der Anpassung wurden die Kennzahlen RMSE und R^2 als Qualitätsmesser des Modells verwendet. Durch die Auswertung im MP wird klar, dass die Formel 6.3 als verallgemeinertes Modell zur Beschreibung der Daten der TVM bei diesem Projekt geeignet ist. In der folgenden Auflistung sind die statistischen Kennzahlen sowie die Parameter a , b und c für die Formel 6.3 angeführt:

- $a = 2.700$ Stunden
- $b = 31,45$ Stunden
- $c = 1.120$ Stunden
- $RMSE = 168,2$ Stunden
- $R^2 = 0,9385$

In graphischer Form ist das Ergebnis der Anpassung in Abb. 6.15 ersichtlich.

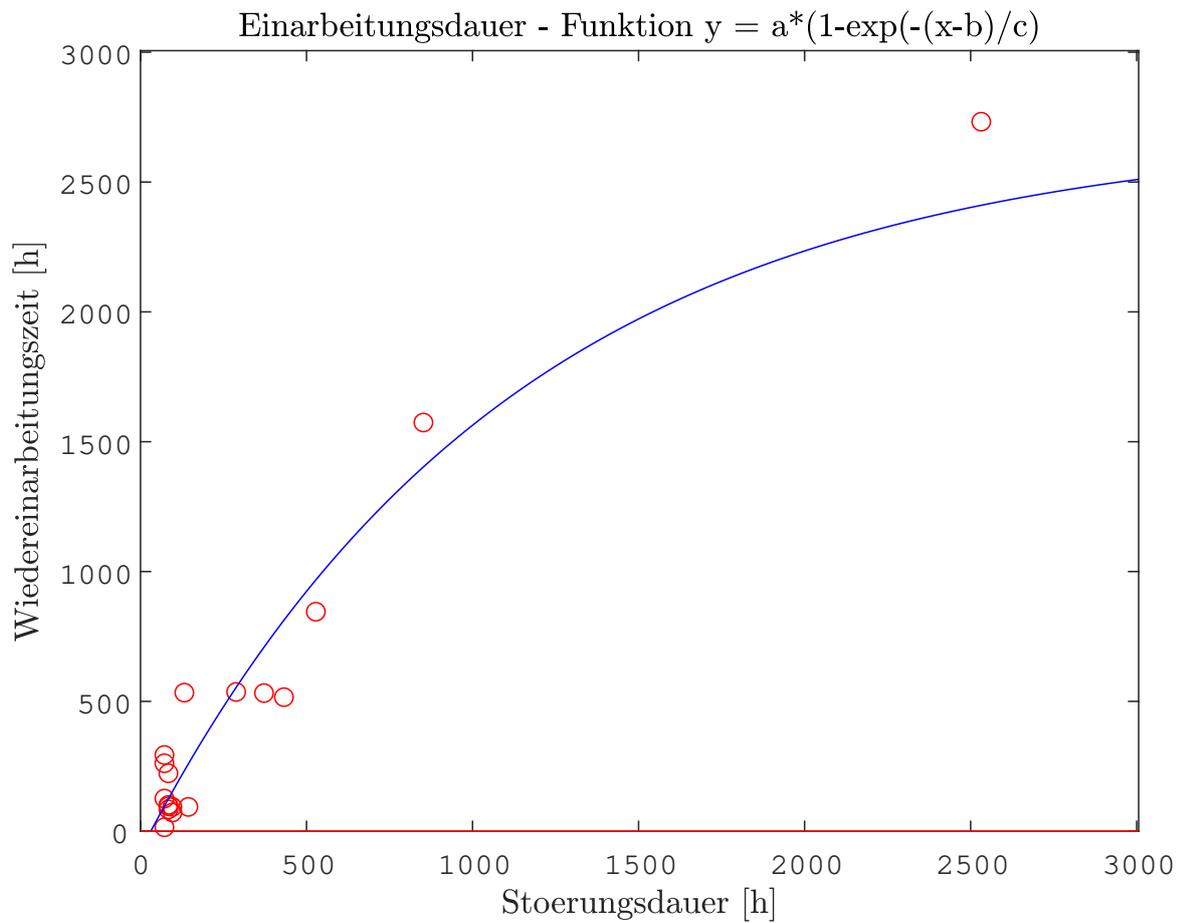


Abb. 6.15: Projekt D, Anpassung – Störungsdauer – Wiedereinarbeitungszeit

Anhand der Ergebnisse der Parameter ist zu erkennen, dass die entwickelte Formel zur allgemeinen Beschreibung der Daten bei diesem Projekt gut geeignet ist.



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

Kapitel 7

Fazit

In diesem Kapitel wird das Resümee über den Einarbeitungseffekt bezüglich der untersuchten Vortriebsdaten gezogen. Des Weiteren wird über die Funktionalität der während der Ausarbeitung dieser Arbeit entwickelten Formel 6.2 ein Urteil gebildet. Um die Möglichkeit der Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden alle verwendeten Daten in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt. Dadurch möchte der Verfasser dieser Arbeit den Lesern einen Überblick über die Gegebenheiten der Daten darlegen und damit auch die Schwierigkeiten bei der Ausarbeitung dieser Forschungsaufgabe aufzeigen. Im Anschluss werden die Forschungsfragen beantwortet und ein Ausblick gegeben.

7.1 Zusammenfassung des Einarbeitungseffekts bei maschinellen Tunnelvortrieben

Die Einarbeitung im maschinellen Tunnelbau und die daraus generierbaren wirtschaftlichen Vorteile bei einer Baustellenabwicklung sind bei weitem nicht so tiefgehend untersucht und erforscht, wie das bereits im Bereich des zyklischen Tunnelbaus erfolgt ist. An dieser Stelle sei unter anderem auf die einzelnen Modelle zur Berechnung der Einarbeitung aus Kapitel 4.5 verwiesen. Diese Berechnungsansätze sind alle in jenen Jahren entstanden, als der maschinelle Tunnelbau, sprich der Einsatz von TVMs sich weder auf dem heutigen Entwicklungsstand noch auf dem Stand der heutigen Anwendungshäufigkeit befand.

Des Weiteren ist anzufügen, dass die grundlegenden Ansätze bei manchen Berechnungsformen aus der Automobilindustrie bzw. aus anderen produzierenden Teilen der Wirtschaft stammen, die mit dem maschinellen Tunnelbau nur bedingt vergleichbar sind. Diese Aussage beruht auf dem Umstand, dass zum Beispiel in der Autoindustrie sehr viele Parameter zu Beginn der Produktion festgelegt sind. Dies macht einen wesentlichen Unterschied zwischen einer konventionell produzierenden Industrie und dem maschinellen Tunnelbau aus. Da die Einarbeitung im maschinellen Tunnelbau viele Ursachen haben kann, ist es notwendig, die Weiterentwicklung der zuvor genannten Berechnungsansätze in der nächsten Zeit voranzutreiben.

Die Gründe für die Einarbeitung und die damit in Verbindung stehenden zeitlichen und monetären Auswirkungen sind untereinander eng vernetzt und die Veränderung einer Ursache kann sich auf eine Vielzahl damit in Kontakt stehender Effekte auswirken. Aus diesem Grund ist es essentiell, nicht nur eine Ursache isoliert für die Erhöhung und Verkürzung der Einarbeitungsphase zu sehen. An dieser Stelle ist es wichtig, die Thematik der Einarbeitung immer im Kontext von mehreren verschiedenen Ursachen zu betrachten.

Je nach Aufzeichnungsgenauigkeit und der Streuung der Daten konnte bei den untersuchten Vortriebsdaten eine mehr oder weniger genaue Systematik des Datenverlaufs erkannt werden. Im Bereich von kurzen Vortriebsunterbrechungen ist bei der Mehrheit der untersuchten Datensätze ein linearer Zusammenhang zwischen Störungsdauer und Wiedereinarbeitungszeit festzustellen gewesen. Im Bereich von lange andauernden Vortriebsunterbrechungen ging diese Linearität in eine relativ rasch abflachende Exponentialfunktion über. Die während der Ausarbeitung

dieser Arbeit entwickelte Formel zur allgemeinen Beschreibung der Datengrundlage kann bei entsprechender Angleichung der Variablen den Datenpool verhältnismäßig genau beschreiben. In diesem Zusammenhang wirkt sich natürlich die Streuung der Daten bei den verschiedenen Vortriebsdatensätzen massiv auf die Genauigkeit aus. Daher kann zusammengefasst werden: Je höher die Streuung der Daten ist, desto weniger genau können die Daten des Projekts durch die Formel 6.2 auf Seite 79 in allgemeiner Weise beschrieben werden.

7.2 Gegenüberstellung der analysierten Vortriebsdaten

Um eine möglichst allgemeingültige Aussage über die Datengrundgesamtheit der Projekte tätigen zu können, hat der Verfasser alle verwendeten Datenpunkte in Abb. 7.1 vereinigt. Die Datenpunkte von ein und demselben Vortriebsdatensatz sind mit derselben Farbe hervorgehoben. Dadurch erhofft sich der Autor dieser Arbeit, eine allgemein gültige Aussage über den Trendverlauf der Daten aller Projekte machen zu können.

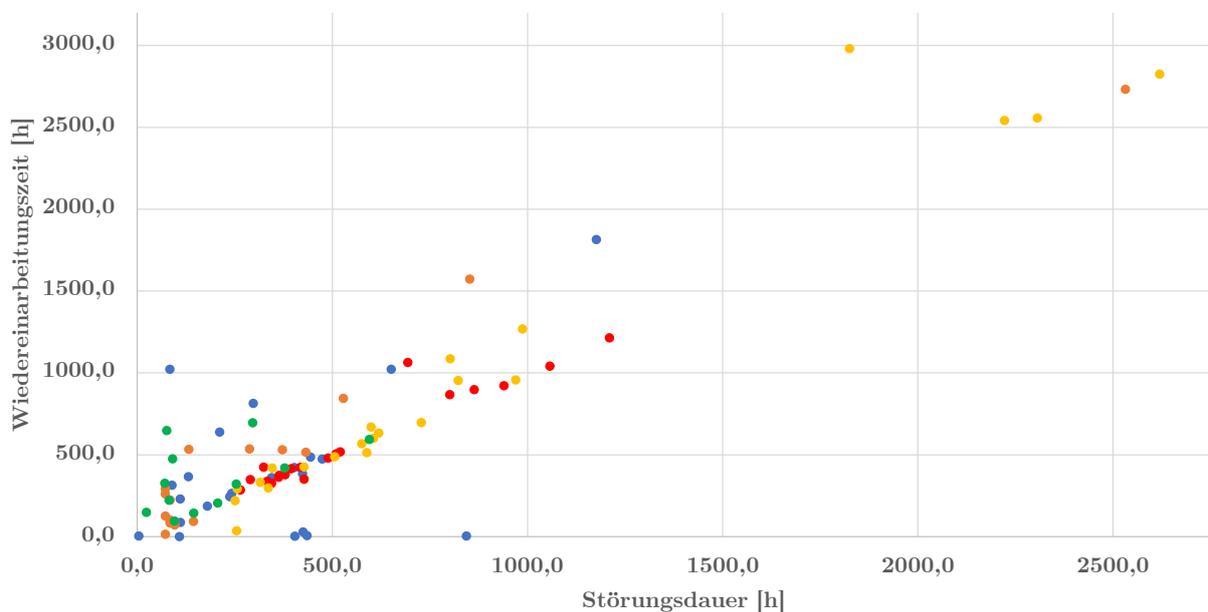


Abb. 7.1: Zusammenstellung aller untersuchten Datenpunkte, Störungsdauer – Wiedereinarbeitungszeit, [über 4.000 min Hubdauer]

Anhand der Auswertung in Abb. 7.1 ist ersichtlich, dass im Bereich der kürzer andauernden Störungen eine höhere Streuung der Datenpunkte vorherrscht als im Bereich der höheren Störungsdauern. An dieser Stelle ist festzuhalten, dass im Bereich der höheren Störungsdauern keine hohe Dichte an Datenpunkten ausgeprägt ist. Des Weiteren kann gesagt werden, dass im Bereich der kürzeren Störungsdauern ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Dauer der Störung und der Wiedereinarbeitungszeit nach einer Störung ersichtlich ist. Bis zu einer Dauer von zirka 1.250 Stunden Störungsdauer ist der zuvor erwähnte annähernd lineare Zusammenhang ersichtlich. Der Verfasser vertritt an dieser Stelle die Meinung, dass sich die Funktion zwischen den Achsen von Störungsdauer und Wiedereinarbeitungszeit an eine Horizontale annähert. Diese Obergrenze für den Wert der Wiedereinarbeitungszeit liegt laut der Einschätzung des Verfassers zwischen 1.250 und 1.500 Stunden. Die weiteren Datenpunkte, die in Abb. 7.1 im Bereich zwischen 2.000 und 2.500 Stunden zu sehen sind, sieht der Verfasser als Ausreißer an. Diese Behauptung

lässt sich auch leicht begründen, da eine sehr lange Vortriebsunterbrechung, sprich die gegen unendlich geht, nicht eine unendlich lange Einarbeitungszeit aufweisen kann.

7.3 Beantwortung Forschungsfragen

Durch die gesichteten und ausgewerteten Vortriebe soll im Anschluss eine Beantwortung der Forschungsfragen, welche in Abschnitt 1.2 angeführt sind, erfolgen. An dieser Stelle merkt der Verfasser an, dass die Forschungsfragen so umfangreich wie möglich beantwortet werden, jedoch die Schlüsse und Behauptungen nicht auf jedes Bauvorhaben übertragbar sind, da jedes Tunnelbauprojekt seine eigenen Rahmenbedingungen hat.

Kann bei den Datenerhebungen eine allgemeine Tendenz zwischen der Dauer der Vortriebsunterbrechung und der Wiedereinarbeitungszeit erkannt werden?

Im Allgemeinen kann man bei den meisten untersuchten Daten grundsätzlich zwei Phänomene beobachten. Bei kurzen Dauern von Vortriebsunterbrechungen ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Dauer der Vortriebsunterbrechung und der Dauer der Wiedereinarbeitung zu erkennen. Dies ist auch in Abb. 7.2 zu sehen. In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass die Untersuchung von länger andauernden Vortriebsunterbrechungen sich als schwierig gestaltet hat, da es nur eine sehr geringe Anzahl davon pro Datensatz gibt bzw. diese aus Sicht des Auftragnehmers und Auftraggebers natürlich möglichst gering gehalten werden sollte oder es sich um Datenausreißer handelt. Es konnte bei länger andauernden Vortriebsunterbrechungen jedoch keine Linearität mehr zwischen der Dauer der Vortriebsunterbrechung und der Dauer der Wiedereinarbeitung ausgemacht werden. Je nach Projekt und Datensatz war zu erkennen, dass die Wiedereinarbeitungszeit im Vergleich zur zugehörigen Vortriebsunterbrechung rapide abfiel.

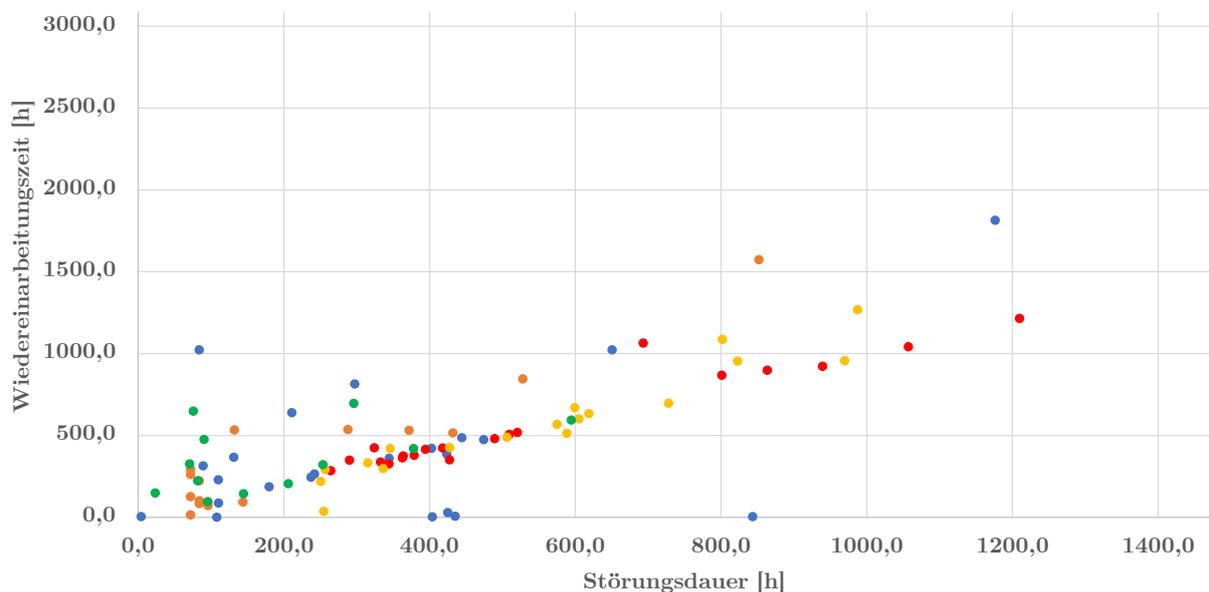


Abb. 7.2: Zusammenstellung aller untersuchten Datenpunkte, Störungsdauer – Wiedereinarbeitungszeit, [über 4.000 min Hubdauer]

Ist es möglich, die Zeit von Stillständen zu verkürzen bzw. künftige Stillstandsdauern zu minimieren?

Ja, bei Anwendung der richtigen Maßnahmen können Stillstände vermindert bzw. auch zukünftige Stillstandsdauern minimiert werden. Der Autor unterscheidet hier bewusst zwischen Ursachen

für Stillstände, die vor dem Vortriebsbeginn bekannt sind, und Ursachen für Stillstände, die nicht bekannt sind bzw. plötzlich auftreten. Dies zeigt, dass es im Tunnelbau notwendig ist, auf unvermittelt auftretende Probleme reagieren zu können. Die Maßnahmen zur Verminderung von Stillständen in Abb. 3.1 auf S. 43 sind in „Maßnahmen – konstruktiv“ und „Maßnahmen – baubetrieblich bzw. bauablauftechnisch“ eingeteilt. Dies soll verdeutlichen, dass es eine Fülle von Maßnahmen gibt, die keine konstruktive Wirkung haben, jedoch auf den Tunnelbauprozess große zeitliche Auswirkungen haben können.

Bei der Durchsicht der in Kapitel 5 und 6 behandelten Datensätze ist dem Verfasser aufgefallen, dass des Öfteren einige zeitlich ungünstig gewählte Vermessungs-, geologische Erkundungs-, Revisions- und Nachbauarbeiten von Leitungen durchgeführt wurden, die den Vortrieb verhältnismäßig lange stilllegen.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass eine parallele Ausführung von zum Beispiel verhältnismäßig kleinen Wartungsarbeiten während einer Vermessungsarbeit einen zeitlichen Vorteil für den Vortrieb mit sich bringen würde. Des Weiteren schlägt der Autor dieser Arbeit einen prophylaktischen Wechsel des Bohrwerkzeuges während der Dauer von Stillständen vor. Dieser Vorgang ist natürlich nur sinnvoll, wenn die Verschleißparameter des Werkzeugs einen baldigen Wechsel prognostizieren. Durch diese Arbeitsweise könnten die Stillstandszeiten der einzelnen Vorgänge von einem linearen, hintereinander erfolgenden Ablauf zu einem parallelen Ablauf überführen und somit einige zukünftige Stillstände des Vortriebs und in diesem Zusammenhang anfallende Kosten vermeiden.

Haben konsekutive Störungen bei einem Bauvorhaben Auswirkungen auf den temporären Einarbeitungseffekt?

Bei konsekutiven Störungen und den darauf folgenden Einarbeitungszeiträumen kommt es darauf an, in welchem zeitlichen Abstand sie nacheinander auftreten. Wenn die Störungsreihenfolge nur sehr kurze zeitliche Zwischenräume aufweist, hat sich gezeigt, dass die Ursache der zweiten Störung auch mit der Ursache der ersten Störung in Verbindung stehen kann und damit die Einarbeitung beeinflusst. Andererseits ist es auch möglich, dass zeitnah nach einer geologischen Störung eine maschinentechnische Störung bzw. ein Gebrechen folgt. Aus diesem Grund kann laut der Meinung des Verfassers keine pauschale Aussage getroffen werden.

Welche Verfahren der Literatur sind zur Berechnung des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau geeignet?

Es wurden die in der ersten Spalte von Tab. 7.1 ersichtlichen Verfahren untersucht und anschließend mit den Zeichen +, \approx , – bewertet. In horizontaler Richtung der Tabelle reihen sich die Begriffe Verfahrensname, Aufwand der Berechnung, Nutzen und Genauigkeit aneinander.

Die Bewertung der Verfahren wurde in folgender Form durchgeführt:

- „+“ für einen geringen Aufwand, hohen Nutzen und hohe Genauigkeit
- „ \approx “ für einen durchschnittlichen Aufwand, Nutzen und eine durchschnittliche Genauigkeit
- „–“ für einen hohen Aufwand, geringen Nutzen und eine geringe Genauigkeit

Das Verfahren nach *Drees/Spranz* ist im Hinblick auf die Berechnung relativ einfach zu handhaben, da bei diesem Verfahren die Berücksichtigung der Einarbeitung nur innerhalb der ersten drei Wiederholungen über eine prozentuelle Minderung des Aufwands erfolgt. Hinsichtlich des Nutzens erhält das Verfahren eine negative Bewertung, da der Nutzen einer pauschalen Aussage über die Aufwandsminderung sehr gering ist. Die Kategorie der Genauigkeit wurde ebenfalls negativ bewertet, da bei diesem Algorithmus unabhängig von den Vorkommnissen immer derselbe prozentuelle Wert nur für die ersten drei Wiederholungen berücksichtigt wird. Aus der Sicht des

Tab. 7.1: Berechnungsmöglichkeiten des Einarbeitungseffekts im maschinellen Tunnelbau

| Verfahren nach | Aufwand der Berechnung | Nutzen | Genauigkeit |
|----------------|------------------------|--------|-------------|
| Drees/Spranz | + | - | - |
| Körner | + | ≈ | ≈ |
| Platz | + | + | ≈ |
| Lang | + | - | ≈ |

Verfassers ist dieses Verfahren nicht geeignet, die Individualitäten des Tunnelbaugeschehens für die Berechnung des Einarbeitungseffekts abzudecken.

Die zweite Methode zur Berechnung des Einarbeitungseffekts ist das Verfahren nach *Körner*. Der Aufwand für die Berechnung ist verhältnismäßig gering, da man nur zwei Parametern zu bestimmen hat. Diese haben aus der Sicht des Verfassers eine starke Schwankung, da sich die Arbeitsteilung zwischen manueller und maschineller Arbeit ständig ändert. Dasselbe Bild ergibt sich bei der Lernfähigkeit der Kolonne, da sich diese mit jedem Schichtwechsel stark ändert, da in manchen Schichten mehr erfahrene Leute arbeiten und in einer anderen Schicht weniger erfahrene Mitarbeiter. Diese Gründe führen dazu, dass der Autor für die Kategorien Nutzen und Genauigkeit diesem Verfahren eine negative Bewertung ausspricht. Er ist der Meinung, dass dieses Verfahren zur Berechnung des Einarbeitungseffekts im Tunnelbau nicht geeignet ist.

Im Verfahren nach *Platz* wurde der Aufwand für die Berechnung positiv bewertet, da nur eine verhältnismäßig geringe Anzahl von Parametern zu bestimmen ist. Aus der Sicht des Verfassers ist die Möglichkeit der Berechnung des Einarbeitungsfaktors auf zwei verschiedene Arten ein Vorteil. An dieser Stelle ergibt sich für den Verfasser ein positiver Nutzen der Formel. Hinsichtlich der Genauigkeit wurde das Berechnungsverfahren von Platz nur durchschnittlich bewertet, da der Faktor c in den Varianten der Formel enthalten ist. Dieser Parameter beschreibt die Lernfähigkeit, die aus der Sicht des Verfassers sehr schwer messbar gemacht werden kann, da sich, wie beim Verfahren nach *Körner* erwähnt, die Lernfähigkeit mit jedem Schichtwechsel ändert. Aus der Sicht des Verfassers ist das Verfahren nach Platz zur Berechnung des Einarbeitungseffekts geeignet.

Das vierte Verfahren zur Berechnung des Einarbeitungseffekts ist das Verfahren nach *Lang*. Der Aufwand zur Berechnung dieses Formalismus ist wie bei den zuvorgehenden Verfahren verhältnismäßig gering und wurde daher positiv bewertet. Das Problem stellen die in diesem Zusammenhang noch fehlenden Kennzahlen dar, die zur Berechnung des Algorithmus für die verschiedenen Tätigkeiten notwendig sind. Diese Werte sind derzeit nur für Betonarbeiten, Mauerarbeiten sowie Schalarbeiten vorhanden. Aus diesem Grund wurde der Nutzen für den Tunnelbau negativ bewertet. Aus diesem Grund wurde der Nutzen für den Tunnelbau negativ eingeschätzt. Die Genauigkeit des Formalismus nach *Lang* wurde ähnlich der Formel von Platz mit einem Durchschnitt bewertet, da der Verfasser der Meinung ist, dass die Lernfähigkeit messtechnisch sehr schwierig erfasst werden kann bzw. die Erfassung einen sehr hohen Aufwand nach sich zieht.

7.4 Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder – Handlungsempfehlung

An dieser Stelle hält der Verfasser fest, dass für eine konstruktive und zielführende Aussage bezüglich der Einarbeitung, sofern diese aufgrund der vielen Einflussgrößen und Individualitäten der unterschiedlichen Vortriebsdatensätze überhaupt möglich ist, eine noch größere Anzahl an Vortriebsdaten zu untersuchen ist. Es ist an dieser Stelle unumgänglich, eine möglichst große Grundgesamtheit an Daten aufzubauen. Diese Datengrundlage könnte in anonymisierter Form

in einem international zugänglichen Datenpool für Tunnelbauunternehmen zugänglich gemacht werden. In dieser Datenbank sollte es weiters möglich sein, nach geologisch äquivalenten Bauvorhaben zu suchen und diese in die Kalkulation für die kommenden Projekte mit einfließen zu lassen. Sinnvoll erscheint dem Autor unter anderem eine Aufteilung nach geologischen Eigenschaften, um eine möglichst gute Anpassung des Maschinenkonzepts und der anderen Baustellenspezifika an die zu erwartenden Gegebenheiten zu ermöglichen.

Für diese Arbeit wurden insgesamt ca. 95 km maschineller Tunnelvortrieb gesichtet. Für die Auswertung konnten jedoch nur Datensätze von Projekten im Umfang von zirka 61,1 Tunnelkilometern herangezogen werden. Die Differenz zwischen gesichteter und ausgewerteter Streckenlänge ergibt sich dadurch, dass manche Datensätze in einer für die Arbeit nicht passenden Skalierung aufgezeichnet waren. Aus der Sicht des Verfassers wäre es sinnvoll, ein international festgelegtes Schema der Datenerhebung und Datenaufzeichnung einzuführen.

Literatur

- [1] *Verordnung des Bundesministers für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz über Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Baustellen und auf auswärtigen Arbeitsstellen (Bauarbeiter-schutzverordnung – BauV)*. Wien: BMASK (Bundesministerium für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz), 2017 09 05.
- [2] D. A. für unterirdisches Bauen (DAUB) Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) und Arbeitsgruppe Tunnelbau der Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen FGU Fachgruppe für Untertagbau Schweizerischer Ingenieurund Architekten-Verein. *Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen*. Forschungsber. Köln: Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V., 1997. 16 S.
- [3] Bauverlag BV GmbH. *Ulriken Tunnel – erster TBM-Vortrieb für einen Bahntunnel in Norwegen*. URL: https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel_Ulriken_Tunnel_erster_TBM-Vortrieb_fuer_einen_Bahntunnel_in_Norwegen_2584842.html (Zugriff am 05.04.2020).
- [4] Bauverlag BV GmbH. *WLAN mit „Tunnelblick“ Baustellenkommunikation über Voice-over-WLAN*. URL: https://www.this-magazin.de/artikel/tis_WLAN_mit_Tunnelblick_3136959.html (Zugriff am 05.03.2020).
- [5] T. Bisenberger und F. Hochwimmer. *Forschungsbericht – Beschreibung und Analyse von ausgewählten Projekten hinsichtlich des Einarbeitungseffekts*. Technische Universität Wien – Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement – Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 2020. 40 S.
- [6] Chemie-Schule. *Schlagwetter*. URL: <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Schlagwetter> (Zugriff am 06.11.2019).
- [7] B. Chylik. „Vergleich nationaler und internationaler Vertrags- und Vergütungsmodelle im maschinellen Tunnelvortrieb“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien – Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement – Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 2018.
- [8] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V. *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen*. Forschungsber. Köln: Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V., 2010. 48 S.
- [9] G. Drees und D. Spranz. *Handbuch der Arbeitsvorbereitung im Bauunternehmen*. 1. Auflage. Wiesbaden: Bauverlag, 1976. ISBN: 978-3-762-50597-6.
- [10] G. Girmscheid. *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau*. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2008. ISBN: 978-3-433-01852-1.
- [11] G. Goger. *Bauverfahren im Tunnel- und Hohlrumbau*. Technische Universität Wien – Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement – Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 2017. 308 S.

- [12] G. Goger. „Wechsel der Vortriebsklassen und deren Einfluss auf die Vortriebsgeschwindigkeit“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien – Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, 1997.
- [13] K. Hechenblaickner. *Contract Management STRABAG AG: Internal working papers*. 2013. 14 S.
- [14] Herrenknecht AG. *Gripper-TBM*. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/gripper-tbm/> (Zugriff am 27.10.2019).
- [15] Herrenknecht AG. *Gripper-TBM*. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/doppelschild-tbm/> (Zugriff am 29.10.2019).
- [16] K. Hofer. „Empfehlung zur Dokumentation von ungeplanten Stillständen im maschinellen Tunnelvortrieb“. Diplomarbeit. Technische Universität Graz, 2014.
- [17] S. Höhne. *Behaviorismus*. URL: <http://www.lernpsychologie.net/lerntheorien/behaviorismus> (Zugriff am 09.12.2019).
- [18] Joint Venture Züblin-Jäger. *Kesalon*. URL: <https://www.facebook.com/ZublinJagerJV/photos/a.1202249209832706/1792406880816933/?type=3&theater> (Zugriff am 05.03.2020).
- [19] K. Körner. *Beitrag zum Problem der Einarbeitung*. 1982. Heft 75.
- [20] A. Lang. *Ein Verfahren zur Bewertung von Bauablaufstörungen und zur Projektsteuerung*. 1. Auflage. Düsseldorf: VDI Verlag, 1988. ISBN: 318-1-48504-7.
- [21] W. Leitner. „Baubetriebliche Modellierung der Prozesse maschineller Tunnelvortriebe im Festgestein“. Dissertation. Universität Innsbruck, 2004.
- [22] K. Müller und G. Goger. *Der gestörte Bauablauf - Praxisleitfaden zur Ermittlung von Mehrkosten und Bauzeitverlängerung*. 1. Auflage. Wien: Linde Verlag Ges.m.b.H., 2016. ISBN: 978-3707319521.
- [23] *ÖNORM B 2003-2:2005 01 01: Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm, Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb*. Wien: Austrian Standards, Jan. 2005.
- [24] *Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen Werkvertragsnorm*. Wien: Austrian Standards Institute, 2013 03 15.
- [25] *Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm - Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb*. Wien: Austrian Standards Institute, 2005 01 01.
- [26] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene und Verkehr. *Projektierungsrichtlinie – Kontinuierlicher Vortrieb von Strassentunnel*. Forschungsber. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene und Verkehr, 2003. 36 S.
- [27] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (Hrsg.) *Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb*. Forschungsber. Salzburg: Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2013. 49 S.
- [28] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (Hrsg.) *Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb*. Forschungsber. Salzburg: Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2008. 42 S.
- [29] H. Platz. „Über die Zeitermittlung auf Baustellen, dargestellt am Beispiel von Vortriebsdaten des konventionellen Tunnelbaus“. Dissertation. Technical University of Munich, 1989.
- [30] D. Schmidberger. „Auswirkung von oftmaligen Unterbrechungen auf den baubetrieblichen Ablauf von Tunnelbaustellen“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien – Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, 2000.

- [31] J. A. Schmitt. „Spannungsverformungsverhalten des Gebirges beim Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen mit Schild“. Dissertation. Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2008.
- [32] R. Stempkowski. „Leistungsabweichungen“. In: *Handbuch Claim-Management – Rechtliche und bauwirtschaftliche Lösungsansätze zur Abwicklung von Bauprojekten für Auftraggeber und Auftragnehmer*. Hrsg. von K. Müller und R. Stempkowski. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wien: LINDE VERLAG Ges.m.b.H., 2015, S. 292–321. ISBN: 978-3-7073-2355-9.
- [33] R. Stempkowski. „MKF-Nachweisführung bei Leistungsstörungen“. In: *Netzwerk – Bau* 8 (1 2013), S. 4.
- [34] R. M. Wachter. „Der Einarbeitungseffekt bei mechanischen Tunnelvortrieben“. Dissertation. Universität Innsbruck, 2001.
- [35] Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. Industriegewerkschaft Bauen – Agrar – Umwelt. *Fliesen-, Platten- und Mosaiklegerhandwerk, Wand- und Bodenbeläge im Dünnbettmörtel Kleinformate*. 2004. 13 S.
- [36] M. Zöhrer. „Alternative Leistungsvergütungsmodell für den maschinellen Tunnelbau“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien – Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement – Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 2019.