Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

Herstellung und Einsatz von Tübbingen

Production and use of lining segments

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

unter der Leitung von

Em.O.Univ.Prof. DI Dr.techn. Dr.h.c. Hans-Georg JODL

und als verantwortlichen mitwirkenden Assistenten

Univ.Ass. DI Leopold WINKLER

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement

von

Dieter Plank, BSc

0925714

A-7423 Neustift an der Lafnitz 167

Wien, am 18.11.2015

Am Ziele deiner Wünsche wirst du jedenfalls eines vermissen:
Dein Wandern zum Ziel.
(Marie von Ebner-Eschenbach)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich während meinem Studium sowie bei Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Em.O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans-Georg Jodl, der durch seine praxisbezogenen Vorlesungen meine Kenntnisse über den Tunnelbau erweitert und mir die Chance zur Erstellung dieser Diplomarbeit gegeben hat.

Weiters möchte ich mich bei Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Leopold Winkler bedanken, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist.

Großer Dank gebührt natürlich auch meinen Freunden und Studienkollegen, die mich immer unterstützt haben.

Besonders bedanke ich mich bei meiner Freundin Sabrina. Sie hat nie die Geduld mit mir verloren und mich stets motiviert.

Abschließend möchte ich meinen Eltern und meiner Familie danken, ohne deren finanzielle und moralische Unterstützung dieses Studium nicht möglich gewesen wäre.

Verzeichnisse

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG III

VERZEICHNISSE IV

Inhaltsverzeichnis IV
Abkürzungsverzeichnis VI
Abbildungsverzeichnis VII
Tabellenverzeichnis VIII
Formelverzeichnis VIII

KURZFASSUNG IX

ABSTRACT X

1 EINLEITUNG 1

1.1 Zielsetzung 1
1.2 Aufbau der Diplomarbeit 2

2 ALLGEMEIN 3

2.1 Definition 3
2.2 Geschichtliche Entwicklung 4
2.3 Einsatzbereich 4
2.4 Konstruktionsarten der Tunnelauskleidung 9
2.5 Allgemeine Anforderungen 12
2.6 Funktionale Anforderungen 13
2.7 Geometrie der Tübbinge 18
2.8 Fugenarten 26
2.9 Verbindungsmittel 28
2.10 Abdichtung 30
2.11 Toleranzen 32

3 STATISCHE BERECHNUNG UND PLANUNG 36

3.1 Einwirkungen 36
3.2 Berechnung der Tübbinge 41

4 HERSTELLUNG 42

4.1 Schalung 45
4.2 Betondeckung und Bewehrung 46
4.3 Betonieren 47
4.4 Nachbearbeitung 51
4.5 Wärmebehandlung 52
4.6 Ausschalen und Zwischenlagerung 53
4.7 Nachbehandlung und Finishing 54
4.8 Qualitätssicherung 55

5 LAGERUNG UND TRANSPORT 57

5.1 Lagerung 57

5.2 Transport 59
6 EINBAU 61
6.1 Maschinentechnische Anforderungen 62
6.2 Einbaukontrollen und –prüfungen 63
6.3 Ringspaltverfüllung 63
7 FEHL- UND SCHADSTELLEN 67
7.1 Fehlstellen und Schäden im Herstellungsprozess 67
7.2 Schäden bei Transport und Lagerung 71
7.3 Schäden im Bauzustand 73
7.4 Instandsetzung 76
8 GEGENÜBERSTELLUNG VOR-ORT- UND WERKPRODUKTION 82
8.1 Vor-Ort-Produktion in einer Feldfabrik 82
8.2 Werkproduktion 83
8.3 Berechnungstool TKT für eine Gegenüberstellung 85
9 ZUSAMMENFASSUNG 98
10 LITERATURVERZEICHNIS 100
11 NORMEN 103
12 EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG 104

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BGBl	Bundesgesetzblatt
BV	Betonverflüssiger
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen
€	Euro
ETBM	Erweiterungstunnelbohrmaschine
FDM	Finite Differenzen Methode
FEM	Finite Elemente Methode
FM	Fließmittel
h	Stunde
KFG	Kraftfahrgesetz
km	Kilometer
KSM	Kombinationsschildmaschine
m	Meter
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
MA	mengenabhängig
Mio.	Millionen
NÖT	Neue Österreichische Tunnelbaumethode
ÖBV	Österreichische Bautechnik Vereinigung
ÖBGL	Österreichische Baugeräteliste
ÖGG	Österreichische Gesellschaft für Geomechanik
ÖVBB	Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik
P	pauschal
PP	Polypropylen
QM	Qualitätsmanagement
sald.	saldiert
SM	Schildmaschine
stat.	stationär
Tab.	Tabelle
TBM	Tunnelbohrmaschine
Tk	Transportkosten
TKT	Tübbingkalkulationstool
to	Tonnen
Tsd.	Tausend
TVM	Tunnelvortriebsmaschine
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
W/Z-Wert	Wasser/Zement-Wert
WU-Beton	Wasserundurchlässiger Beton
ZA	zeitabhängig
zus.	zusätzlich

Abbildungsverzeichnis

Abb.2.1: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen [DAU10] ... 6
Abb.2.2: Konstruktionsart eines einschaligen und zweischaligen Systems [MAI11] ... 10
Abb.2.3: Tübbinge für ein- und zweischalige Konstruktionen [MAI11] ... 11
Abb.2.4: Anordnung der Fugen [BET13] ... 18
Abb.2.5: Darstellung einer Innenabwicklung [BET13] ... 21
Abb.2.6: Kurvenfahrt mit konischen Ringen [BET13] ... 23
Abb.2.7: Hexagonaler Tübbingausbau [MAI11] ... 25
Abb.2.8: Beispiele für Nachgiebigkeitselemente [POD10] ... 26
Abb.2.9: Ebene Längsfuge, konvex-konvexe Fuge und konkav-konvexe Fuge [MAI11] ... 27
Abb.2.10: Schrägschraube [BET13] ... 29
Abb.2.11: Gebogene Schraube mit beidseitiger Mutter [BET13] ... 29
Abb.2.12: Beispiele von Querschnitten verankerter Dichtrahmen [@DAT] ... 31
Abb.2.13: Fugenausbildung [PLA15] ... 32
Abb.2.14: Referenzgrößen am Tübbing [RIL09] ... 33
Abb.3.1: Abheben eines Tübbings mittels einer Vakuumsaugplatte [@HFW] ... 38
Abb.3.2: Abheben eines Tübbings mittels Tübbinggreifers [@DEV] ... 38
Abb.3.3: Ungünstige Stapellagerung der Tübbinge [BET13] ... 39
Abb.3.4: Biegerisse zufolge Versatz [WIN00] ... 40
Abb.4.1: Beispiel einer Produktionsplanung [BET13] ... 42
Abb.4.2: Prozessablauf einer Umlauffertigung [PLA15] ... 44
Abb.4.3: Standfertigung [@HFW] ... 45
Abb.4.4: Nennmaß der Betondeckung [RIL09] ... 46
Abb.4.5: Bewehrungskorbherstellung [PLA15] ... 47
Abb.4.6: Abschätzung der Frischbetontemperatur [SPR07] ... 48
Abb.4.7: Nachbearbeitung der Betonoberfläche [@HFW] ... 52
Abb.4.8: Temperatur-/Zeitverlauf der Wärmebehandlung [JOD04] ... 53
Abb.4.9: Pressrahmen auf der Ausrüstungsstraße [PLA15] ... 54
Abb.5.1: Stehende Tübbinglagerung [@VOI] ... 58
Abb.5.2: Liegende Tübbinglagerung [@HFW] ... 59
Abb.5.3: Beladen eines Tunnelzugs [PLA15] ... 60
Abb.6.1: Ausschnitt einer Tunnelvortriebsmaschine [@HER] ... 61
Abb.6.2: Ringspaltverfüllung [BET13] ... 64
Abb.7.1: Nesterbildung [PLA15] ... 68
Abb.7.2: Unzulässige Lunkerbildung in der Dichtungsnut [RIL09] ... 68
Abb.7.3: Beschädigung [PLA15] ... 70
Abb.7.4: Einschnürung [PLA15] ... 70
Abb.7.5: Zangenschaden [PLA15] ... 72
Abb.7.6: Temporäre Verschlüsse [PLA15] ... 73
Abb.7.7: Abplatzung im Konusbereich [BAB12] ... 75
Abb.7.8: Vorbereitete Fehlstelle beim Konus [PLA15] ... 78
Abb.7.9: Oberflächenschutzsystem [PLA15] ... 78
Abb.7.10: Verankerte Fehlstelle [PLA15] ... 79

Abb.7.11: Instand gesetzte Fehlstelle [PLA15] 79
Abb.7.12: Einteilung der Bereiche eines gedichteten Tübbings [RIL09] 80
Abb.8.1: Einarbeitungszeit des Personals [PLA15] 84
Abb.8.2: Eingabe der projektspezifischen Werte [PLA15] 86
Abb.8.3: Berechnung der Differenzkosten stat. Werk [PLA15] 89
Abb.8.4: Übersicht der Transportkosten [PLA15] 92
Abb.8.5: Kostengegenüberstellung [PLA15] 93
Abb.8.6: Zeitabhängige Differenzkosten stat. Werk [PLA15] 94
Abb.8.7: Mengenabhängige und pauschale Minderkosten stat. Werk [PLA15] 95
Abb.8.8: Beispiel zeitabhängige Differenzkosten stat. Werk [PLA15] 96
Abb.8.9: Mengenabhängige und pauschale Minderkosten stat. Werk verringert um die zeitabhängigen Differenzkosten [PLA15] 96
Abb.8.10: Differenzkosten stat. Werk am Beispiel Abb.8.2 [PLA15] 97

Tabellenverzeichnis

Tab.2.1: Definition und Beschreibung der Anforderungsklassen an das Ausbausystem [RIL09] 15
Tab.2.2: Tübbingdicke abhängig vom Ringdurchmesser [BET13] 19
Tab.2.3: Ringlänge abhängig vom Ringdurchmesser [BET13] 20
Tab.2.4: Anzahl der Segmente abhängig vom Ringdurchmesser [BET13] 20
Tab.4.1: Typische Betonzusammensetzung [BRE13] 50
Tab.7.1: Instandsetzungsmaßnahmenmatrix für ein gedichtetes Tübbingsystem [PLA15] 81

Formelverzeichnis

(2.1 Tübbingdicke) 19
(2.2 Keilform) 23
(8.1 Kubatur eines Tübbings) 87
(8.2 Transportkosten) 91
(8.3 Umlaufzeit) 91

Kurzfassung

Das Einsatzgebiet des maschinellen Vortriebs hat sich in den letzten Jahren durch die Weiterentwicklung und die Vielfalt der Tunnelvortriebsmaschinen vergrößert und stellt eine leistungsfähige Alternative zur konventionellen Tunnelbauweise dar.

Beim Einsatz von Schildmaschinen im kontinuierlichen Tunnelbau werden Betonfertigteile eingebaut, die nicht nur dem Schutz vor Verbrüchen dienen, sondern auch zur Aufbringung der Vortriebspressenkräfte benötigt werden. Diese Betonfertigteile werden Tübbinge genannt. Weitere Aufgaben der Tübbingauskleidung sind von der Konstruktionsart und den Anforderungen an den Ausbau abhängig. Daraus haben sich unterschiedliche Tübbingformen entwickelt, die in der vorliegenden Diplomarbeit genauer beschrieben werden.

Durch den hohen Anspruch an die Tübbingauskleidung sind die Anforderungen an eine sorgfältige Herstellung und Lagerung, sowie an den Transport und Einbau der Betonfertigteile sehr hoch. Während dieser Prozesse können auch Fehl- und Schadstellen auftreten, die instand gesetzt werden müssen, wenn Gebrauchstauglichkeit, Tragfähigkeit oder Dauerhaftigkeit der Tübbinge über die Nutzungsdauer nicht gewährleistet werden kann. Mögliche Schäden werden in dieser Diplomarbeit beleuchtet und Instandsetzungsmaßnahmen werden vorgeschlagen.

Die Produktion von Tübbingen kann sowohl in einem bereits bestehenden Fertigteilwerk als auch in einer Feldfabrik erfolgen. Während die Feldfabrik eigens für ein Tunnelprojekt auf dem Baustellengelände errichtet werden muss, kennzeichnet die Produktion in einem stationären Werk die hohe Anzahl an Tübbinglieferungen zur Tunnelbaustelle. Abgesehen von der hohen CO_2-Emission, die aus den Tübbingtransporten resultiert, übersteigen die Transportkosten bei längeren Tunnelprojekten durch die große Anzahl an Transporten schnell die Errichtungskosten für eine Feldfabrik. Ein Kostenvergleich wird in der vorliegenden Diplomarbeit beschrieben. Dieser soll der Abschätzung der rentableren Herstellungsvariante bereits in einer frühen Projektphase dienen.

Abstract

The field of application of mechanical tunneling has increased in recent years through the development and variety of tunneling machines and provides a capable alternative to conventional tunneling.

In mechanical tunneling with shield machines precast concrete elements are installed to protect from cavings, but are also required to apply the driving forces. These elements are also called tubbings. Other tasks of the tubbings depend on the construction type and the requirements for the segmental lining. Several types of tubbings have been developed and are described in this master thesis.

Due to the high standards of segmental lining the requirements to a careful preparation and storage of the tubbings, as well as to the transportation and installation of these pre-cast concrete elements are very demanding. During these processes damages can occur. If the serviceability, load-bearing capacity and durability during the operating life of the segmental lining can't be guaranteed, the damages have to be repaired. In this master thesis possible damages are illuminated and repair measures are proposed.

The production of lining segments can be carried out in an existing precast plant or in a field factory. While the field factory has to be established on the construction site for a specific tunneling project, the production in an existing stationary plant is characterized by a high number of tubbing deliveries. Apart from the high CO_2 emissions resulting from the shipment, transport costs exceed setting up costs of a field factory in case of longer projects soon. A cost comparison, which can be used for estimating the most profitable production variant in an early phase of the project, is described in this thesis.

1 Einleitung

Der kontinuierliche Vortrieb im Tunnelbau gewinnt aufgrund seiner Wirtschaftlichkeit immer mehr an Bedeutung. Diese Vortriebsmethode bietet einerseits eine hohe Sicherheit für die Vortriebsmannschaft, andererseits wird die Vortriebsleistung durch die Automatisierung von Arbeitsvorgängen erhöht. Die Wirtschaftlichkeit eines maschinellen Vortriebs nimmt bei homogenen Gebirgsverhältnissen mit deren Länge zu.

Im konventionellen Tunnelbau, dem Spreng- oder Baggervortrieb der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (kurz NÖT) wird das Ausbausystem Abschlag für Abschlag an die vorliegenden, geologischen Verhältnisse angepasst. Beim Einsatz einer Gripper-Tunnelbohrmaschine erfolgt die Sicherung zunächst durch Spritzbeton und dann durch eine Ortbetoninnenschale.

Im Vergleich dazu erfolgt der Ausbau im kontinuierlichen Vortrieb mit Schildmaschinen durch Betonfertigteile, den sogenannten Tübbingen. Diese werden in einem Werk hergestellt, in Segmenten zur Tunnelvortriebsmaschine transportiert und vor Ort im Schutze des Schildes zu einem Ring zusammengebaut. Der Tübbingring dient nicht nur dem Schutz der Vortriebsmannschaft, sondern auch der Abstützung der Vortriebsmaschine. Je nach Projektanforderungen und Ausbauform erhält der Tübbingring weitere Aufgaben, auf die im Laufe dieser Diplomarbeit weiter eingegangen wird.

1.1 Zielsetzung

Während der Herstellung, der Umlagerung, dem Transport, dem Einbau von Tübbingen und dem Vortrieb können zahlreiche Fehl- und Schadstellen an den Tübbingen entstehen. Im Zuge dieser Diplomarbeit sollen die wichtigsten Schadensbilder aufgezählt und mögliche Instandsetzungsmaßnahmen vorgestellt werden. Eine Instandsetzungsmaßnahmenmatrix, die es in dieser Form noch nicht gibt, soll eine Übersicht über mögliche Fehl- und Schadstellen geben und beschreiben, welche schadhaften Tübbinge ohne Instandsetzung eingebaut werden können und welche instand zu setzen oder auszuscheiden sind.

Außerdem wird die Produktion der Tübbinge in einem bestehenden Fertigteilwerk der Herstellung in einer eigens errichtenden Feldfabrik am Baustellengelände gegenüber gestellt. Ein Kostenvergleich soll in einer frühen Projektphase zur Abschätzung der rentableren Variante dienen. Die zentrale Fragestellung, nämlich wie groß die Umlaufzeit eines LKWs sein muss, sodass seine Transportkosten höher sind, als die Differenzkosten eines stationären Werks, soll abschließend beleuchtet werden.

1.2 Aufbau der Diplomarbeit

Zu Beginn dieser Arbeit werden die unterschiedlichen Tübbingkonstruktionen und Ausbauformen beschrieben, sowie die Einsatzgebiete und die unterschiedlichen Anforderungen an die Tübbingauskleidung erklärt. Anschließend folgen Bemessungs- und Planungsgrundlagen für das Tübbingdesign. Im Weiteren werden die Herstellung, die Lagerung, der Transport und der Einbau dieser Betonfertigteile beschrieben. Im Anschluss werden einige Fehl- und Schadstellen erläutert, die vom Herstellungsbeginn bis zum Einbau der Tübbinge entstehen können. In Kapitel 8 wird die Vor-Ort-Produktion mit der Werkproduktion verglichen und die Kosten gegenübergestellt. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Genderhinweis:

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

2 Allgemein

2.1 Definition

Ein Tübbing ist ein Fertigteil aus bewehrtem oder unbewehrtem Beton, Stahl oder Gusseisen und dient der Auskleidung von Stollen, Tunnel und Schächten.[1]

Ein Tübbingring wird in mehreren Segmenten hergestellt. Von der Herstellung an unterliegen diese strengen Qualitätskontrollen und besitzen nur einen kleinen Toleranzbereich hinsichtlich der Abweichung von der Geometrie. In Anbetracht der vielen Transportwege von der Herstellung bis zum Einbau eines Tübbings ist die Gefahr einer Beschädigung sehr groß. Eine sorgfältige Manipulation und Lagerung der Fertigteile kann einen hohen Aufwand an Instandsetzungsarbeiten ersparen.

Ein besonderes Kennzeichen der Tübbingauskleidung ist der hohe Anteil an Fugen: Die Ringfugen entstehen zwischen den einzelnen Ringen, die Längsfugen zwischen den einzelnen Segmenten des Tübbingrings. Aufgrund unterschiedlicher projektspezifischer Anforderungen an die Auskleidung wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Konstruktionsvarianten entwickelt, die sich einerseits aus wirtschaftlichen Aspekten und andererseits aus den geologischen und hydrologischen Randbedingungen ergaben.

Die unterschiedlichen Tübbingsysteme unterscheiden sich nach folgenden Punkten:

- Art des Ausbau (einschalig / zweischalig)
- Anforderungen
- Konstruktionsform

Die Unterscheidungen werden in den Kapiteln 2.3 bis 2.7 genauer beschrieben.

Die Stärke der Auskleidung wird durch die statischen Einwirkungen bestimmt und liegt zwischen 20 und 50 cm, wobei auch schon Dicken über 60 cm zur Anwendung gekommen sind. In erster Linie sind die Belastungen aus dem Vortrieb maßgebend. Auch Gebirgs- und Wasserdruck können die Dimensionierung stark beeinflussen. Die Breite der Tübbinge liegt zwischen 1,00 und 2,25 m. Der Trend geht allerdings zu größeren Breiten, da dadurch die Fugenlängen verkleinert und die Vortriebszeiten verkürzt werden. Allerdings führen Herstellungs- und Einbauungenauigkeiten bei größeren Tübbingbreiten in den Fugenbereichen zu konzentrierten Zwangsbeanspruchungen und in weiterer Folge zu verstärkten Abplatzungen und Rissen. Zudem nimmt die erforderliche Hublänge der Vortriebspressen zu.[2]

[1] Siehe [RIL09] Seite 4

[2] Siehe [MAI11] Seite 125

2.2 Geschichtliche Entwicklung

Beim Bau des Tower Subway Tunnels 1869 in London wurde zum ersten Mal ein Tübbing aus Gusseisen eingesetzt. Mit der Entwicklung des Betontübbings um 1930 wurde der Gusseisentübbing abgelöst, da die Rohstoffe für die Herstellung immer teurer wurden. Zu Beginn kamen Stahlbeton-Kassettentübbinge zum Einsatz, um die Ringe über die Flansche miteinander verbinden zu können. Die Form war stark an die der gusseisernen Lösung angelehnt. Erst etwas später wurde erkannt, dass die Verschraubung nur als Montagehilfe notwendig war. Der erste wasserdichte, einschalige Tübbingausbau fand 1974 beim Münchner U-Bahnbau bei der Unterquerung der Isar statt. Ab diesem Zeitpunkt kamen aufgrund der hohen Rohstoffkosten Gusseisentübbinge nur noch in Sonderbereichen des Tunnelbaus, z.B. bei Querschlägen, zum Einsatz.[3]

Im modernen Tunnelbau kommen zumeist Tübbingsysteme aus bewehrtem Beton zur Anwendung, da Stahl- oder Gusseisentübbinge nicht wirtschaftlich sind.

2.3 Einsatzbereich

Im maschinellen Tunnelbau wird ein Tübbingausbau überall dort erforderlich, wo eine Verspannung der Tunnelvortriebsmaschine (kurz TVM), zur Aufbringung der Vortriebskräfte im umgebenden Gebirge aufgrund zu geringer Gebirgsfestigkeiten nicht möglich ist. Die Tübbingauskleidung dient in diesem Fall als Widerlager, an dem sich die TVM abstützen kann. Da eine Ortbeton- bzw. eine Spritzbetonauskleidung unmittelbar kaum Festigkeiten aufweist, kommen hier zumeist Tübbingsysteme aus Beton zur Anwendung.[4]

Bedingt durch das Bauverfahren, ergibt sich beim kontinuierlichen Vortrieb eine kreisrunde Querschnittsform. Der Innendurchmesser wird durch die Anforderungen der späteren Nutzung bestimmt.[5]

Eine Tübbingauskleidung kommt bei jenen Tunnelvortriebsmaschinen zum Einsatz, bei denen die Abstützung am Tübbingring zur Aufbringung der Vortriebskräfte und des Vortriebsdrehmoments erforderlich ist. Der Tübbingausbau hat allerdings auch den Vorteil, dass der gesamte Arbeitsbereich vor Nachbrüchen geschützt ist, da der Tübbing im Schutz des Schildmantels eingebaut wird.

Im Grundwasser müssen Anforderungen an die Dichtigkeit erfüllt werden. Daher werden umlaufende Dichtungsbänder an den Fertigteilen angeordnet.

[3] Siehe [BET13] Seite 237 - 238

[4] Siehe [MAI11] Seite 129

[5] Siehe [MAI11] Seite 125

Die Tübbingauskleidung im kontinuierlichen Vortriebsverfahren hat keine Anwendungsgrenzen. Die Anforderungen an Dichtigkeit, Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit hängen von projektspezifischen Parametern ab und bestimmen die Ausführungsform der Tübbinge. Diese Anforderungen werden in den Kapiteln 2.5 und 2.6 genauer beschrieben.

Der maschinelle Tunnelvortrieb erfolgt im Vergleich zum Spreng- oder Baggervortrieb der NÖT kontinuierlich, da der Vortrieb beinahe ununterbrochen stattfindet. Zum Stillstand sollte die TVM nur während des Ringbaues und des Werkzeugwechsels am Bohrkopf kommen.

Durch die Weiterentwicklung des kontinuierlichen Tunnelbaus und die unterschiedlichen Anforderungen an die Tunnelvortriebsmaschinen haben sich viele unterschiedliche Ausführungsformen ergeben.

2.3.1 Tunnelvortriebsmaschinen[6]

In „Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen“ veröffentlicht der Deutsche Ausschuss für unterirdisches Bauen (kurz DAUB), anhand von geotechnischen und verfahrenstechnischen Kriterien Entscheidungsgrundlagen zur Wahl von Tunnelvortriebsmaschinen.
Der DAUB unterteilt die Auswahl in mehrere Schritte. Zu Beginn werden die verfahrensrelevanten geotechnischen Parameter durch Analyse des geotechnischen Berichts und des Baugrundprofils definiert. Somit kann auf das Systemverhalten des Gebirges geschlossen werden. Nun können im dritten Schritt ungeeignete Tunnelvortriebsmaschinen ausgeschlossen und der Vortrieb klassifiziert werden. Durch Analyse des Transportverhaltens des abgebauten Materials und durch Prüfung der Verwertbarkeit (Deponierbarkeit, Wiederverwertung, Separierung) des Ausbruchmaterials erfolgt eine weitere Eingrenzung geeigneter Tunnelvortriebsmaschinen. Für die Wahl eines wirtschaftlich optimalen Verfahrens wird empfohlen, den Tunnel in seinem Längsschnitt in Homogenbereiche zu unterteilen.

Grundsätzlich unterscheidet man bei Tunnelvortriebsmaschinen zwischen teilflächigen und vollflächigen Abbau des Ausbruchquerschnitts.

Eine andere Einteilung kann wie folgt erfolgen: Tunnelbohrmaschine (kurz TBM), Schildmaschine (kurz SM), Doppelschildmaschinen (kurz DSM), und Kombinationsschildmaschinen (kurz KSM). Die nachstehende Abb.2.1 zeigt die Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen und die unterschiedlichen Ausführungsformen.

[6] Siehe [DAU10] Seite 9 - 15



Abb.2.1: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen [DAU10]

2.3.1.1 Tunnelbohrmaschinen

Diese Art von Tunnelvortriebsmaschinen wird im standfesten Festgestein eingesetzt, wo keine aktive Stützung der Ortsbrust erforderlich ist. Die Tunnelbohrmaschinen können wie folgt weiter unterteilt werden:

1) Tunnelbohrmaschine ohne Schild (Gripper-TBM)

Der Einsatzbereich der Tunnelbohrmaschine ohne Schild ist im Festgestein mit mittlerer bis hoher Standzeit. Der Anpressdruck kann durch radiales Verspannen von hydraulisch angetriebenen Platten, den sogenannten Grippern, gegen das umgebende Gebirge aufgebracht werden. Die Sicherung des Gebirges erfolgt auf der Maschine weiter hinten.

2) Erweiterungstunnelbohrmaschine (ETBM)

Erweiterungstunnelbohrmaschinen finden Anwendung, wenn ein bereits bestehender Stollen aufgeweitet werden soll. Die Verspanneinrichtung befindet sich hierbei vor dem Bohrkopf, im aufzuweitenden Bereich des Stollens. Die Gripper werden gegen das Gebirge gedrückt und der Bohrkopf wird angezogen.

3) Tunnelbohrmaschine mit Schild (TBM-S)

Im Festgestein mit geringerer Standzeit wird eine Tunnelbohrmaschine mit Schild empfohlen. Hier ist es erforderlich, den Ausbau im Schutze des Schildmantels vorzunehmen. Der Anpressdruck des Bohrkopfes wird durch Abstützung der Vortriebspressen an der Tübbingauskleidung erreicht. Die Verspanneinrichtung entfällt bei dieser Form.

2.3.1.2 Doppelschildmaschinen (DSM)

Diese Schildmaschinen sind mit Vortriebspressen im ersten Maschinenteil und Gripperplatten im zweiten Maschinenteil zum Aufbringen der Vortriebskräfte ausgestattet. Der

vordere Teil kann um eine komplette Ringlänge gegenüber dem hinteren Teil ausgefahren werden. Im standfesten Gebirge werden die Vortriebskräfte von der Verspanneinrichtung aufgenommen. Da der hintere Maschinenteil fixiert ist, kann der Tübbingausbau während des Bohrvorgangs stattfinden. Im für die Verspanneinrichtung nicht ausreichend standfesten Baugrund erfolgt der Vortrieb durch Abstützung der Vortriebspressen am zuletzt gebauten Tübbingring. Vorderer und hinterer Maschinenteil werden für diesen Betriebsmodus zusammengefahren.

2.3.1.3 Schildmaschinen (SM)

Schildmaschinen werden in Lockerböden eingesetzt und können je nach Ausbildungsform sowohl oberhalb als auch unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzt werden. Zu unterscheiden sind Schildmaschinen mit vollflächigem (SM-V) und teilflächigem (SM-T) Abbau. Meist müssen der den Hohlraum umgebende Boden und die Ortsbrust durch weitere Maßnahmen gestützt werden. Durch die Art der Stützung werden Schildmaschinen weiter unterteilt:

1) Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (SM-V)

   a) Schildmaschinen ohne Stützung der Ortsbrust (SM-V1)

Weist die Ortsbrust eine ausreichende Standfestigkeit auf, kann auf eine Stützung verzichtet werden. Im nachbrüchigen Festgestein wird ein weitgehend geschlossener Bohrkopf verwendet. Die Vortriebskräfte werden durch Abstützung am zuletzt gebauten Tübbingring aufgebracht.

   b) Schildmaschinen mit mechanischer Stützung (SM-V2)

Bei dieser Ausführungsform wird die Ortsbrust durch Stützplatten, die an den Öffnungen des Schneidrads angeordnet sind, gestützt. Die mechanische Ortsbruststützung kann jedoch nur als zusätzliche Sicherung betrachtet werden, da die Anwendung dieser Vortriebsform gezeigt hat, dass keine nennenswerte Stützung erzielt werden kann. Aus diesem Grund werden diese Schneidräder kaum noch eingesetzt.

   c) Schildmaschinen mit Druckluftstützung (SM-V3)

Schildmaschinen mit Druckluftstützung kommen unterhalb des Grundwasserspiegels zur Anwendung, vor allem wenn dieser nicht abgesenkt werden kann oder darf. Das Wasser wird durch Druckluftbeaufschlagung verdrängt. Hier ist der gesamte Tunnel unter Druck zu setzen, alternativ besitzt die Schildmaschine eine Druckwand. Auf jeden Fall sind separate Schleusen für Materialaustrag und Personen vorzusehen. Arbeiten unter Druckluft sind außerordentlich gefährlich. Daher müssen besondere Anforderungen hinsichtlich Feuer-, Unfall- und Arbeitsschutz berücksichtigt werden.

d) Schildmaschinen mit Flüssigkeitsstützung (SM-V4)

Die Ortsbrust wird durch eine unter Druck stehende Flüssigkeit gestützt. Als Flüssigkeit wird meist eine Bentonitsuspension verwendet. Die Abbaukammer ist durch eine Druckwand gegen den Tunnel abgeschlossen. Über einen Luftpolster, der hinter der Tauchwand angeordnet ist, kann der Stützdruck geregelt werden. Das abgebaute Material vermischt sich mit der Suspension und wird dann abgepumpt. Durch Separation wird die Suspension vom Material befreit und kann für die Stützung wiederverwendet werden. Für Reparaturarbeiten und Abbauwerkzeugwechsel wird die Stützflüssigkeit durch Druckluft ersetzt, damit ein Zustieg über Schleusen in die Abbaukammer erfolgen kann. Die Stützflüssigkeit bildet an der Ortsbrust undurchlässige Membrane, die eine Stützung durch Druckluft erlauben. Im standfesten Gebirge kann der Flüssigkeitsschild auch im offenen Modus mit Wasser als Fördermedium betrieben werden.

e) Schildmaschinen mit Erddruckstützung (SM-V5)

Die Stützung der Ortsbrust erfolgt durch Aufbau des Erddrucks. Dieser entsteht durch einen Brei aus abgebautem Boden und einem Konditionierungsmittel, wie Schaum, Bentonit oder Polymeren. Über eine Förderschnecke wird nur so viel Material abtransportiert, dass der verbleibende Brei die Ortsbrust stützt. Gesteuert wird der Druck also über die Förderschnecke. Die Abbaukammer ist wiederum mit einer Druckwand vom Tunnel abgeschlossen. Über Reibung der Schnecke kann der Druck zwischen Tunnel und Abbaukammer abgebaut werden.

2) Schildmaschinen mit Teilflächenabbau (SM-T)

a) Schildmaschinen ohne Stützung (SM-T1)

Diese Maschinen werden bei standfesten Lockerböden eingesetzt und bestehen nur aus einem Schildmantel und dem Abbauwerkzeug. Über Förder- oder Kratzbänder wird der Boden abtransportiert.

b) Schildmaschinen mit mechanischer Teilstützung (SM-T2)

Die Vortriebsmaschinen sind durch Bühnen vertikal unterteilt. Auf jeder Ebene bildet sich eine Böschung zur Ortsbrustsicherung aus. Der Abbau erfolgt per Hand oder maschinell. Aufgrund der Gefahr von zu großen Setzungen und wirtschaftlichen Aspekten werden diese Maschinen kaum eingesetzt.

c) Schildmaschinen mit Druckluftstützung (SM-T3)

Um die Maschinen der Bauart SM-T1 und SM-T2 auch unter Grundwasser einsetzen zu können, ist eine Druckluftbeaufschlagung notwendig. Daher wird entweder der ganze Tunnel unter Druckluft gehalten oder die Maschine erhält eine Druckwand. Ähnlich wie bei

der Vollschnittschildmaschine werden hier Schleusen für Personen und Material vorgesehen. Auch die Anforderungen an die Arbeitssicherheit bei Arbeiten unter Druckluft müssen hier berücksichtigt werden.

d) Schildmaschinen mit Flüssigkeitsstützung (SM-T4)

Dieses Vortriebsverfahren hat sich nicht bewährt und wird heute nicht mehr verwendet. Die Ortsbrust wird mittels einer Stützflüssigkeit gestützt. Der Boden wird mechanisch oder mittels Hochdruckdüsen abgebaut, der Abbau kann jedoch nur ungenügend gesteuert und kontrolliert werden.

2.3.1.4 Kombinationsschildmaschinen (KSM)

Aufgrund der oft stark wechselhaften Baugrundverhältnisse bei Tunneln kommt es zu einer Kombination der Verfahrenstechniken und die Schildmaschinen werden entsprechend anpassbar geplant. Diese Schildmaschine bezeichnet man dann oft auch als Multi-Mode-Schild.
Folgende Anpassung der Verfahrenstechnik ohne Umbau der Schildmaschine ist möglich:

- Erddruckschild SM-V5 ↔ Druckluftschild SM-V3

Folgende Anpassungen der Verfahrenstechnik sind nur mit einer Umrüstung, die mit entsprechendem Zeitaufwand und Stehzeit verbunden ist, möglich:

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

2.4 Konstruktionsarten der Tunnelauskleidung[7]

Bei der Tunnelauskleidung wird in einschalige und zwei- bzw. mehrschalige Konstruktionen unterschieden. Die Abb.2.2 stellt die beiden Systeme gegenüber.

[7] Siehe [MAI11] Seite 126 - 131

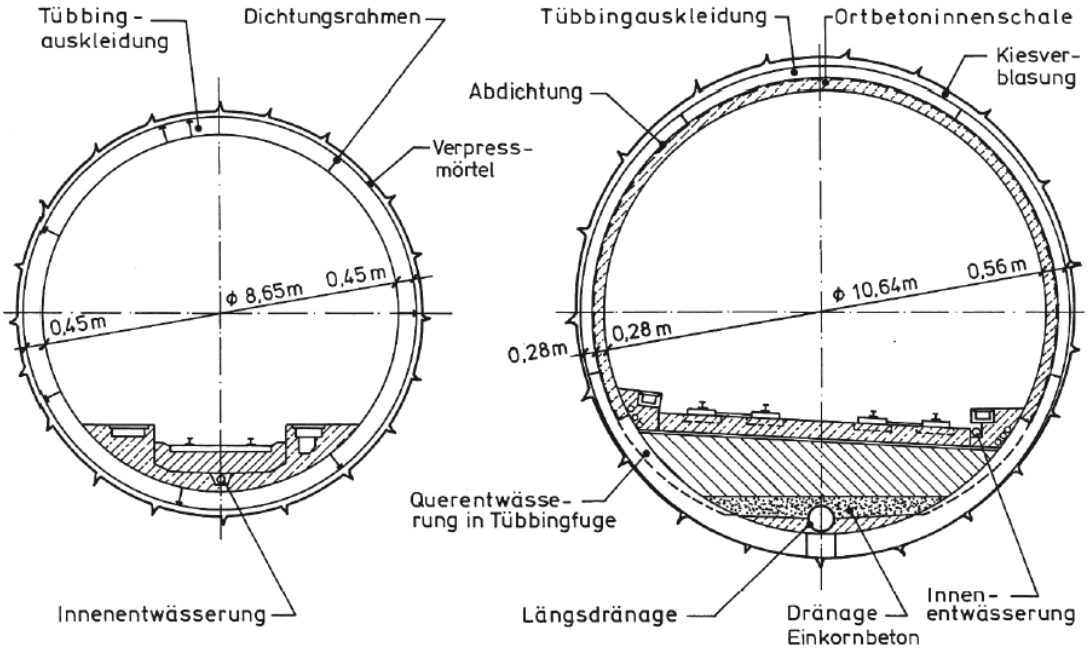


Abb.2.2: Konstruktionsart eines einschaligen und zweischaligen Systems [MAI11]

2.4.1 Einschalige Systeme

Einschalige Systeme müssen alle Anforderungen an Gebrauchstauglichkeit, Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit über die gesamte Nutzungsdauer erfüllen. Bei der Herstellung ist daher der Anspruch an die Qualität und Maßgenauigkeit wesentlich höher als bei zweischaligen Systemen. Wie in der linken Abbildung in Abb.2.2 ersichtlich, erhält die einschalige Konstruktion keine Innenschale mehr. Diese Systeme werden weiter in echte einschalige Systeme und Verbundlösungen unterteilt. Bei ersteren erfolgt die Auskleidung nur durch das Konstruktionssystem, wie einem Tübbingausbau, einer Spritzbeton- oder Ortbetonschale. Bei Verbundkonstruktionen wird durch mehrere Lagen ein einheitlicher Verbund erstellt, der den Anforderungen an die Tunnelschale entspricht. Für beide Ausführungen sind die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit, vor allem die Wasserdichtigkeit, über die gesamte Nutzungsdauer zu gewährleisten.

Die Wasserundurchlässigkeit bei Tübbingen wird einerseits durch einen umlaufenden Dichtungsrahmen und andererseits durch Verwendung von wasserundurchlässigem Beton bewerkstelligt.

2.4.2 Zweischalige Systeme

Bei zweischaligen Systemen werden die konstruktiven und die funktionalen Aufgaben getrennt. Die Außenschale dient der sofortigen Sicherung des Hohlraumes und wird auf die Einwirkungen aus Gebirgs- und Wasserdruck bemessen. Anforderungen an die Dichtigkeit bzw. Wasserundurchlässigkeit werden in der Regel von der Außenschale nicht erfüllt. Die Außenschale kann sowohl als Spritzbetonschale als auch als Tübbingauskle-

dung ausgeführt sein. Die Dichtigkeit wird durch die nachträglich eingebaute Ortbetoninnenschale hergestellt. Zusätzlich muss die Innenschale dem Gebirgsdruck entgegenwirken, sofern die Standsicherheit der Außenschale über die gesamte Nutzungsdauer des Tunnels nicht gewährleistet werden kann. Zumeist werden die Innen- und Außenschale konstruktiv durch eine Folie, die auch als Abdichtung fungiert, getrennt. In der rechten Abbildung in Abb.2.2 wird der Querschnitt eines zweischaligen Ausbaus dargestellt.

Die Anforderungen an die Auskleidungsform werden sowohl von den geologischen und hydrologischen Randbedingungen als auch von den bauverfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Aspekten bestimmt. Die nachstehende Abb.2.3 zeigt die daraus entwickelte Vielfalt von unterschiedlichen Tübbingkonstruktionen im Tunnelbau.

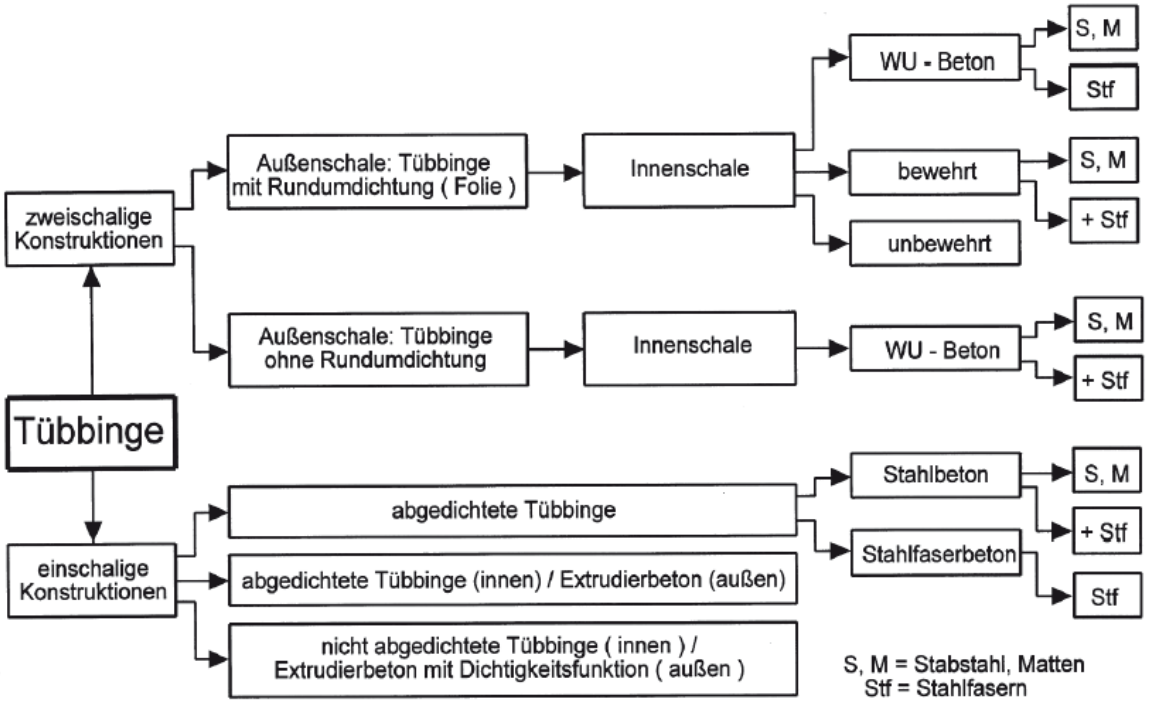


Abb.2.3: Tübbinge für ein- und zweischalige Konstruktionen [MAI11]

2.4.3 Vorteile des zweischaligen Ausbaus[8]

- Bei Verwendung einer Folienabdichtung wird eine vollständige Wasserdichtheit im Tunnel hergestellt.
- Der Tübbingring wird mit geringeren Anforderungen und somit wesentlich günstiger hergestellt.
- Teure Befestigungssysteme am Tübbing, wie Ankerschienen, entfallen, da die Befestigungspunkte bei der Herstellung der Innenschale berücksichtigt werden.
- Die Innenschale sorgt für den notwendigen Brandschutz und kann nach einem Brandfall erneuert werden.
- Die Herstellung von Querschlägen, Lüftungs- und Rettungsstollen wird vereinfacht.

2.4.4 Nachteile des zweischaligen Ausbaus[9]

- Die Herstellung der Innenschale kann erst nach Vortriebsende begonnen werden und ist mit einer längeren Bauzeit verbunden. Diese wird zum Teil von schnelleren Vortriebsleistungen kompensiert.
- Werden die Einwirkungen aus Gebirgs- und Wasserdruck von der Tübbingauskleidung alleine getragen, so fallen auf die Innenschale nur die Einwirkungen aus Eigengewicht und Einbauten. Dadurch kann es zu größeren Schwindrissen in der Innenschale kommen.
- Fehlstellen am Tübbing können nach der Herstellung der Innenschale nur schwer festgestellt werden.
- Der Schubverbund zwischen Innen- und Außenschale kann nur schwer nachgewiesen werden.

2.5 Allgemeine Anforderungen[10]

Das einschalige Auskleidungssystem eines Tunnels mit Tübbingen erfordert die Erfüllung folgender Aufgaben:

[8] Siehe [DAU13] Seite 37

[9] Siehe [DAU13] Seite 37

[10] Siehe [DAU13] Seite 10

- ♦ Sichern des Gebirges, um Nachbrüche zu verhindern
- ♦ Schutz für die Vortriebsmannschaft
- ♦ Aufnahme von Einwirkungen wie Eigengewicht, Auflasten und Wasserdruck
- ♦ Abdichtung des Tunnels
- ♦ Einbauteile für Befestigungssystem späterer Ausrüstungen (Beleuchtung, Belüftung, Oberleitung)
- ♦ Aufnahme von Einwirkungen, die aus dem Vortrieb resultieren

Diese Aufgaben müssen sowohl im Bauzustand als auch im fertiggestellten Bauwerk, bewerkstelligt werden.

Im Gegensatz zum einschaligen System ist bei einem zweischaligen System am Tübbing kein Befestigungssystem vorgesehen, da eventuelle Einbauteile an der Ortbetoninnenschale angebracht werden. Die Abdichtungsfunktion muss nur bis zum Zeitpunkt der Herstellung der Innenschale gewährleistet sein. Danach übernimmt eine Abdichtungsfolie zwischen dem Außenring und der Ortbetoninnenschale diese Aufgabe.

Nach Einbau des Tübbings und Fertigstellung des Ringes können Lasten aufgenommen werden. Die endgültige Tragfähigkeit wird durch die anschließende Ringspaltverpressung oder -verfüllung weitgehend erreicht. Die Ringspaltverpressung erfolgt kontinuierlich mit dem Vortrieb, meist durch den Schildschwanz, und sorgt für eine gleichmäßige Aufteilung der Einwirkungen auf den Ring. Eine genauere Beschreibung der Verfüllung und Verpressung des Ringspalts folgt in Kapitel 6.3 ab Seite 63.

2.6 Funktionale Anforderungen

Jedes Bauprojekt ist einzigartig und unterscheidet sich durch unterschiedliche Randbedingungen von anderen Projekten. Die funktionalen Anforderungen sind zum Teil gegensätzlicher Art. Sie beeinflussen den Entwurf des Tübbingausbaus. Der Planer versucht in einem iterativen Optimierungsprozess einen bestmöglichen Kompromiss zu finden. Eine globale optimale Entwurfslösung gibt es aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen eines jeden Bauprojektes nicht.[11]

2.6.1 Tragfähigkeit

Der Tübbingausbau muss alle im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf ihn wirkenden Belastungen über die geforderte Nutzungsdauer mit geforderten Sicherheiten aufnehmen können. Die Bemessung und Berechnung der Auskleidung erfolgt gemäß Eurocode 7 [EC 7]. Die Betonfertigteile werden nach Eurocode 2 [EC 2] bemessen.[12]

[11] Siehe [BET13] Seite 251

[12] Siehe [BET13] Seite 251

Für die Herstellung und Anwendung der Tübbinge ist die Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ [RIL09] maßgeblich.[13]

2.6.2 Gebrauchstauglichkeit

Im Tübbingausbau sind ausreichende Wasserundurchlässigkeit und die Begrenzung von Verformungen zu gewährleisten. Es darf durch Verformungen des Tübbingrings zu keinen Einschränkungen des Lichtraumprofils kommen. Durch Verwendung von wasserundurchlässigem Beton (kurz WU-Beton) Begrenzung der rechnerischen Rissbreite und Anordnung von ausreichend dimensionierten Dichtrahmen kann eine ausreichende Wasserundurchlässigkeit erzielt werden.[14]

Laut dem DAUB kann die vollständige Dichtigkeit eines Tunnels mit einschaligen Tübbingringen nicht erreicht werden. Oft ist dies allerdings vom Auftraggeber gefordert. Der Auftragnehmer ist in solchen Fällen mittels Sondermaßnahmen zur Nachbesserung verpflichtet. Allerdings muss weiterhin mit geringen Restwassermengen gerechnet werden. Im Bauvertrag werden die zulässige Restwassermenge und die Maßnahmen zur Nachdichtung geregelt. In Verkehrstunneln sind tropfende und rinnende Wasserzutritte nicht erlaubt. Auch ein Abtropfen auf stromführende Einbauten eines Schienenverkehrstunnels muss unbedingt verhindert werden. Bei der Planung der Konstruktion ist von einem weitestgehend dichten Tunnel auszugehen. Allerdings müssen konstruktive Möglichkeiten zur problemlosen Ableitung von Tropfwasser berücksichtigt werden. Zudem sollte bei Verkehrstunneln eine Entwässerungsleitung vorgesehen werden, um Schleppwasser, Löschwasser, Tauwasser usw. abführen zu können.[15]

Die Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ [RIL09] legt Anforderungsklassen an die Dichtigkeit des Bauwerks fest. Abhängig von der Anforderungsklasse werden, wie in der nachstehenden Tab.2.1 ersichtlich, zulässige Fehlstellen und Rissbreiten angegeben.

[13] Siehe [RIL09] Seite 2

[14] Siehe [BET13] Seite 252

[15] Siehe [DAU13] Seite 19

Anforderungsklasse	Kurzbezeichnung	Beschreibung der Betonoberfläche	Beurteilung der Feuchtigkeitsstellen	Zulässige Fehlstellen	Zulässige Rissbreite im eingebauten Zustand	Anforderung an die Fuge, max. Wasserzutritt	Anwendungsbeispiele
AT1	weitgehend trocken	Visuell einzelne feststellbare Feuchtigkeitsstellen (max. matte Dunkelfärbung)	Nach Berühren mit der trockenen Hand (flächenhaft) sind an der Hand keine Wasserspuren zu erkennen.	1 ‰ der Bauteiloberfläche als Feuchtigkeitsstellen zulässig. Wasserfahnen, die nach max. 20 cm abtrocknen.	0,2 mm	dicht	Einschaliger Ausbau mit hoher Dichtigkeitsanforderung. Portalbereiche gem. Richtlinie Innenschalenbeton
AT2	leicht feucht	Visuell und manuell feststellbare einzelne glänzende Feuchtigkeitsstellen an der Oberfläche	Keine Mengenmessung von ablaufendem Wasser möglich. Nach Berühren mit der trockenen Hand sind daran Wasserspuren erkennbar.	1 % der Bauteiloberfläche als Feuchtigkeitsstelle zulässig. Einzelne kurze Wasserfahnen, die an der Betonoberfläche abtrocknen.	0,25 mm	feucht, kein rinnendes Wasser in der gesamten Ringfuge oder einzelnen Längsfugen	Einschaliger Ausbau mit normaler Dichtigkeitsanforderung. Straßen- und Eisenbahntunnel (ohne Portalbereich)
AT3	feucht	Tropfenweiser Wasseraustritt mit Bildung von langen Wasserschlieren	Das ablaufende Wasser kann in Auffanggefäßen mengenmäßig gemessen werden.	Die max. Wassermenge pro Fehlstelle darf 0,2 l/Std nicht überschreiten.	0,3 mm	Einzelstellen tropfend	Einschaliger Ausbau ohne Dichtigkeitsanforderung oder zweischaliger Ausbau
AT4	nass	Rinnende Wasseraustrittsstellen	Das ablaufende Wasser kann in Auffanggefäßen mengenmäßig gemessen werden.	Die max. Wassermenge darf die Funktion des Bauwerks nicht beeinträchtigen.	0,3 mm	Stellen rinnend	Einschaliger Ausbau ohne Dichtigkeitsanforderung oder zweischaliger Ausbau als drainiertes System

Tab.2.1: Definition und Beschreibung der Anforderungsklassen an das Ausbausystem [RIL09]

2.6.3 Dauerhaftigkeit

Unter Dauerhaftigkeit versteht man die Einhaltung der planmäßigen Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung eines angemessenen Instandsetzungsaufwands über die gesamte Nutzungsdauer.[16]

Die Nutzungsdauer von Tunnelbauwerken wird im Bauvertrag einzelfallbezogen festgelegt. Ein einschaliger, wasserdichter Tübbingausbau in Verkehrstunneln wird in der Regel auf eine Nutzungsdauer von 100 Jahren ausgelegt. Es ist Aufgabe des Planers, einen Kompromiss zwischen konstruktiven Anforderungen und Anforderungen an die Dauerhaftigkeit zu erzielen. Ein Regelwerk für die Festlegung der Nutzungsdauer gibt es nicht. Zu hohe Anforderungen an die Dauerhaftigkeit bei ungünstigen Randbedingungen führen zu unwirtschaftlichen Ergebnissen. Hohe Betondeckungen sind für den Entwurf von Tübbingen ungeeignet, da diese zu unwirtschaftlichen Tübbingstärken und möglichen Schäden an den Fertigteilen, wie Abplatzungen in Fugenbereichen, führen.[17]

[16] Siehe [DAU13] Seite 35

[17] Siehe [BET13] Seite 251 - 252

Ein Tübbingausbau hat dauerhaft folgendes zu erfüllen:[18]

- Tragfähigkeit des Tübbingrings inklusive dem geforderten Sicherheitsniveau
- Dichtigkeit gegen drückendes Wasser
- Verhinderung von Abplatzungen, die Verkehrssicherheit und Tragfähigkeit beeinträchtigen
- Vermeidung von Alterungsschädigungen an Beton, Betonstahl, Dichtungs- und weiteren Einbauteilen

Vor allem die fortwährende Alterung aus beton- und stahlangreifenden Vorgängen beeinflusst die Dauerhaftigkeit von Tübbingen. Folgende Mechanismen können sowohl einzeln als auch in Kombination auftreten:[19]

- Karbonatisierung der erdberührten Seite
- Sulfatangriff infolge sulfathaltigen Bodens oder Wassers
- Chloridangriff aus dem Einsatz von Tausalzen in den Portalbereichen oder aus salzhaltigem Wasser
- Verschleißbeanspruchung der inneren Oberflächen und Kanten

Bei Verwendung von Stahlfasern in aggressiver Umgebung beginnen diese im oberflächennahen Bereich zu korrodieren. Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit ist dieser Effekt unbedenklich, da die Korrosion nicht in die Tiefe vordringt. Allerdings könnte es zu einem ästhetischen Problem kommen.[20]

2.6.3.1 Verbesserung der Dauerhaftigkeit[21]

Durch bestimmte Maßnahmen kann die Dauerhaftigkeit von Tübbingen aus Stahlbeton oder stahlfaserverstärktem Stahlbeton erhöht werden.

Instandgesetzte Schäden sind meist Schwachstellen in Bezug auf die Dauerhaftigkeit. Im Vergleich zu normalfesten Betonen neigen hochfeste Betone bei unplanmäßigen Randpressungen stärker zu spröden Kanten- und Eckabplatzungen. Daher sollte normalfester Beton verwendet werden, der sowohl die Mindestfestigkeit einhält als auch ausreichend Verformungs- und Arbeitsvermögen besitzt.

Durch geringe Wasser/Zement-Werte, Einhalten der Ausschalfristen, sorgfältige Herstellung und einem schädigungsvermeidenden Transport kann ein dichtes Betongefüge mit

[18] Siehe [DAU13] Seite 35

[19] Siehe [DAU13] Seite 35

[20] Siehe [DAU13] Seite 36

[21] Siehe [DAU13] Seite 35 - 36

geringer Porosität erreicht und das Eindringen von ungewollten Stoffen vermieden werden.

Um Korrosion des Betonstahls zu verhindern, sollte an der Innen- und Außenseite die Betondeckung von 40 mm eingehalten werden. An den Stirnflächen ist an lokalen Stellen ein Wert von 20 mm ausreichend, wenn infolge einer Belastung weder Risse, noch Abplatzungen an der Dichtung auftreten. Um diese Betondeckungswerte auch einhalten zu können, werden oft lagesichere Bewehrungskörbe verwendet, die die Abstandsvorgaben durch lokales Punktschweißen einhalten.

2.6.4 Brandschutz[22]

Im Brandfall ist gemäß einschlägiger Regelwerke die Sicherstellung ausreichender Standsicherheit und gegebenenfalls der Gebrauchstauglichkeit (Begrenzung der Verformungen, Dichtigkeit) zu gewährleisten. Die Brandlasten sind in der RVS 09.01.45 und in der Richtlinie „Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ der ÖVBB enthalten.

Mehrere Maßnahmen gewährleisten baulichen Brandschutz. So kann durch Bekleidung mit Brandschutzplatten oder Aufbringung eines Brandschutzputzes verhindert werden, dass die innere Bewehrungslage Temperaturen über 300°C erreicht und somit die Standsicherheit der Auskleidung sichergestellt werden. Durch Zugabe von Polypropylenfasern wird Beton mit hohem Brandwiderstand erzeugt. Die Betondeckung isoliert bei kleinen Abplatzungen thermisch die Bewehrung. Zudem verhindern die Fasern durch Reduzierung der Abplatzungen ein Freilegen der Bewehrung.

Der Nachweis für den Brandschutz ist durch Brandversuche an einem Tübbing zu simulieren und/oder in der rechnerischen Standsicherheitsnachweisführung zu berücksichtigen.

2.6.5 Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit im Bauwesen bedeutet umweltfreundliches und ressourcenbedachtes Bauen und Betreiben von Bauwerken. Auch der Rückbau sollte bei nachhaltigen Überlegungen berücksichtigt werden.

Die Errichtung einer Feldfabrik in der Nähe des Tunnelportals erweist sich als nachhaltiger als die Anlieferung der Fertigteile über mehrere Kilometer. Die Vor-Ort-Produktion ist somit aus ökologischer Sicht wirtschaftlicher. Ein Kostenvergleich dieser beiden Herstellungsvarianten wird in Kapitel 8 genauer beschrieben.

[22] Siehe [DAU13] Seite 33 - 34

Lange Transportwege von Gesteinskörnungen für die Herstellung des Betons der Tübbinge können vermieden werden, wenn das Ausbruchsmaterial zur Betonherstellung geeignet ist.

2.7 Geometrie der Tübbinge

Unterschiedliche Anforderungen an den Tübbingausbau führten zur Entwicklung mehrerer Ringgeometrien. Ein besonderes Kennzeichen der Tübbingauskleidung ist der hohe Anteil an Fugen durch Aufteilung des Ringes in einzelne Tübbingsegmente. Unterschieden werden hierbei Längs- und Ringfuge. Die Längsfuge verläuft zwischen den Segmenten eines Ringes. Die Ringfuge ist zwischen benachbarten Tübbingringen angeordnet.[23]

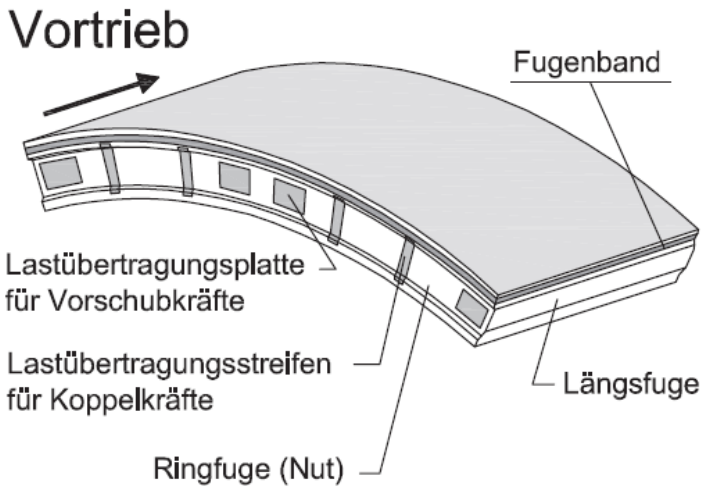


Abb.2.4: Anordnung der Fugen [BET13]

Für den Entwurf der Tübbingauskleidung sind einige projektspezifische Randbedingungen zu beachten. In Abhängigkeit von Innendurchmesser (Lichtraumprofil), Kurvenradien und Dichtigkeit werden Entwurfselemente wie Ringteilung, Konizität und Ringlänge bestimmt.[24]

2.7.1 Tübbingdicke[25]

Die Dicke der Tübbinge wird von den statischen und konstruktiven Randbedingungen des Ausbaus bestimmt. Die Mindestdicke der Tübbinge ist von den Kräften der Vorschubpressen oder vom Gebirgs- und Wasserdruck abhängig.

[23] Siehe [BET13] Seite 253

[24] Siehe [BET13] Seite 253 - 254

[25] Siehe [BET13] Seite 257 – 258

Zur Abschätzung der Tübbingdicke *„d“* kann folgende Formel (2.1) angewendet werden:

$$d \geq \frac{D_a}{20} \geq 25\ cm \qquad D_a = Ringaußendurchmesser\ in\ cm$$ **(2.1 Tübbingdicke)**

Die folgende Tab.2.2 fasst gängige Tübbingdicken in Abhängigkeit des Ringdurchmessers zusammen.

Ringdurchmesser	**Tübbingdicke**
3,0 bis 5,0m	15 bis 25cm
5,0 bis 8,0m	25 bis 40cm
> 8,0m	40 bis 75cm

Tab.2.2: Tübbingdicke abhängig vom Ringdurchmesser [BET13]

2.7.2 Tübbinggröße

Aus der gewählten Anzahl an Steinen, dem Ringdurchmesser und der Ringteilung werden die Abmessungen der Einzelsteine bestimmt. Übliche Umfangslängen des Regelsteins betragen zwischen 3,5 und 5,0 m. Kleinere Umfangslängen erweisen sich bei einer hohen Anzahl konstruktiver Elemente als problematisch. Größere Umfangslängen sind aufgrund der Scheibenbeanspruchung bei der Pressenkraftdurchleitung gegen Abweichungen von Montagetoleranzen ungünstig.[26]

2.7.3 Ringlänge[27]

Die Ringlänge bestimmt die Hublänge der Vortriebspressen und die Länge des Schildschwanzes der Tunnelvortriebsmaschine. Sie ist von verfahrenstechnischen Randbedingungen abhängig. Wenn kleine Kurvenradien zu bewältigen sind, sollte eine kurze Ringlänge gewählt werden, um bessere Lenkbarkeit der Tunnelvortriebsmaschine zu erreichen. Lange Ringe hingegen verkürzen die Ringbauzeit pro Vortriebsmeter und die Ringfugenlänge je Laufmeter Tunnel.

Eine Abschätzung der Ringlänge in Abhängigkeit des Ringdurchmessers kann nachstehender Tab.2.3 entnommen werden:

[26] Siehe [BET13] Seite 254

[27] Siehe [BET13] Seite 258 - 259

Ringdurchmesser	Ringlänge
3,0 bis 5,0m	75 bis 150cm
5,0 bis 8,0m	125 bis 200cm
> 8,0m	150 bis 225cm

Tab.2.3: Ringlänge abhängig vom Ringdurchmesser [BET13]

2.7.4 Anzahl der Segmente pro Ring[28]

Ein vollständiger Tübbingring besteht aus fünf bis zehn Segmenten. Ringe mit kleinem Durchmesser benötigen weniger Fertigteile als solche mit großem Durchmesser. Durch die Anzahl der Segmente wird das Tragverhalten maßgebend beeinflusst. Jede Längsfuge bildet statisch ein Betongelenk, welches geringe Biegemomente zufolge exzentrischer Normalkraftbeanspruchung aufnehmen kann. Je mehr Segmente ein Ring besitzt, desto geringer wird seine Biegesteifigkeit und desto größer werden die Verformungen. Aufgrund der geringeren Biegesteifigkeit kann die Bewehrung reduziert werden. Weniger Segmente pro Ring haben eine kürzere Ringbauzeit und einen geringeren Fugenanteil zur Folge.

Eine Ringunterteilung in weniger als vier Segmente ist nicht empfehlenswert, da diese Elemente aufgrund der engen Platzverhältnisse im Schildschwanz nur schwer zur Einbauposition gebracht werden können.[29]

Eine Übersicht über übliche Ringteilungen in Abhängigkeit vom Ringdurchmesser zeigt folgende Tab.2.4:

Ringdurchmesser	Regelsteine	Schlussstein
3,0 bis 5,0m	4 bis 5	1
5,0 bis 8,0m	5 bis 6	1
> 8,0 m	6 bis 9	1

Tab.2.4: Anzahl der Segmente abhängig vom Ringdurchmesser [BET13]

Die geometrische Aufteilung eines Tübbingrings wird in Form einer Abwicklung der Innenansicht mit mehreren aufeinanderfolgenden und gegenseitig verdrehten Ringen dargestellt. Zudem sollte auch die Lage der Vortriebspressen und der Pressenschuhe abgebildet sein. Ein Beispiel für eine Darstellung der Innenabwicklung stellt die Abb.2.5 dar. Ein 1,5 m breiter Ring besteht hierbei aus sechs annähernd gleich großen Steinen und einem kleinem Schlussstein. Die Tübbingtypen werden in dieser Abbildung mit A1, A2, A3, A4, B, C und K bezeichnet. Die Nummern eins bis zwölf stehen für die Pressenpaare der

[28] Siehe [BET13] Seite 254 - 257

[29] Siehe [JOD04] Seite 25

Vortriebsmaschine. Die strich-punktierten Linien mit den Buchstaben S, Ur, F und Ul dienen der Lagebezeichnung. So steht S für Sohle, Ur für Ulme rechts, Ul für Ulme links und F für Firste. Die Lage des Schlusssteines ist in dieser Abbildung im Firstbereich.

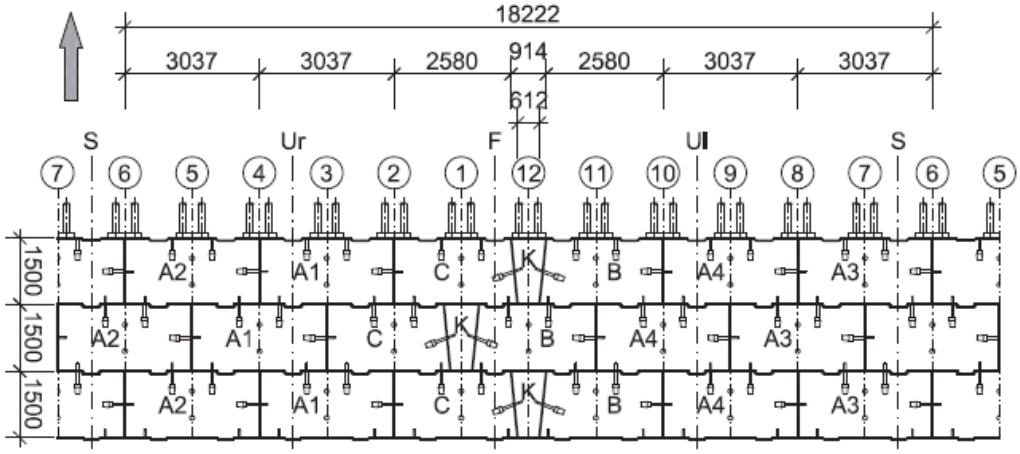


Abb.2.5: Darstellung einer Innenabwicklung [BET13]

Die Ringteilung wird nach der Anzahl der verbauten Regel- und Schlusssteine benannt. Ein Ring mit der Bezeichnung 6+1 besteht aus sechs etwa gleich großen Steinen und einem kleineren Schlussstein. Folglich bedeutet die Bezeichnung 6+0 eine Ringteilung in sechs annähernd gleich große Segmente. Die Abmessungen des Schlusssteins sind vergleichbar mit denen eines Regelsteins.

Bei der Planung der Ringteilung ist auf die Stellung der Vortriebspressen und auf die Ringverdrehungen zu achten. Die Verschraubung eines neuen Ringes mit dem benachbarten Ring muss für jede Position des Schlusssteins möglich sein. Durch gegenseitige Verdrehungen der Ringe werden durchgehende Längsfugen, sogenannte Kreuzfugen, verhindert. Kreuzfugen sind im deutschsprachigen Raum für einschalige, wasserdichte Tübbingausbauten nicht erlaubt. Bereits kleine Montageungenauigkeiten können zu Undichtigkeiten führen.

Die Stellung der Pressen in Bezug auf die Lage der Längsfugen ist für die Pressenkraftdurchleitung an der hierfür vorgesehen Position am Tübbing relevant. Im deutschsprachigen Raum werden die Pressen auf den Längsfugen angeordnet. Zwei benachbarte Tübbinge werden gleichzeitig von derselben Presse in Position gebracht. Ein Versatz zwischen den beiden soll so ausgeglichen werden.

2.7.5 Ringkonizität

Um Krümmungen der Tunneltrasse ohne ein Öffnen der Ringfuge ermöglichen zu können, werden konische Ringe hergestellt, die durch entsprechendes Verdrehen gegeneinander der planmäßigen Trassierung folgen. Es werden hierbei zwei Systeme unterschieden:

2.7.5.1 Universalring[30]

Durch entsprechendes Verdrehen des konischen Universalringes lässt sich jede beliebige Richtung einstellen. Das Prinzip des Kurvenfahrens mit diesem Ringtyp ist in der rechten Darstellung in Abb.2.6 erkennbar. Da jeder Ring gleich ausgeführt wird, ergibt sich ein geringerer Schalungs- und Logistikaufwand in der Herstellung. Dies ist in der Serienfertigung ein entscheidender wirtschaftlicher Vorteil. Allerdings ist die Position des Schlusssteines willkürlich. So könnte dieser auch in der Sohle eingebaut werden und einen in der Firste beginnenden Ringbau zur Folge haben. Dies ist in der Planung der Tunnelvortriebsmaschine zu berücksichtigen, da zusätzliche Sicherungsmaßnahmen für die Vortriebsmannschaft getroffen werden müssen. Beim Entwurf von Universalringen ist es üblich, die minimale Ringlänge beim Schlussstein anzuordnen. Dies hat zur Folge, das sich der Schlussstein bei Kurvenfahrten in der Innenseite befindet und daher auch nicht mit den maximalen Pressenkräften beaufschlagt wird. Anwendung findet dieses System beim gedichteten einschaligen Tübbingausbau.

2.7.5.2 Rechts-/Linksring[31]

Durch den Tübbingausbau mit diesen Ringtypen kann die ungünstige Position des Schlusssteins in der Sohle vermieden werden. Bei diesem System müssen allerdings unterschiedliche Ringtypen (Rechts- und Linksringe) hergestellt werden, was zu höherem logistischen Aufwand und höheren Kosten in der Produktion führt. Allerdings kann mit Rechts- und Linksringen eine definierte Schlusssteinposition im oberen Ringbereich erzielt werden. Sollte der falsche Ringtyp zur Tunnelvortriebsmaschine transportiert werden, kann er wie ein Universalring verwendet werden. Der Schlussstein befindet sich dann jedoch im unteren Ringbereich. Das Prinzip des Kurvenfahrens ist auf der linken Hälfte der Abb.2.6 dargestellt. Um mit diesem System geradeaus zu fahren, werden alternierend ein Rechts- und ein Linksring mit dem Schlussstein symmetrisch im oberen Ringbereich eingebaut. Stattdessen kann auch ein Parallelring ohne Konizität eingesetzt werden, allerdings ist dies mit einem höheren Produktionsaufwand verbunden, da drei unterschiedliche Ringtypen hergestellt werden müssen. Angewendet wird dieses System sowohl im ungedichteten als auch im gedichteten Tübbingausbau.

[30] Siehe [MAI11] Seite 134

[31] Siehe [MAI11] Seite 134

Die für Kurvenfahrten erforderliche Keilform lässt sich mit folgender Formel (2.2) berechnen:[32]

$$k = \frac{\emptyset_A * b_m}{R} \qquad \textbf{(2.2 Keilform)}$$

k ... Keilform = Differenz von minimaler zu maximaler Ringbreite

$\emptyset_A$... Außendurchmesser des Tübbingrings

b_m... mittlere Ringbreite

R ... minimaler Kurvenradius

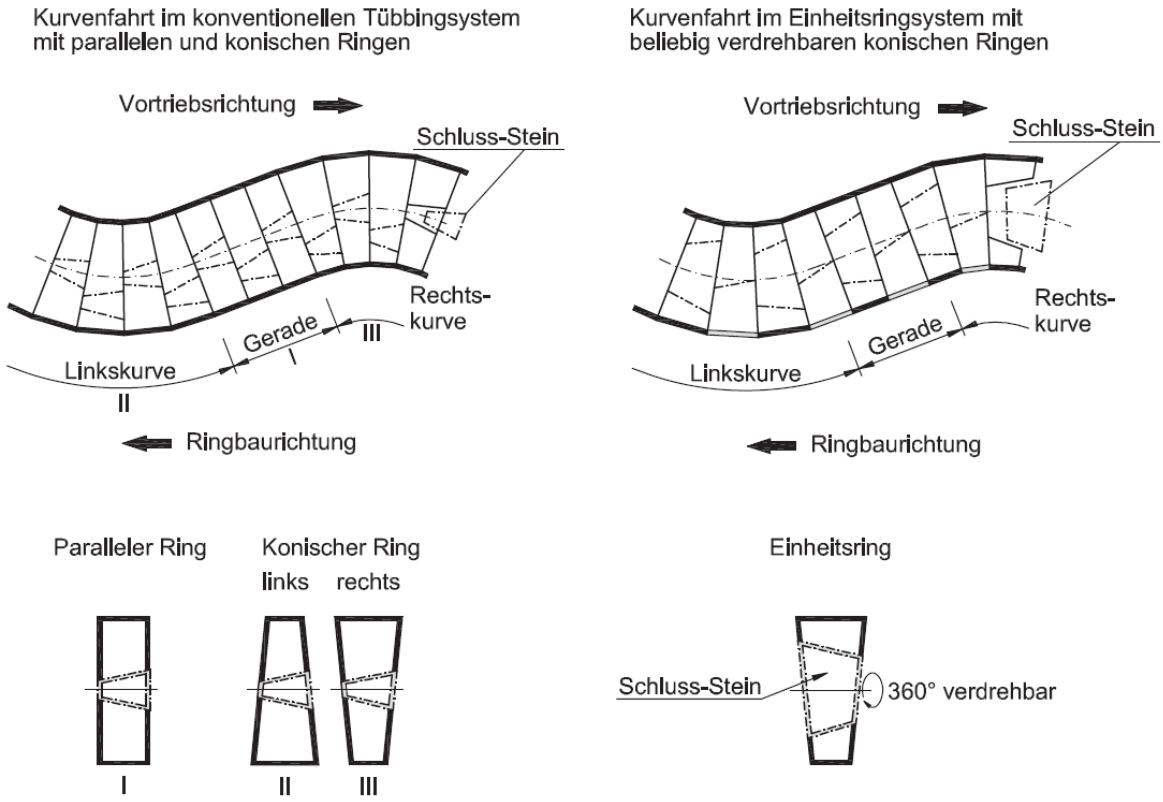


Abb.2.6: Kurvenfahrt mit konischen Ringen [BET13]

2.7.6 Einteilung der Konstruktionsvarianten

Grundsätzlich wird bei der Tübbinggeometrie zwischen Systemen mit ebener und versetzter Ringfuge unterschieden.

Die in Österreich erschienene Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ [RIL09] untergliedert sich in folgende Systeme:

[32] Siehe [DAU13] Seite 10

2.7.6.1 Rechteck-System

Das Rechteck-System besteht aus rechteckigen oder einseitig bzw. beidseitig leicht konischen Tübbingen mit einem keilförmigen Schlussstein. Der Ringbau beginnt generell im Sohlbereich, ehe abwechselnd links und rechts nach oben gearbeitet wird. Der Schlussstein wird im oberen Bereich eingeschoben. Dadurch wird eine Vorspannung des Tübbingausbaus erzielt.[33]

2.7.6.2 Trapez-System

Der Tübbingausbau erfolgt beim Trapez-System mit trapezförmigen Segmenten. Die erste Reihe wird als offene Zahnreihe gebaut. Die zweite wird auf Lücke zum kompletten Ring zusammengefügt. Bei dieser Konstruktionsvariante wird eine durchgehende Längsfuge verhindert. Zudem wirkt jedes zweite Segment als Schlussstein.[34]

2.7.6.3 Rhomboidales System

Der Ringbau beim rhomboidalen System beginnt mit einem trapezförmigen Element. Danach werden die Rhomboid-Elemente von unten nach oben zusammengefügt, ehe der Ring durch einen trapezförmigen Schlussstein geschlossen wird.[35]

2.7.6.4 Hexagonales System

Die hexagonalen Tübbinge, siehe Abb.2.7, besitzen sechs Ecken und werden bei ungedichteten Tunneln und Stollen mit kleinem Durchmesser angewendet. Durch die Form der Elemente entsteht keine durchgehende Ringfuge. Bestehend aus insgesamt vier gleichgroßen Tübbingen, stehen sich immer der Sohl- und Firsttübbing sowie die beiden Seitentübbinge gegenüber. Jedes Segment dient als Schlussstein. Dieses System wird häufig im Wasserbau eingesetzt.[36]

[33] Siehe [RIL09] Seite 7

[34] Siehe [RIL09] Seite 7

[35] Siehe [RIL09] Seite 8

[36] Siehe [RIL09] Seite 8

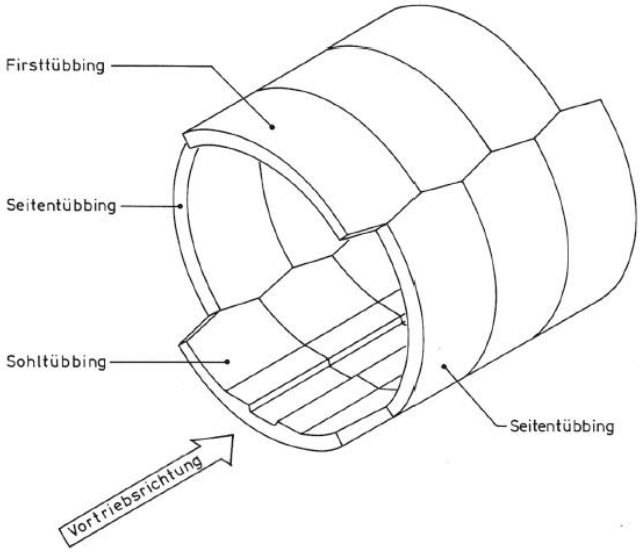


Abb.2.7: Hexagonaler Tübbingausbau [MAI11]

Der DAUB beschreibt in „Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen“ [DAU13] noch eine weitere Konstruktionsvariante:

2.7.6.5 Spreiztübbingring

Bei diesem System kommt ein keilförmiger Schlussstein mit kürzerer Breite zur Anwendung. Dieser wird am Ende des Ringbaus vormontiert. Wenn der Ring den Schildschwanz verlassen hat, wird der Schlussstein eingeschoben und der Ring gespreizt, sodass der gesamte Tübbingring am Gebirge anliegt. Daher kann eine Verfüllung des Ringspaltes entfallen. Allerdings ist diese Konstruktionsvariante nur bei kurzfristig standfesten, nicht wasserführenden Baugrund einsetzbar. Der Einbau einer Innenschale ist obligatorisch.[37]

2.7.6.6 Nachgiebiger Tübbingring[38]

Für den konventionellen Tunnelbau mit schwierigen Druckverhältnissen wurden Stauchelemente entwickelt, die dem Gebirge die Möglichkeit geben, über Deformationswege Gebirgsspannungen abzubauen und eine Abminderung der Spannungsverhältnisse bzw. Kräftegleichheit zu erreichen.

[37] Siehe [DAU13] Seite 8

[38] Siehe [POD10] Seite 37 - 42

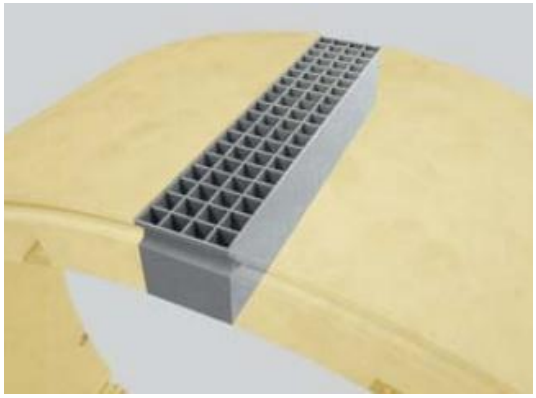



Abb.2.8: Beispiele für Nachgiebigkeitselemente [POD10]

Im kontinuierlichen Tunnelvortrieb gab es bislang nur Ansätze, Druckverhältnisse zu beherrschen. Der Bochumer Eisenhütte Heintzmann ist es gelungen, ähnlich wie beim konventionellen Vortrieb, Stauchelemente zur flexiblen Realisierung eines lokal abgestimmten Ausbauwiderstands zu entwickeln. Durch integrierte Nachgiebigkeitselemente aus Stahl an den Stoßflächen der Tübbinge wird dem Gebirgsdruck ausgewichen und der Umfang im Gesamten verkleinert. Bevor es zu einer Zerstörung des bewehrten Betons kommt, nehmen die Stauchelemente die Gebirgseinwirkungen auf, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Die Stahlelemente sind an die Stauchelemente aus dem konventionellen Vortrieb angelehnt. Die Nachgiebigkeit wird über Rohrstücke oder Kassettenausbildungen erreicht. Die Elemente können in einem Ring beliebig angeordnet werden. Sie sind dem Tübbing in seiner Abmessung angepasst.

An der Ruhruniversität in Bochum werden Versuchsreihen gemacht, um den Ausbau mit Stauchelementen vorzudimensionieren und in der Statik berücksichtigen zu können. Von größeren Projekten gibt es bislang keine Erfahrungswerte bezüglich dieses Systems.

Schlosser hat in seiner Diplomarbeit [SCH01] eine System-Anwendungsmatrix von Tübbingsystemen entwickelt, welche die Auswahl des Systems von den geologischen und hydrologischen Gegebenheiten, der Tunnelvortriebsmethode und vom Zweck des Bauwerks abhängig macht.

2.8 Fugenarten

Die Tübbingauskleidung eines Tunnels ist geprägt vom hohen Fugenanteil infolge des segmentweisen Aufbaus. Die Fugen werden in Längsfugen und Ringfugen unterteilt und können unterschiedlich ausgeführt sein. In der Abb.2.4 auf Seite 18 sind die Fugenarten dargestellt.

2.8.1 Längsfugen[39]

Die Fuge, die sich zwischen zwei Segmenten eines Ringes befindet, wird als Längsfuge bezeichnet. Aus statischer Sicht stellen die Längsfugen Betongelenke dar, die beschränkt auch Biegemomente übertragen können. In diesen werden Ringnormalkräfte, Querkräfte und Biegemomente, die zufolge ausmittiger Normalkräfte entstehen, übertragen. Dies geschieht über den Kontakt der Stirnflächen.

Die Ausbildung der Längsfugen wird wie folgt unterschieden:

- ♦ Ebene Längsfuge
- ♦ Konvex-konvexe Fuge
- ♦ Konkav-konvexe Fuge
- ♦ Nut-/Feder-Fuge

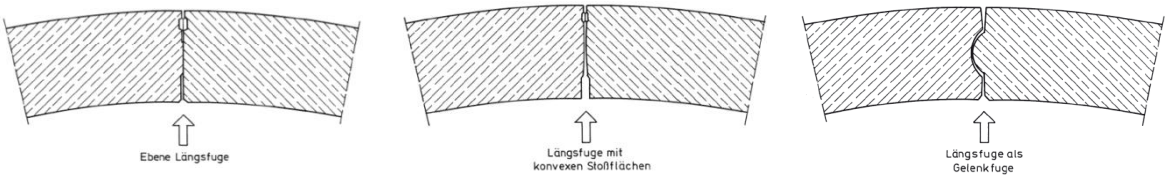


Abb.2.9: Ebene Längsfuge, konvex-konvexe Fuge und konkav-konvexe Fuge [MAI11]

Die übliche und einfachste Ausbildung ist die ebene Längsfuge (Abb.2.9 – links). Bei dieser Ausführung wird die Verdrehbarkeit der Segmente geometrisch behindert und somit können auch Biegemomente übertragen werden. Durch Einschnürung der Kontaktflächen bei fortschreitender Verdrehung werden die Fugen auf Spaltzug beansprucht. Die Gefahr von Betonabplatzungen nimmt zu.

Nehmen Druckkräfte und Drehwinkel zu, ist die konvex-konvexe Fuge von Vorteil (Abb.2.9 – Mitte). Die Breite der Kontaktfläche ist vom Drehwinkel unabhängig. Allerdings kann mit diesem System keine ausreichende Dichtigkeit erreicht werden, da die Dichtung auch außerhalb der Kontaktfläche liegen könnte. Zudem ist der Ring bei der Montage nicht stabil, da den Verdrehungen nicht entgegengewirkt wird. Die temporäre Stabilität bis zur Aufbringung von Druckkräften kann durch eine Verschraubung erreicht werden.

Die konkav-konvexen Längsfugen, siehe Abb.2.9 – rechts, besitzen eine hohe Verdrehfähigkeit. Deshalb werden Tübbinge in dieser Form auch als Gelenkstübbinge bezeichnet. Ähnlich wie beim vorangehenden System ist die Kontaktfläche vom Drehwinkel unabhängig. Die Bewehrung der Randbereiche der konkaven Seite ist aufgrund der erforderlichen Betondeckung nicht möglich. Daher neigen die Kanten zu Beschädigungen. Da auch hier

[39] Siehe [MAI11] Seite 142 - 146

die richtige Position der Dichtung nicht gewährleistet werden kann, werden Längsfugen mit konkav-konvexen Fugen nur für zweischalige Tunnelauskleidungen eingesetzt.

Durch die Nut-Feder-Konstruktion wird zwar eine Vereinfachung bei der Montage erreicht, allerdings können die Nut-Feder-Elemente aufgrund der erforderlichen Betondeckung nicht bewehrt werden. Dies kann bei Ungenauigkeiten beim Ringbau zu Betonabplatzungen führen, die die Dichtigkeit beeinflussen können, wenn die Schäden bis in die Dichtungsnut reichen.

2.8.2 Ringfugen[40]

Die Ringfuge befindet sich zwischen benachbarten Tübbingringen. Die größte Beanspruchung resultiert aus den Kräften der Vortriebspressen. Die Höhe der Lasteinleitungsfläche erstreckt sich nicht über die gesamte Tübbingdicke. Deshalb ist in der Produktion der Tübbinge eine entsprechende Spaltzugbewehrung vorzusehen. Zur Vergrößerung der Auflagerfläche erfolgt die Lasteinleitung über Pressenschuhe. Die Kräfte werden durch den Tübbing bis zur nächsten Ringfuge weitergeleitet. Zum Ausgleich von Ungenauigkeiten beim Einbau werden als Zwischenlagen Hartfaserplatten in den Ringfugen angebracht, die die Bildung von Längsrissen vermeiden sollen.[41]

Bei der ebenen Ringfuge sind keinerlei Einbauhilfen für den Ringbau vorgesehen. Diese Form stellt die einfachste Ausbildung dar, eine Koppelung benachbarter Ringe erfolgt ausschließlich durch Reibung.

Die Ausbildung der Ringfuge mit einem Nut-Feder-System oder einem Topf-Nocke-System dient zur kraftschlüssigen Koppelung benachbarter Ringe und als Einbauhilfe beim Ringbau. Eine Bewehrung der jeweiligen Elemente ist nicht möglich und daher können Einbauungenauigkeiten schnell zu Schäden führen. Beim Topf-Nocke-System wird die Höhe der Nocke so gewählt, dass im Versagensfall die Nocke und nicht der Topf abschert, damit die Dichtigkeit gewährleistet bleibt. Die Nut-Feder-Konstruktion verläuft entlang der gesamten Ringfuge, wohingegen Topf bzw. Nocke nur punktuelle Koppelungen darstellen und eine ebene Ringfuge erhalten bleibt.

2.9 Verbindungsmittel

In den Fugen sind Verbindungsmittel aus statischer Sicht im Endzustand nicht erforderlich. Sie werden jedoch im Bauzustand benötigt, um die Stabilität während des Ringbaus bezüglich Verschiebungen der Segmente und Kompression der Dichtungsbänder abzusichern. Somit wird ein Aufatmen der Dichtung vermieden und die Dichtigkeit gewährleistet.

[40] Siehe [MAI11] Seite 146 - 149

[41] Siehe [MAI11] Seite 146 - 149

Unter Aufatmen wird der Kompressionsverlust nach Entfernen der Verschraubung verstanden.[42] Die Verbindungsmittel können nach Abbinden des Ringspaltmörtels bzw. nach etwa zehn Ringen wieder ausgebaut werden.[43]

Ein Ausbau ist allerdings nur bei Verschraubungen möglich. Am häufigsten wird die schräggeführte Schraube mit Kunststoffdübel, wie in Abb.2.10 dargestellt, eingesetzt. Der Dübel muss vor dem Betonieren des Tübbings am passenden Ort angebracht werden. Alternativ kann auch eine gebogene Schraube mit beidseitigen Muttern zum Einsatz kommen, siehe Abb.2.11. Hierbei muss kein Dübel vorab einbetoniert werden. Allerdings lassen sich diese Schraubverbindungen schwerer lösen, da das Gewinde häufig beschädigt wird.[44]

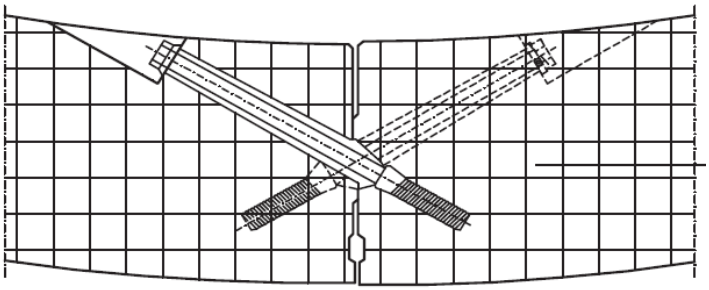


Abb.2.10: Schrägschraube [BET13]

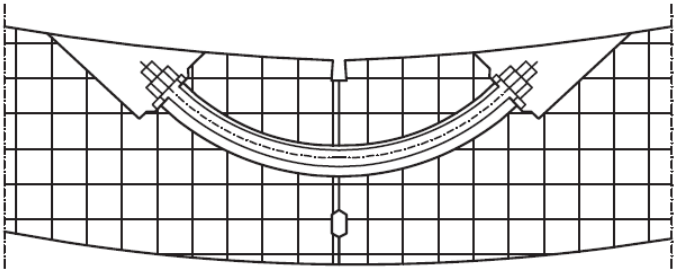


Abb.2.11: Gebogene Schraube mit beidseitiger Mutter [BET13]

Die Schraubenverbindungen sind mindestens auf die Rückstellkräfte der Dichtungssysteme zu bemessen.[45]

Alternativ zu den Verschraubungen kann auch eine Steckdübelverbindung sinnvoll sein, wenn die Verbindungen permanent die Bauteile verbinden sollen und ein Lösen der Verbindungen verhindert werden soll. Nicht nur die Ringbauzeit wird verkürzt, sondern auch die Genauigkeit der Montage wird verbessert. Diese Verbindung kann allerdings nur sehr

[42] Siehe [BET13] Seite 266 - 267

[43] Siehe [DAU13] Seite 12

[44] Siehe [BET13] Seite 266 - 268

[45] Siehe [BET13] Seite 267

schwer rückgebaut werden und wird bei einem langen Tunnelprojekt aufgrund der hohen Anzahl an Verbindungsmitteln sehr teuer.[46]

In Portal- und Querschlagsbereichen bleiben die Verbindungsmittel dauerhaft befestigt. Es muss sichergestellt sein, dass sich diese Verbindungen nicht lösen können. Anforderungen an den Korrosionsschutz werden falls erlaubt durch Vermörtelung der Schraubtaschen oder durch Austausch der Stahlschrauben mit Edelstahlschrauben gelöst.[47]

2.10 Abdichtung

Aufgrund der vielen Fugen wird bei einschaligen Tübbingauskleidungen ein hoher Wert auf die Dichtigkeit gelegt. Einerseits müssen Verkehrstunnel gegen eindringendes Bergwasser gesichert, andererseits soll bei Wasserstollen ein hoher Wasserverlust vermieden werden.

2.10.1 Dichtungsbänder

Durch umlaufende Dichtungsbänder am Tübbing kann eine sehr gute Dichtigkeit erreicht werden. Die Bänder werden passgenau zugeschnitten und die Enden werden durch Vulkanisierung zu einem Rahmen verbunden. Dieser Dichtungsrahmen wird anschließend am nachbehandelten Tübbing in der vorgesehenen Dichtungsnut vollflächig verklebt.[48] Bei einzelnen Projekten werden Dichtungsprofile verwendet, die bereits in die Schalung eingelegt und im Beton verankert werden. Beispiele von verankerten Dichtungsprofilen sind in der Abb.2.12 dargestellt. Der Sickerweg für eindringendes Wasser wird bedingt durch die Anker verlängert und die Dichtfunktion dadurch verbessert. Vor allem bei Schlusssteinen wirkt sich die Verankerung positiv aus, da die Verschiebung des Rahmens verhindert und Undichtigkeitsstellen vermieden werden.[49]

Die Betonoberfläche in der Nut muss frei von Lunkern, Betonnestern, Poren und Rissen sein, um Wasserumläufigkeiten zu vermeiden. Weiters ist darauf zu achten, dass die Ecken des Dichtrahmens in einer Flucht mit den Eckkanten des Tübbings sind. Um eine entsprechende Dichtigkeit garantieren zu können, ist eine solche Aufschnabelung bzw. Einschnürung des Dichtrahmens zu verhindern. Der Abstand der Nut vom Rand des Tübbings muss auf das Kompressionsverhalten des Dichtungsrahmens abgestimmt werden, da es infolge Spaltzuges zu Betonabplatzungen kommen kann.[50] Die vom Hersteller der Dichtungsbänder angegebene Nuttiefe ist einzuhalten und nur in Absprache mit die-

[46] Siehe [BET13] Seite 268

[47] Siehe [DAU13] Seite 12

[48] Siehe [MAI11] Seite 151 - 153

[49] Siehe [STU06] Seite 30

[50] Siehe [MAI11] Seite 151 - 153

sem zu verändern. Die konstruktive Ausbildung der Nut und das Dichtprofil stehen in einem ursächlichen Zusammenhang. Die Geometrie der Profile beeinflusst die Dichtigkeit. Ausreichende Profilbreite und innere Stützkonstruktionen im Profil sorgen für die Dichtigkeit der Profile.[51]

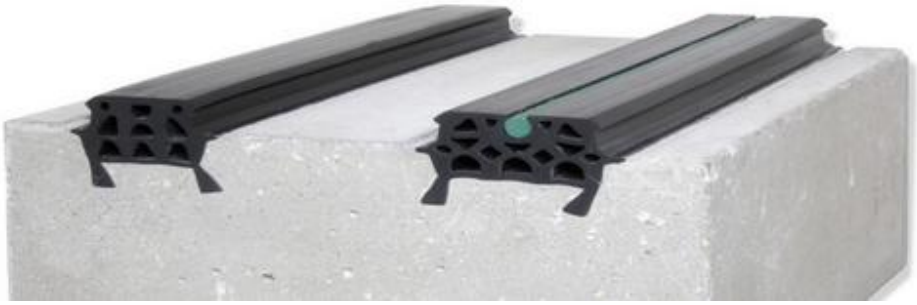


Abb.2.12: Beispiele von Querschnitten verankerter Dichtrahmen [@DAT]

In der Ringfuge wird die Kompression durch den Anpressdruck der Vortriebspressen hergestellt und durch temporäre Verschraubung gehalten. Der Dichtungsrahmen in der Längsfuge wird durch die Drucknormalkraft aus Wasser- und Gebirgsdruck zusammengedrückt. Der Kompressionsdruck muss größer sein als der einwirkende Wasserdruck, um die Dichtigkeit dauerhaft zu gewährleisten.[52]

Doppelte Dichtungsrahmen werden bei Tübbingen mit sehr hohen Anforderungen an die Abdichtung verwendet. Querstege zwischen den beiden Rahmen verhindern ein Entlangfließen von Wasser ebendort. Durch entsprechende Anordnung des zu bauenden Rings zum Nachbarring werden Kreuzfugen vermieden, was beim Tübbingausbau mit erhöhter Dichtigkeitsanforderung von großer Bedeutung ist. Durch eine umlaufende Vordichtung aus einem Schaumstoff- oder Kaubitband wird der Dichtrahmen vor dem Eindringen von Ringspaltmaterial und Dichtungsfett des Schildschwanzes geschützt. Die Vordichtung hat im Endzustand keine weitere Aufgabe. Ein Lösen des Schaumstoff- oder Kaubitbandes aufgrund von Witterungseinflüssen oder Manipulationsvorgängen muss durch ausreichende Verklebung verhindert werden.[53] Der Bereich zwischen dem Dichtrahmen und der Vordichtung, siehe Abb.2.13, kann bei entsprechendem Einbau eines Nachdichtungsschlauches beim Betonieren nachgedichtet werden und so zur Verbesserung der Dichtigkeit beitragen.

[51] Siehe [STU06] Seite 29

[52] Siehe [MAI11] Seite 151 - 153

[53] Siehe [RIL09] Seite 35 - 37

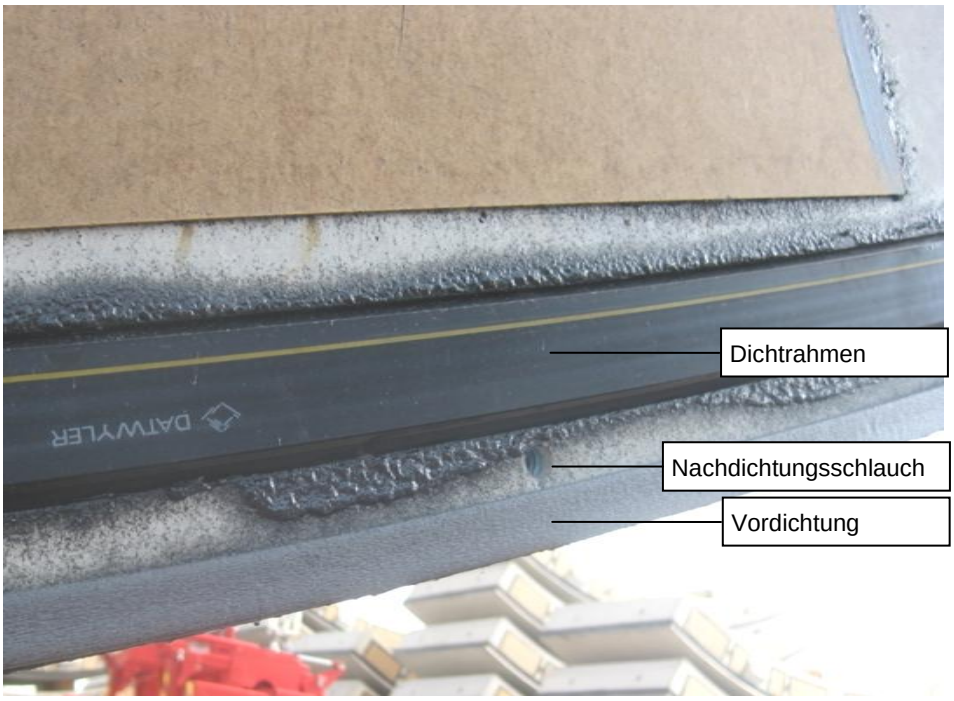


Abb.2.13: Fugenausbildung [PLA15]

An die Dauerhaftigkeit der für die Dichtrahmen verwendeten Materialien sind hohe Anforderungen zu stellen. Zum Einsatz kommen derzeit Naturkautschuke, Kunststoffe, Neoprene, Silikone und Quellgummis.[54]

2.10.2 Injektionen

Eine weitere Möglichkeit die Anforderungen an die Dichtigkeit zu erfüllen, ist die Reduzierung der zuströmenden Bergwassermenge durch Verfüllen der Klüfte im Gebirge mit Injektionen. Durch Schließen der Fugen mit Mörtel werden diese dicht und der erforderliche Verpressdruck wird aufgebracht.[55]

2.11 Toleranzen

Toleranzen sind die zulässigen Abweichungen des Baumaßes vom Planmaß.[56]

Die Toleranzen dienen dazu, die im Bauvertrag vereinbarte Qualität des Tunnels zu erzielen. Sie werden in der Planungsphase festgelegt und sollten nicht zu klein gewählt werden, da übertriebene Forderungen an die Genauigkeit zu höheren Kosten führen.[57] Allerdings soll die Abweichung von der Sollgeometrie begrenzt sein, damit der Tübbing seine Aufgaben erfüllt und keine Schäden zufolge nicht berücksichtigter Beanspruchungen

[54] Siehe [MAI11] Seite 151 - 153

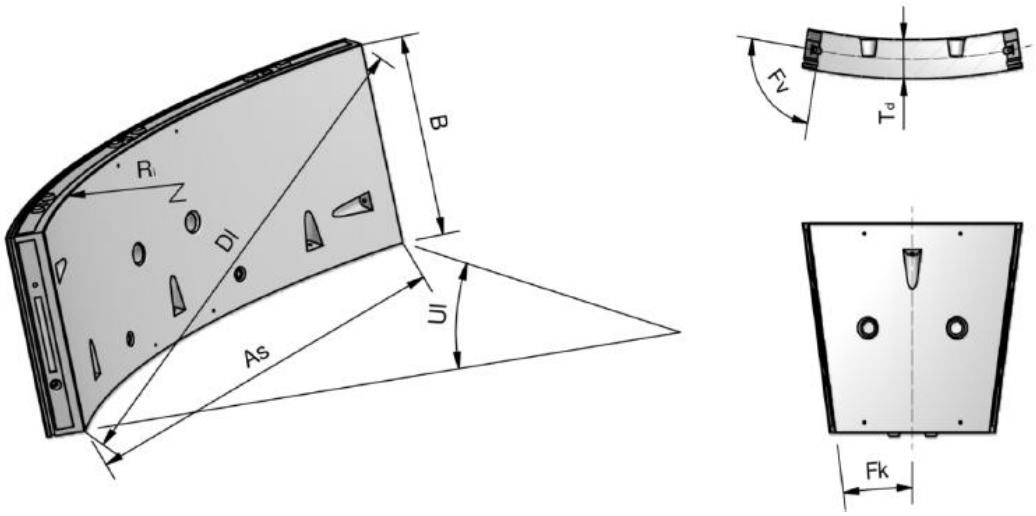
[55] Siehe [MAI11] Seite 154

[56] Siehe [RIL09] Seite 69

[57] Siehe [RIL09] Seite 69

entstehen. Die Instandsetzung solcher Schäden kann sehr kostspielig und zeitaufwändig werden.[58]

Die Maßhaltigkeit beeinflusst die Qualität der Tübbinge und hat Einfluss auf die Stabilität und Dauerhaftigkeit des Ausbaus, die Dichtigkeit des Tunnels und die Aufnahme der Einwirkungen aus Wasser-, Gebirgsdruck und Vortrieb. In Deutschland werden für Eisenbahntunnel mit Tübbingausbau die Toleranzen von der Deutschen Bahn in der Richtlinie 853.4005 vorgegeben. Ähnliches gilt dort für Straßentunnel, hier sind die Toleranzen in einer Richtlinie der Bundesanstalt für Straßenwesen (ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 3) zusammengestellt. In Österreich werden die Toleranzen in der Richtlinie der ÖVBB [RIL09] geregelt. Die Einhaltung der Toleranzen ist sehr wichtig, da eine Überlagerung von zu großen Toleranzen Zwangsbeanspruchungen hervorrufen, welche zu Rissen, Abplatzungen und Undichtigkeiten führen können. Erfahrungen haben gezeigt, dass durch streng formulierte Genauigkeitsanforderungen eine hohe Qualität bei einschaligen Tübbingbauwerken erzielt wird.[59]



R*i*	Radius Innen	B	Tübbingbreite
D*l*	Diagonallänge	F*v*	Fugenverschränkung
A*s*	Ansichtslänge	T*d*	Tübbingdicke
U*l*	Umfangslänge	F*k*	Fugenkonizität

Abb.2.14: Referenzgrößen am Tübbing [RIL09]

Zur Erfüllung der geometrischen Toleranzen der Referenzgrößen aus der Abb.2.14 im Zehntel Millimeter Bereich (± 0,1 bis ± 0,3 mm) ist die Verwendung von hochpräzisen Stahlschalungen mit Nachjustiermöglichkeiten unumgänglich. Die Toleranzen sind in

[58] Siehe [DAU13] Seite 13

[59] Siehe [HAN12] Seite 42 - 53

Österreich projektspezifisch festzulegen.[60] Der DAUB stellt in „Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen“ [DAU13] Herstelltoleranzen in Abhängigkeit des Ringinnendurchmessers zusammen.[61]

2.11.1 Verformungstoleranzen bei Tübbingen[62]

Einflüsse aus Eigengewicht, Temperatur, Schwinden und Kriechen sind für die Verformung der Tübbinge verantwortlich.

Durch die unterschiedlichen Temperaturen bei Herstellung, Lagerung und Einbau der Tübbinge entstehen unvermeidliche Längenänderungen „**dT**“, die die Tübbingtoleranzen beeinflussen. Auf das Schwindmaß „**dSw**“, welches generell von Tübbingdicke, relativer Luftfeuchtigkeit und zeitlichem Verlauf abhängt, ist nicht zu vergessen.

Einflüsse von Eigengewicht bei Lagerung, Transport und Einbau „**dEg**“ werden bei der Interpretation von Kontrollmessungen berücksichtigt, da beim Einbau keine wesentliche Änderung der Tübbinggeometrie zu erwarten ist.

Die Herstelltoleranzen „**dH**“ ergeben sich aus der Abnutzung der Schalung, der Verformung der Schalung bei der Herstellung und den Temperatureinflüssen auf die Schalung.

Die Summe der genannten Verformungstoleranzen (dT + dSw + dEg + dH) muss kleiner sein als die projektspezifisch festgelegte Gesamttoleranz.

2.11.2 Messungen

Zur Kontrolle der Einhaltung der Herstelltoleranzen kann eine händische Vermessung oder eine 3D-Vermessung zum Einsatz kommen. Die händische Vermessung erfolgt mittels Maßbändern, Stahlschablonen und Schublehren. Bei der 3D-Vermessung wird aus gemessenen Punktehaufen ein theoretischer „mittlerer“ Tübbing erzeugt und dem Soll-Tübbing gegenübergestellt.[63] Liegen die Ergebnisse einer Messung außerhalb der Toleranz, so sind alle nach der letzten Messung mit derselben Schalung produzierten Tübbinge nachzumessen. Jene Tübbinge, die innerhalb der Toleranz sind, müssen akzeptiert werden. Tübbinge außerhalb der Toleranz werden gesondert betrachtet und müssen gegebenenfalls ausgeschieden werden.[64]

Neben der Messung am Tübbing ist auch eine Messung eines Tübbingrings sinnvoll. Dieser Probering wird zusammengebaut und vollständig vermessen. Oft besteht dieser

[60] Siehe [RIL09] Seite 71

[61] Siehe [DAU13] Seite 13 - 14

[62] Siehe [RIL09] Seite 71 - 72

[63] Siehe [RIL09] Seite 73 - 74

[64] Siehe [DAU13] Seite 13

Probering aus 2 Tübbingringen, um die Passform der Ringfuge zu prüfen. Die Produktion erhält erst dann die Freigabe, wenn die Ergebnisse innerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegen.[65]

Die Prüfhäufigkeit und die Messmethode sind vom Projekt und vom Tübbingsystem abhängig und mit dem Auftraggeber abzustimmen.[66]

[65] Siehe [RIL09] Seite 73 - 74

[66] Siehe [RIL09] Seite 73 - 74

3 Statische Berechnung und Planung

3.1 Einwirkungen

Im Wesentlichen resultieren die statischen Einwirkungen auf die Tübbingauskleidung aus dem Gebirgs- und Wasserdruck. Wirksam sind die Regelungen des Eurocode 7 [EC 7]. Allerdings gelten häufig im Bauvertrag vereinbarte tunnelspezifische Richtlinien, die Besonderheiten von Tunnelkonstruktionen berücksichtigen.[67]

Es kann in ständige, veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen unterschieden werden. Zudem kann eine weitere Unterteilung in Einwirkungen im Bauzustand und solche im Endzustand erfolgen.

- ♦ Ständige Einwirkungen[68]
    - Eigengewicht des Tübbingausbaus
    - Einwirkungen aus Einbauteilen
    - Wasserdruck
    - Gebirgsdruck
    - Quell- und Schwelldruck
    - Rückstellkräfte des Dichtrahmens, Schraubenkräfte
    - Zukünftige Bebauung über dem Tunnelbauwerk

- ♦ Veränderliche Einwirkungen[69]
    - Verkehrslasten im Tunnel
    - Verkehrslasten Obertage
    - Druck- und Sogbelastung
    - Temperatureinflüsse
    - Innenwasserdruck
    - Einbau und Vortriebskräfte
    - Belastung aus Manipulation und Transport der Tübbinge
    - Stützdruck und Ringspaltverpressdruck
    - Gebirgsauflast im Firstbereich bei teilweise gebettetem Tübbingring
    - Aufschwimmen der Röhre im Verpressmörtel
    - Belastungen durch die Nachläufereinrichtung im Sohlbereich

[67] Siehe [BET13] Seite 272

[68] Siehe [RIL09] Seite 13 - 14

[69] Siehe [RIL09] Seite 14 - 16

- Auftriebskräfte aus Betonierung der Innenschale
- Injektionsdruck durch nachträgliches Injizieren und Gebirgsverbesserung

♦ Außergewöhnliche Einwirkungen[70]

- Anpralllasten
- Brandlasten
- Erdbeben
- Fluten der Tunnelröhre
- Explosionen
- Sonstige Katastrophenszenarien

3.1.1 Einwirkungen im Bauzustand

Durch Manipulation, Lagerung, Transport und Einbau der Tübbinge kommt es zu diversen Einwirkungen auf diese, welche nur im Bauzustand wirken, allerdings bei der Bemessung berücksichtigt werden müssen. Das junge Betonalter ist in der Nachweisführung ebenfalls zu berücksichtigen.

3.1.1.1 Heben von Tübbingsegmenten

Der Tübbing wird nach dem Aushärten mittels einer Vakuumsaugplatte (siehe Abb.3.1) aus der Schalung gehoben und auf der sogenannten Finish-Line[71] zwischengelagert. Hier werden die Segmente nachbehandelt, gewendet und ausgerüstet. Anschließend werden die Steine im Freilager zwischengelagert, ehe sie nach Erreichen der 28 Tage-Endfestigkeit zum Transport in den Tunnel freigegeben werden.[72]

[70] Siehe [RIL09] Seite 16

[71] Als Finish-Line wird die Ausrüstungslinie im Fertigteilwerk bezeichnet.

[72] Siehe [BET13] Seite 272



Abb.3.1: Abheben eines Tübbings mittels einer Vakuumsaugplatte [@HFW]

Die Manipulation am Lagerplatz erfolgt häufig mittels eines Tübbinggreifers. Eine Ausbildungsform ist in der Abb.3.2 dargestellt. Dieses mechanische Anschlagmittel leitet die Lasten nur punktuell in den Tübbing ein, weshalb die Verwendung von Vakuumsaugplatten schonender ist. Die Haltekraft der Saugplatte erzeugt keine nennenswerten Biegebeanspruchungen und ist daher nicht bemessungsrelevant.[73]



Abb.3.2: Abheben eines Tübbings mittels Tübbinggreifers [@DEV]

3.1.1.2 Lagerung der Tübbinge[74]

Da der Beton noch nicht seine Endfestigkeit erreicht hat, sind bei der Lagerung kriecherzeugende Beanspruchungen zu minimieren. Ansonsten ist der Lagerungszustand nicht bemessungsrelevant.

Die Lagerung von Tübbingen erfolgt entweder nebeneinander auf der Ringfuge stehend oder übereinander gestapelt. Üblicherweise werden die Segmente ringweise, teilringweise oder nach Typ geordnet übereinander gestapelt. Die unterschiedlichen Lagerungsarten

[73] Siehe [BET13] Seite 272

[74] Siehe [BET13] Seite 273

werden in Kapitel 5.1 genauer beschrieben. Bei der Lagerung muss auf eine geeignete Wahl der Auflagerpunkte geachtet werden. Die Unterstützungshölzer dienen einerseits als Abstandhalter, um den Kontakt zu anderen Tübbingen zu vermeiden, und andererseits als Auflager. Um eine günstige Lagerung zu erzielen sind diese in einer durchgehenden vertikalen Linie mit dem Auflager des untersten Steines anzuordnen. Eine ungünstige Lagerung wie in Abb.3.3 ersichtlich ist zu vermeiden. Bei der Anordnung der Auflager ist ein Momentenausgleich anzustreben. Dies wird durch Anordnung der Hölzer in den Fünftelpunkten erreicht.

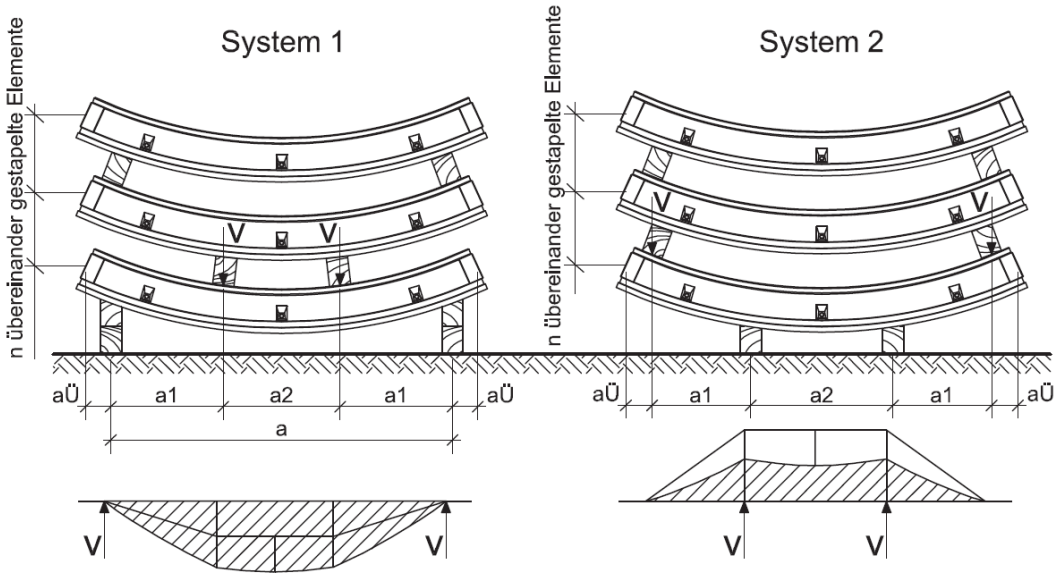


Abb.3.3: Ungünstige Stapellagerung der Tübbinge [BET13]

3.1.1.3 Ringbau und Vortrieb

Für die Bemessung relevante Einwirkungen treten häufig unmittelbar nach dem Einbau der Tübbinge auf. Nicht nur die Belastung der Tübbinge durch die Vortriebspressen der Tunnelvortriebsmaschine, sondern auch jene durch die Radlasten des Nachläufers sind bei der Bemessung zu berücksichtigen.[75]

Die Vortriebspressen sind an der Ringfuge entlang verteilt und wirken in Tunnellängsrichtung. Die lokal konzentrierte Lasteinleitung (Spaltzug) und die Scheibenbeanspruchung sind nachzuweisen.[76] Durch die Einlage von Platten aus einer vergleichsweise weichen und viskosen Kautschuk-Bitumen-Mischung mit integriertem Polyester-Gewebe können Unebenheiten an der Ringfuge ausgeglichen werden. Hartfaserplatten eignen sich besser für den Ausgleich von Herstellungstoleranzen, da sie vergleichsweise steif sind und auch bei großer Druckbeanspruchung eine ausreichende Materialdicke behalten. Ein unplanmäßiger Versatz der Ringfuge, in Abb.3.4 als *„Δx“* bezeichnet, führt durch die Vorschub-

[75] Siehe [BET13] Seite 273 - 274

[76] Siehe [BET13] Seite 273 - 274

kräfte zu Biegerissen in Tunnellängsrichtung, die durch den gesamten Querschnitt laufen.[77]

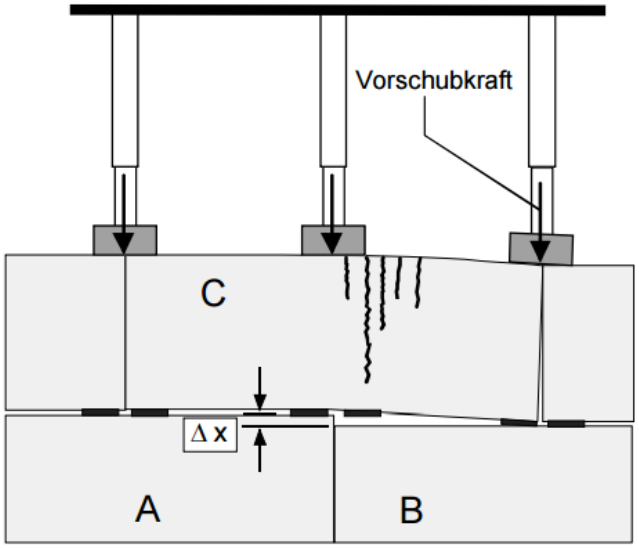


Abb.3.4: Biegerisse zufolge Versatz [WIN00]

Die Lastabtragung durch die Räder des Nachläufers ist in Bereichen mit bereits erhärtetem Ringspaltmörtel unproblematisch. In jenen Bereichen nach dem Schild, wo der Ringspaltmörtel noch nicht seine volle Steifigkeit erreicht hat, sind Nachweise an Einzelsegmenten als elastisch gebettete Platten zu führen. Allerdings ist dies relativ schwierig, da die Ringspaltmörtelsteifigkeit und das Bettungsverhältnis schwer abzuschätzen sind. Durch Laborversuche kann die Steifigkeit des Ringspaltmörtels ermittelt und der Berechnung zugrunde gelegt werden. Aus konstruktiver Sicht ist darauf zu achten, dass die Rollen des Nachläufers in jeder Ringstellung eine Entfernung zur nächstgelegenen Längsfuge aufweisen, um Rissbildungen und Kantenabplatzungen in eben diesen Bereichen zu vermeiden. Eine sorgfältige Arbeitsvorbereitung und Absprache mit dem Hersteller der Tunnelvortriebsmaschine ist vorteilhaft.[78]

3.1.2 Einwirkungen im Endzustand

Die größte Normalkraftbeanspruchung auf den Tübbingausbau resultiert aus der Kombination von maximaler Auflast mit maximalem Seitendruck. In der Regel ist dies die Kombination aus Gebirgsdruck mit Wasserdruck. Für die Detailnachweise in den Längsfugen sind die Ringnormalkräfte maßgebend. Die größten Biegemomente und Querkräfte ergeben sich aus der maximalen Differenz zwischen vertikaler Auflast und horizontalem Seitendruck, häufig aus Kombination des Gebirgsdrucks mit minimalem Seitendruckbeiwerk k_0 und minimalem Grundwasserstand. Die Biegebemessung hängt teilweise von projekt-

[77] Siehe [WIN00] Seite 332 – 333

[78] Siehe [BET13] Seite 273 - 274

spezifischen Randbedingungen ab, weshalb eine Bemessung für sämtliche Schnittgrößenkombinationen erforderlich ist.[79]

3.2 Berechnung der Tübbinge

Die Tübbingauskleidung in Quer- und Längsrichtung wird nach Eurocode 2 [EC 2] bemessen. Es sind sowohl Tragfähigkeit als auch Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen.

Zur Ermittlung der Einwirkungen im Lockergestein und im bereichsweise als homogen anzusehenden Festgestein kommen meist die Verfahren der Finite Elemente Methode (kurz FEM) oder der Finite Differenzen Methode (kurz FDM) zur Anwendung.[80]

Alternativ können die Schnittgrößen auch mit dem elastisch gebetteten Stabzug berechnet werden. Diese Berechnung ist als Kontrolle der vorgenannten Methoden empfehlenswert. Elastische Federn stellen bei Modellen eine Interaktion zwischen der Tunnelschale und dem Gebirge dar. Dies entspricht dem Bettungsmodulverfahren aus der Bodenmechanik. Der Bettungsmodul ist das Verhältnis zwischen Spannung und der zugehörigen Verformung, dieser ist keine Konstante. Er ist abhängig von den Tunnelabmessungen, dem Gebirgsdruck und der Gebirgssteifigkeit.[81]

Im Baugrund mit den Gebirgsverhaltenstypen GVT1 und GVT2 nach der „Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb“ der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (kurz ÖGG) sind das gravitative Versagen von Blöcken und Bruchkörpern aus der Tunnellaibung mit geeigneter Software, wie dem Block Stability Programm, zu untersuchen. Eine Berechnung mit der Finite Elemente Methode oder der Finite Differenzen Methode ist nicht zweckmäßig, da wesentliche Einflüsse von Klüften und Schichtflächen nicht berücksichtigt werden.[82]

[79] Siehe [BET13] Seite 272

[80] Siehe [RIL09] Seite 17

[81] Siehe [ADA10] Seite 36 - 38

[82] Siehe [RIL09] Seite 17 - 18

4 Herstellung

Tübbinge werden in einem Fertigteilwerk hergestellt. Die Produktion kann sowohl in einem bereits bestehenden Werk, als auch in einer Feldfabrik, die für ein Bauprojekt vorzugsweise in Baustellenähe errichtet wird, erfolgen. Eine genauere Beschreibung dieser folgt in Kapitel 8. Die Auswahl ist von mehreren Randbedingungen abhängig und im Rahmen der Produktionsplanung zu berücksichtigen:

- ♦ Platzbedarf für Produktionsstätte und Lagerplatz
- ♦ verkehrstechnische Anbindung des Bauprojektes bzw. Transportmöglichkeiten
- ♦ Verfügbarkeit von Fachpersonal
- ♦ Verfügbarkeit von Rohmaterialien, wie Wasser, Zement und Zuschlagstoffen
- ♦ Entfernung und Größe bestehender Fertigteilwerke in Bauprojektnähe

Zur Dimensionierung einer Tübbingproduktionsstätte sind die geplante Vortriebsleistung, die Ganglinie der produzierten Tübbinge und der zeitliche Produktionsvorlauf vor Vortriebsbeginn beachtlich. Daraus werden die Anzahl der benötigten Schalsätze, die erforderliche Produktionsgeschwindigkeit und der Platzbedarf für Lagerflächen ermittelt.[83]

In Abb.4.1 ist ein Beispiel einer Produktionsplanung abgebildet. Die durchgezogene Linie stellt die Summenlinie der eingebauten Ringe bis zum Vortriebsende dar. Die Steigung dieser Linie ist von der geplanten Vortriebsleistung bzw. der Abnahme zum Ausbau benötigter Tübbinge abhängig. Die strichlierte Linie ist die geplante Ganglinie der produzierten Ringe. Diese Ganglinie wird auf die geplante Vortriebsleistung abgestimmt. Daraus ergeben sich erforderliche Produktionsgeschwindigkeit und in der Folge die Anzahl benötigter Schalungssätze. Aus der sich so ergebenen Zeitdifferenz zwischen Produktions- und Vortriebsbeginn ergibt sich der zeitliche Produktionsvorlauf. Die erforderliche Lagerplatzkapazität ergibt sich aus den zu Vortriebsbeginn bereits produzierten Ringen.

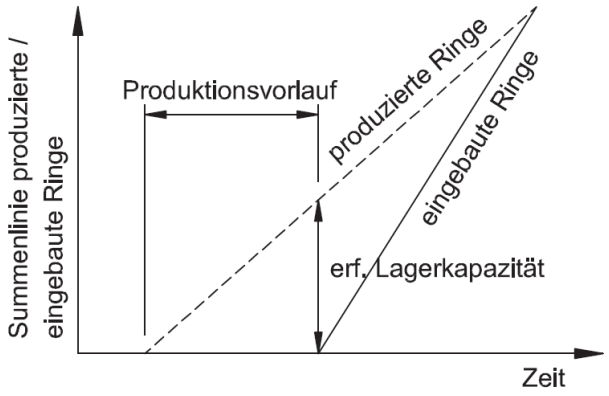


Abb.4.1: Beispiel einer Produktionsplanung [BET13]

[83] Siehe [BET13] Seite 245 - 246

Die Herstellung von Tübbingen ist mit einer Massenproduktion vergleichbar. Durch Optimierung der Herstellprozesse werden Kostenminimierung und gleichbleibende hohe Qualität angestrebt. Durch Halbautomatisierung von immer wiederkehrenden Herstellungsprozessen können Lohnkosten eingespart werden. Zur Herstellung von Tübbingen werden zwei Produktionsarten unterschieden:

1) Standfertigung mit festen Einzelschalungen

   Die Schalungen sind an einem festen Ort installiert. Einbau von Bewehrung und Beton, sowie Erhärtung finden am selben Platz statt.

2) Umlaufbetrieb bzw. Karussellumlauf der Schalungen

   Beim Umlaufverfahren werden die Schalungen gleisgebunden zu den unterschiedlichen Arbeitsstätten gemäß einer Fließbandproduktion verschoben. Die Erhärtung erfolgt in einem Härtetunnel. Nach Ausschalen und Abheben des Tübbings kann der nächste Umlauf dieser einen Schalung beginnen.

Für das Umlaufverfahren sprechen der geringere Platzbedarf, die geringere Anzahl an Geräten und eine höhere Produktivität bei weniger Arbeitskräften.[84] Daher wird heute zumeist die Umlauffertigung angewendet, während früher meistens in Standfertigung produziert wurde.[85]

[84] Siehe [GIR13] Seite 578 - 580

[85] Siehe [BET13] Seite 246

Für den Umlaufbetrieb sind folgende Fertigungsanlagen vorzusehen:[86]

- ♦ Umlaufende schienengebundene Produktionsstraße
- ♦ Schneid-, Biege- und Schweißanlage für die Bewehrungsproduktion
- ♦ Betonmischanlage
- ♦ Härtetunnel bzw. Dampfbehandlungsanlage nach dem Wärmerückstauverfahren
- ♦ Ausreichend Platz für Zwischenlager
- ♦ Gewässerschutzanlage zur Neutralisation von mit Bindemitteln kontaminiertem Abwasser

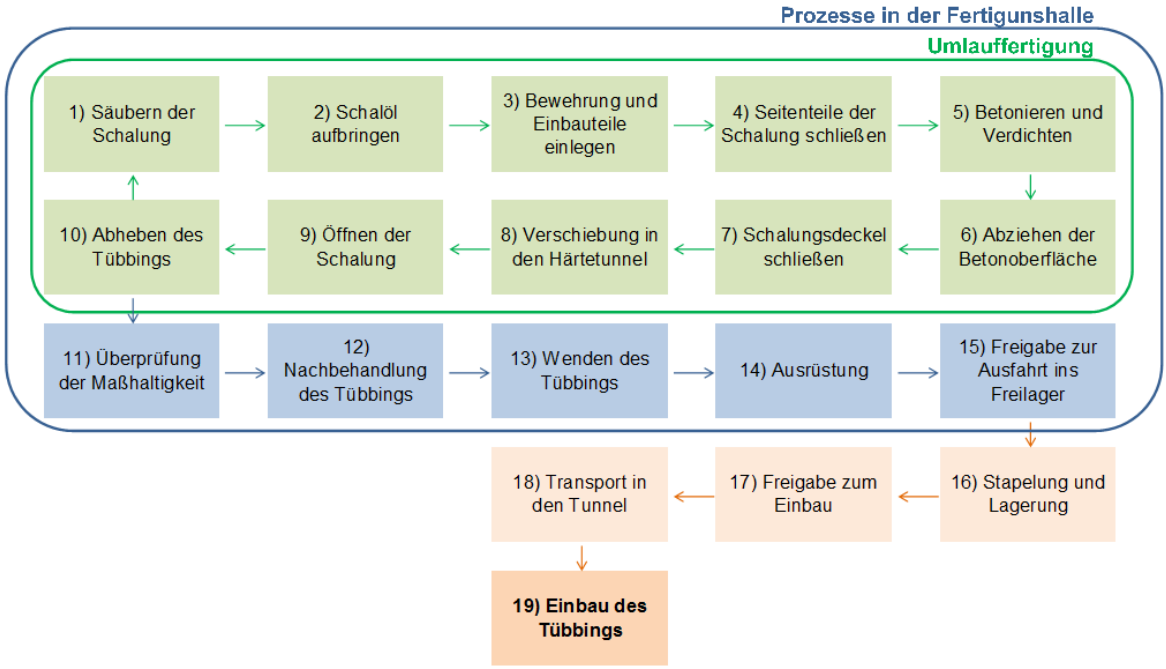


Abb.4.2: Prozessablauf einer Umlauffertigung [PLA15]

In der Abb.4.2 ist der Ablauf einer Umlauffertigung bildlich dargestellt. Die Stationen der Umlauffertigung, in der Abbildung grün dargestellt, sind gleisgebunden und finden in einem Kreislauf statt. Nach dem Abheben des Tübbings aus der Schalung sind die weiteren Arbeitsprozesse bei der Umlauf- und der Standproduktion gleich. Die Standproduktion besitzt bis auf den Härtetunnel denselben Ablauf. Die Arbeitsschritte 1) bis 10) finden jedoch am selben Stellplatz (siehe Abb.4.3) statt.

[86] Siehe [GIR13] Seite 581



Abb.4.3: Standfertigung [@HFW]

4.1 Schalung

Durch die hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit der Tübbinge und die häufige Wiederverwendung der einzelnen Schalungssätze kommen ausschließlich geschweißte Hochpräzisionsschalungen aus Stahl zum Einsatz. Die Toleranzen sind sehr gering und in der Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ [RIL09] geregelt. Um die Toleranzen bei über hundert Einsätzen einhalten zu können, müssen die klappbaren Schalungsteile robust, massiv und gegen Verformungen unempfindlich sein. Geringe Toleranzüberschreitungen können zu ungeplanten Zwangsbeanspruchungen führen, die dann Risse hervorrufen und die Gebrauchstauglichkeit beeinflussen. Daher ist die Einhaltung der Toleranzen regelmäßig zu prüfen.[87] Verkürzungen der Tübbinge durch Schwinden können nicht vollständig verhindert, aber durch eine geeignete Betonrezeptur gering gehalten werden.[88] Die Schalung besitzt in der Regel Verstellmöglichkeiten, um die Maße entsprechend anpassen zu können.[89]

Vor der Produktion eines Tübbings wird die Schalung im geöffneten Zustand von Verunreinigungen und zurückgebliebenen Betonresten gesäubert. Für die Reinigung verwendete Werkzeuge dürfen keine Beschädigungen an der Schalung verursachen.

Nach dem Reinigen wird ein Trennmittel aufgetragen, damit nach dem Ausschalen des fertigen Tübbings keine Betonreste in der Schalung verbleiben.Das Auftragen des Trennmittels erfolgt meist mit Sprühgeräten, um ein gleichmäßiges Betonbild zu gewährleisten. Ungleichmäßige Schichtstärken des Trennmittels können zu unterschiedlichen Grautönen

[87] Siehe [BET13] Seite 154 - 155

[88] Siehe [GIR13] Seite 583

[89] Siehe [RIL09] Seite 40

und zu vermehrter Porenbildung an der Betonoberfläche führen, was bei Tübbingen mit Sichtbetonanforderungen nicht erwünscht ist. Das Trennmittel ist auf Beton und Schalungsart abzustimmen.[90] Überschüssiges Trennmittel in den Ecken ist vor Einlegen der Bewehrung mit Putztüchern zu entfernen, um die vorhin genannten Störungen zu vermeiden. Diese Fehlstellen beeinflussen die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit nicht, sollen aber aus ästhetischen Gründen vermieden werden.

Anschließend kann das Einlegen von Bewehrung und Einbauteilen, wie Ankerschienen, Dübeln, Schwerter, usw. erfolgen. Zur Einhaltung der Betondeckung werden zuvor noch Betonabstandhalter an der Bewehrung montiert. Nachdem alle Einbauteile und die Bewehrung richtig positioniert sind und die Schalung auf korrekten Verschluss kontrolliert ist, wird die Freigabe zum Betonieren erteilt.

4.2 Betondeckung und Bewehrung

Die Maßhaltigkeit der Bewehrung spielt für die Dauerhaftigkeit des Tübbings eine wichtige Rolle. Um die erforderliche Betondeckung zu gewährleisten, ist eine Optimierung der Anzahl und Position der Abstandhalter wichtig. Werden geflochtene Bewehrungskörbe verwendet, wird die Anzahl der Abstandhalter höher, um die Stabilität der Körbe zu erhöhen. Das Nennmaß der Betondeckung wird im Vergleich zur ÖNORM EN 1992-1-1 [EC 2], wie in der Abb.4.4 zu sehen, um die zulässige Lunkertiefe erhöht. Diese wird in den Lasteinleitungsbereichen und bei den Schraubtaschen jedoch nicht berücksichtigt. Vergrößern erhöhte Anforderungen an den Brandschutz die Mindestbetondeckung, so ist die Lunkertiefe nicht zusätzlich zu berücksichtigen.[91]

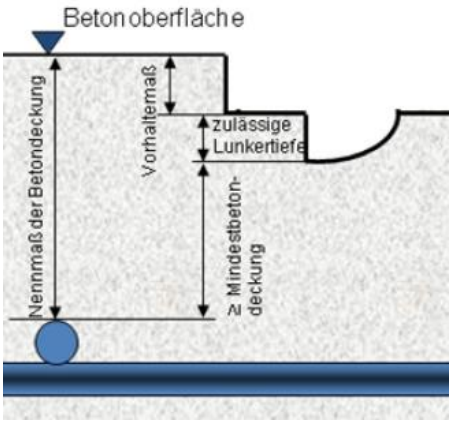


Abb.4.4: Nennmaß der Betondeckung [RIL09]

Die Bewehrungskörbe werden meist vor Ort angefertigt, können aber auch in einem Stahlwerk produziert und angeliefert werden. Für die Herstellung der Bewehrung wird der

[90] Siehe [HOF08] Seite 66 - 72

[91] Siehe [RIL09] Seite 40 - 41

Betonstahl in speziellen Maschinen maßgerecht geschnitten und gebogen. Anschließend werden diese Elemente in vorgefertigte Lehren und Schablonen gelegt und verschweißt. Die Abmessungen dieser Lehren und Schablonen sollten den Angaben in den Bewehrungsplänen entsprechen. So entstehen die stirnseitigen Leitern und die Mattenbewehrungen der Körbe. Um eine Vorkrümmung der Mattenbewehrung zu erzielen, werden diese spannungslos gewalzt. In Abb.4.5 sind im vorderen Bildbereich die gekrümmten Bewehrungsmatten erkennbar, dahinter wird ein fertiger Bewehrungskorb aus der Schablone gehoben. Nach dem Einlegen der unteren Bewehrungsmatte in die Schablone, wird diese mit den stirnseitigen Leitern und den Abstandshaltern verschweißt. Anschließend wird die obere Bewehrungsmatte, an welcher die Schubleitern und die seitliche Bügelbewehrung bereits befestigt sind, eingelegt und mit der unteren verbunden. Danach wird der fertige Bewehrungskorb aus der Schablone gehoben. Nach Kontrolle aller Schweißpunkte und der Abmessungen wird der Korb zum Einbau freigegeben.



Abb.4.5: Bewehrungskorbherstellung [PLA15]

4.3 Betonieren

Ist die Freigabe zum Betonieren erteilt, gelangt die mit Bewehrung und Einbauteilen gefüllte Schalung beim Umlaufbetrieb in die Betonierkammer. Diese befindet sich meist unterhalb der Betonanlage, damit der Beton über ein Vorsilo direkt in die Schalung gegossen werden kann. Bei der Standproduktion wird der Beton zur Schalung transportiert.

Um davor die gewünschte Temperatur des Betons zu erreichen, kann dieser über eine Dampfanlage erwärmt werden.[92] Die maximale Frischbetontemperatur darf 30°C nicht

[92] Siehe [GIR13] Seite 584

überschreiten.[93] Durch hohe Temperaturen im Frischbeton entstehen Temperaturspannungen und hohe Hydratationswärme im Beton. Zur Kühlung des Frischbetons kann kaltes Wasser oder Scherbeneis verwendet werden. Ist die Gesteinskörnung so weit aufgeheizt, dass dies nicht mehr ausreicht, müssen weitere Maßnahmen ergriffen werden, um die Frischbetontemperatur unter 30°C zu senken. So kann zum Beispiel flüssiger Stickstoff eingebracht werden, was allerdings teuer ist. Der Beton muss erwärmt werden, wenn bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt gearbeitet wird und die Hydratation zügig einsetzen soll.[94]

Mit der Abb.4.6 kann die Frischbetontemperatur bei gegebenen Temperaturen von Wasser, Gesteinskörnungen und Zement abgeschätzt werden.

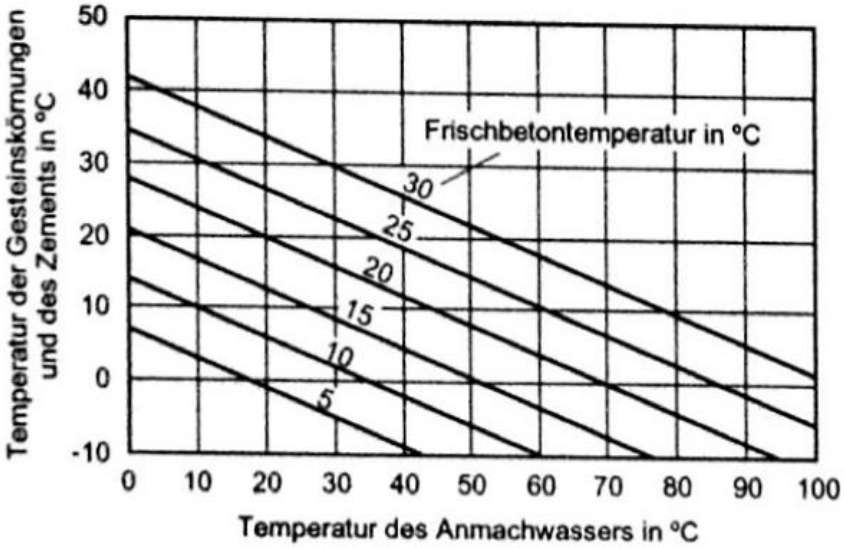


Abb.4.6: Abschätzung der Frischbetontemperatur [SPR07]

Der Beton wird lagenweise eingebracht. Ab der ersten Lage wird dieser mittels Schalungsrüttlern verdichtet. Um eine optimale Betonverdichtung erzielen zu können, werden die Rüttler über Frequenzumformer gesteuert. Die Frequenz ist dabei von Schalungsform und Betonsorte abhängig. Sobald keine Luftblasen mehr aus dem Frischbeton austreten, ist die Verdichtung abgeschlossen.

4.3.1 Beton

An den Beton für Tübbinge werden Anforderungen an Festigkeitsklasse, Festigkeitsentwicklung und Expositionsklasse gestellt.[95]

Die Beanspruchungen des Tübbings sind sehr unterschiedlich und beeinflussen die Betonzusammensetzung. Im Endzustand wirken über die gesamte Nutzungsdauer Gebirgs-

[93] Siehe [RIL09] Seite 42

[94] Siehe [SPR07] Seite 253 - 255

[95] Siehe [RIL09] Seite 24

und Wasserdrücke auf die Tübbingauskleidung. Aus statischer Sicht ist hierfür ein Beton mit der Festigkeitsklasse C25/30 oder C30/37 ausreichend. Im Bauzustand wirken jedoch an den Seitenflächen die Kräfte der Vortriebspressen, die für die Festlegung der Festigkeitsklasse maßgebend sind und meist eine höhere Festigkeit als jene aus statischer Sicht erfordern. Hinsichtlich des Brandschutzes ist jedoch Beton mit möglichst niedriger Festigkeit anzustreben, da bei hohen Betonfestigkeiten das Gefüge dichter ist und es dadurch im Brandfall zu deutlich stärkeren Abplatzungen kommen kann.[96]

Um beim Abheben aus der Schalung Schäden am Tübbing zu vermeiden, ist eine Betonfestigkeit von mindestens 15 bis 20 N/mm² erforderlich. Für die Festlegung der Betonrezeptur ist in den meisten Fällen die Abhebefestigkeit maßgebend. Damit ein Ausschalen nach sechs bis zehn Stunden möglich ist, muss der Tübbing einer Wärmebehandlung (siehe Kapitel 4.5) unterzogen werden. Durch so hohe Frühfestigkeiten werden auch sehr hohe 28-Tage-Festigkeiten erreicht, die weit über den statischen Erfordernissen liegen. Zudem werden in der Regel Zemente mit rascher Festigkeitsentwicklung eingesetzt.[97]

Die meisten Manipulationsvorgänge in der Produktionshalle erfolgen mittels einer Vakuumsaugplatte. Dazu muss die Betonoberfläche frei von Lunkern sein. Daher ist gleich nach dem Betoniervorgang die Oberfläche nachzuarbeiten. Die Konterschalung wird geöffnet und der Beton abgezogen. Zudem darf sich beim Öffnen der Deckschalung der noch frische Beton nicht weiter verformen. Deshalb wird Beton mit plastischer Konsistenz eingesetzt, der durch leistungsfähige Schalungsrüttler vollständig verdichtet wird.[98] Bei unzureichender Verdichtung des Betons und Verfüllung der Schalung können in den Eckbereichen Kiesnester entstehen.[99]

Um den Wassergehalt zu minimieren, sollte das Größtkorn möglichst groß gewählt werden. In der Regel wird ein Größtkorn mit 16 mm verwendet.[100] Dies ist abhängig vom Bewehrungsgehalt, der Betondeckung, den Bauteilabmessungen und der Verarbeitbarkeit.[101]

Der Wasserzementwert (kurz W/Z-Wert) sollte 0,50 nicht übersteigen. W/Z-Werte zwischen 0,43 und 0,48 sind vorteilhaft. Der Zementgehalt beträgt dabei zwischen 340 und 380 kg/m³. Um den Beton leichter verarbeiten zu können und eine lunkerfreie Oberfläche

[96] Siehe [BRE13] Seite 412

[97] Siehe [BRE13] Seite 412 - 413

[98] Siehe [BRE13] Seite 413

[99] Siehe [RIL09] Seite 26

[100] Siehe [BRE13] Seite 414

[101] Siehe [RIL09] Seite 25

zu erhalten, sollte ein Feinstsandgehalt[102] von 450 bis 470 kg/m³ angestrebt werden. In der Tab.4.1 ist ein Beispiel einer typischen Betonzusammensetzung für Stahlbetontübbinge dargestellt. Um bei niedrigen W/Z-Werten die gewünschte Konsistenz erreichen zu können, kommen oft verflüssigende Betonzusatzmittel, Betonverflüssiger (kurz BV) oder Fließmittel (kurz FM) zum Einsatz.[103]

Zement	Wasser	Flugasche	W/Z_{eq}-Wert	Sand	Gesteinskörnung	BV / FM
kg/m³	kg/m³	kg/m³	-	kg/m³	kg/m³	M.-%.-v.Z.
310	118	80	0,36	680	1.210	2

Tab.4.1: Typische Betonzusammensetzung [BRE13]

4.3.1.1 Faserbeton

Bei einem Brandfall im Tunnel können Temperaturen von 800 bis 1.200°C innerhalb weniger Minuten erreicht werden. Das physikalisch und chemisch gebundene Wasser aus dem Zementstein verdampft und baut einen entsprechenden Dampfdruck auf. Dieser Druck und hohe Eigenspannungen bei rascher Erhitzung führen zum nahezu explosionsartigen Abplatzen des Betons. Zur Erhöhung des Brandschutzes können dem Beton Polypropylenfasern (kurz PP-Fasern) hinzugefügt werden. Die PP-Fasern schmelzen bei Temperaturen von 150 bis 170°C. In den hinterlassenen Kanälen entspannt sich der Dampfdruck.[104] Auch die Verwendung von Stahlfaserbetonen ist üblich. Diese erhöhen nicht nur die Festigkeit, sondern auch die Schlagfestigkeit. Außerdem wird die Abplatzneigung reduziert.[105] Beanspruchungen durch Abheben aus der Schalung, Transport und Lagerung von Tübbingen aus Stahlfaserbeton können ohne Bewehrung bemessen werden. Ist die Tragfähigkeit durch die Stahlfasern gesichert, kann auf konventionelle Bewehrung verzichtet werden. Dadurch entfallen die Kosten für Lagerung und Vorhalten der Bewehrungskörbe.[106]

Der Oenzbergtunnel in der Schweiz wurde mit Tübbingen aus Stahlfaserbeton hergestellt. Bei diesem Projekt wurden die konventionelle Bewehrung mit Körben und die reine Stahlfaserbewehrung miteinander verglichen. Das Ergebnis der Druckversuche an den Ringfugen zeigte, dass der Stahlfaserbeton dasselbe Lastniveau erreichte, wie der herkömmlich bewehrte Beton. Außerdem wurde das duktile Materialverhalten von Stahlfaserbeton ersichtlich. Weitere Referenzprojekte von Tübbingausbauten mit Stahlfaserbeton sind der

[102] Korngröße ≤ 0,25 mm

[103] Siehe [BRE13] Seite 414

[104] Siehe [BRE13] Seite 409 - 410

[105] Siehe [BRE13] Seite 415 - 417

[106] Siehe [HAN11] Seite 14 - 17

Hofoldinger Stollen in Deutschland, der Channel Tunnel Rail Link in Großbritannien und die Wehrhahnlinie Düsseldorf in Deutschland.[107]

4.3.1.2 Betonprüfungen

Für die Durchführung der Prüfungen sind die ÖNORM B 4710-1 [ON 4710] und die ÖNORM EN 13369 [ON 13369] maßgeblich. Zusätzlich gilt bei der Verwendung von Fasern die ÖVBB-Richtlinie „Faserbeton“ und bei brandbeständigen Betonen die ÖVBB-Richtlinie „Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“.[108]

Die Erstprüfung dient zur Festlegung der Konsistenz des Betons. Es werden Probetübbinge mit der festgelegten Betonzusammensetzung, der verwendeten Produktionsanlage und den vorliegenden Schalungen hergestellt. Sind die Nachweise an die Toleranzen, die Oberflächenbeschaffenheit und die Einbauteile erfüllt, kann mit der Serienproduktion begonnen werden. Die Erstprüfung muss wiederholt werden, wenn Betonrezeptur oder Herstellungsverfahren geändert werden. Auch andere Maßnahmen, die zu einer Änderung der Tübbingeigenschaften führen, können eine neuerliche Erstprüfung notwendig machen, wenn dies vom Fremdüberwacher als erforderlich beurteilt wird. Der Prüfumfang wird in der Tab. 6/1: Prüfumfang für die Erstprüfung in der ÖVBB-Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ [RIL09] zusammengefasst.[109]

Die Konformitätsprüfung ist laufend zu führen und dient zur Überprüfung, ob der hergestellte Beton mit der vorangegangenen Festlegung übereinstimmt. Eine Zusammenfassung des Prüfumfangs stellt die Tab. 6/2: Prüfumfang für die Konformitätsprüfung in der ÖVBB-Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ [RIL09] dar.[110]

Die Identitätsprüfung wird vom Auftraggeber veranlasst und weist nach, dass ein definiertes Betonvolumen zu derselben Grundgesamtheit gehört, an der die Konformität nachgewiesen wurde. Stellt der Tübbingproduzent den Beton nicht selber her, müssen von ihm Identitätsprüfungen durchgeführt werden.[111]

4.4 Nachbearbeitung

Viele Manipulationsvorgänge in der Produktionshalle erfolgen mittels einer Vakuumsaugplatte. Dafür ist eine nahezu lunkerfreie Betonoberfläche erforderlich. Um dies auch erreichen zu können, wird die Oberfläche sofort nach dem Betoniervorgang und vor dem

[107] Siehe [HAN11] Seite 22 - 24

[108] Siehe [RIL09] Seite 27

[109] Siehe [RIL09] Seite 27 - 28

[110] Siehe [RIL09] Seite 29

[111] Siehe [RIL09] Seite 29 - 30

endgültigen Erhärten des Betons, siehe Abb.4.7, nachgearbeitet. Die Konterschalung wird geöffnet und der Beton abgezogen. Größere Luftblasen in der Oberfläche werden mit überschüssigem Beton verfüllt. Anschließend wird die Oberfläche geglättet, die Konterschalung ohne Kontakt mit dem Beton wieder geschlossen und die gesamte Schalung mit einer Plane abgedeckt, um ein Austrocknen während des Erhärtungsvorgangs zu verhindern. Bevor der Tübbing einer Wärmebehandlung unterzogen wird, wird er noch etwa eine Stunde vorgelagert, um ihn danach schonend zu erwärmen.[112]



Abb.4.7: Nachbearbeitung der Betonoberfläche [@HFW]

4.5 Wärmebehandlung

Um eine Tübbingschalung an einem Tag öfters verwenden zu können, ist eine hohe Frühfestigkeit des Betons anzustreben, damit der Tübbing nach sechs bis zehn Stunden aus der Schalung gehoben werden kann. Dies ist allerdings nur durch eine zusätzliche Wärmebehandlung erreichbar.[113] Ohne Wärmebehandlung kann der Tübbing erst nach 18 bis 20 Stunden ausgeschalt werden.[114] Bei der Standproduktion werden Heizstrahler oder Wärmehauben verwendet. Bei einer Umlaufanlage folgt nach dem Betonieren und der ersten Nacharbeit ein Härtetunnel, der durch Zufuhr von gesättigtem Dampf auf die entsprechende Temperatur erwärmt wird.[115] Durch das Abdecken der gefüllten Schalungen

[112] Siehe [RIL09] Seite 41

[113] Siehe [BRE13] Seite 414 - 415

[114] Siehe [JOD04] Seite 28

[115] Siehe [BRE13] Seite 414 - 415

mit einer wärmedämmenden Folie kann auch eine Wärmebehandlung durch die Hydratationswärme erzielt werden.[116]

Die Abb.4.8 stellt den schematischen Ablauf der Wärmebehandlung dar. Ehe der Tübbing geheizt wird, wird er noch vorgelagert. Die Wärmebehandlung muss bei Erreichen von 40 – 45°C Kerntemperatur gemäß ÖVBB-Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ [RIL09] beendet werden, damit die Betontemperatur infolge der Hydratationswärmeentwicklung des Zements einen Wert von 50 – 55°C nicht überschreitet.[117] Durch die Vorlagerung wird der Tübbing langsam erwärmt. Dies und langsames Abkühlen vermeiden Gefügeschäden im Fertigteil.[118] Die Wärmebehandlung beschleunigt den Produktionsprozess wesentlich.

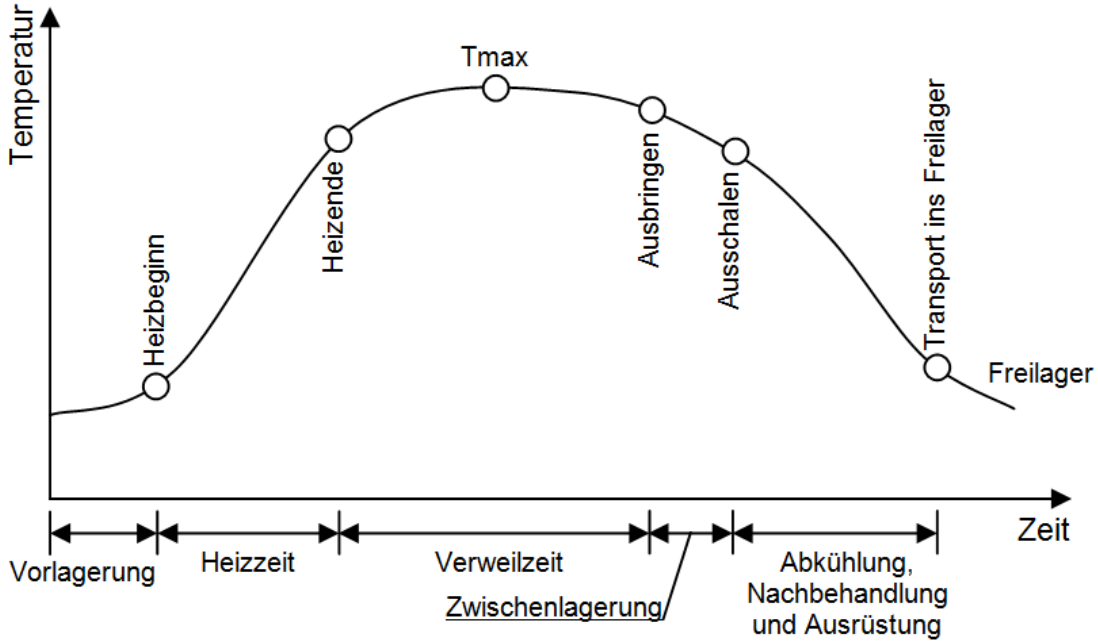


Abb.4.8: Temperatur-/Zeitverlauf der Wärmebehandlung [JOD04]

Bei Schalungen mit Schwertern für die Kanäle der Tübbingverschraubungen werden die Schwerter etwa zwei Stunden nach dem Betonieren gezogen. Ansonsten würden diese am Beton anhaften und beim Ziehen zu einem späteren Zeitpunkt Schäden am Tübbing verursachen. Zwei Stunden nach dem Betonieren ist eine ausreichende Betonfestigkeit erreicht, sodass die Kanäle nach dem Ziehen keine Geometrieänderungen mehr erfahren.

4.6 Ausschalen und Zwischenlagerung

Wie schon im Kapitel 4.3.1 beschrieben, benötigt der Tübbing eine Druckfestigkeit von mindestens 15 – 20 N/mm², damit dieser sicher und ohne Schäden ausgeschalt werden

[116] Siehe [SPR07] Seite 283

[117] Siehe [RIL09] Seite 41 - 42

[118] Siehe [SPR07] Seite 197 - 198

kann. Der genaue Wert wird vom Tübbingplaner vorgegeben.[119] Zur Messung der Druckfestigkeit kann die zerstörungsfreie Rückprallprüfung mit dem Schmidt-Hammer angewendet werden. Ist die Ausschalfestigkeit erreicht, werden die Schrauben an der Schalung gelöst und die Schalung geöffnet. Bevor der Tübbing mit einem Vakuumerektor abgehoben und im Zwischenlager in der Halle gestapelt wird, wird er noch auf Fehl- und Schadstellen untersucht.

Die Zwischenhölzer für die Lagerung sind genau nach den statischen Anforderungen auszurichten.[120]

Damit jeder Tübbing rückverfolgbar bleibt, werden diese nach dem Ausschalen mit einem Etikett mit Typ, Produktionsdatum, Schalungsnummer und Chargennummer gekennzeichnet.[121]

4.7 Nachbehandlung und Finishing

Im Zwischenlager in der Produktionshalle werden beschädigte Tübbinge fachgerecht instandgesetzt, um die Gebrauchstauglichkeit und die geforderte Qualität zu gewährleisten. Fehl- und Schadstellen von Tübbingen, sowie die Instandsetzung dieser Schäden werden später im Kapitel 7 genauer beschrieben.



Abb.4.9: Pressrahmen auf der Ausrüstungsstraße [PLA15]

[119] Siehe [RIL09] Seite 42

[120] Siehe [BRE13] Seite 415

[121] Siehe [RIL09] Seite 42

Nach erfolgter Instandsetzung werden die Tübbinge gegebenenfalls auf einem Wendetisch gewendet und auf der Ausrüstungsstraße[122] ausgerüstet. Je nach Anforderungen wird das Betonfertigteil mit einem Dichtrahmen ausgestattet. Die Dichtungsnut wird mit Kleber eingesprüht oder angestrichen und der Dichtrahmen wird mittels eines Pressrahmens dagegen gepresst. Die Abb.4.9 zeigt das Anpressen des Dichtrahmens. Beim Anbringen des Dichtrahmens ist vor allem auf die richtige Lage des Rahmens an den Ecken zu achten. Eine Aufschnabelung oder Einschnürung der Dichtung im Eckbereich kann beim Einbau zu Undichtigkeiten führen. Daher sollte die Ecke des Dichtrahmens mit der Ecke des Tübbings in einer Flucht liegen. Wie in Kapitel 2.10.1 bereits erwähnt, kann der Dichtrahmen anstelle einer Verklebung bereits in der Schalung eingelegt und im Zuge der Betonage im Tübbing verankert werden. Die Abb.2.12 auf Seite 31 zeigt zwei Beispiele verankerter Dichtprofile. Anschließend werden die Vordichtung und die Lastverteilungsplatten angebracht.

Nach vollständiger Ausrüstung und Überprüfung der geforderten Qualität können die Tübbinge zur Ausfahrt ins Freilager freigegeben werden. Im Freilager sollten nur in Einzelfällen kleinere Instandsetzungsmaßnahmen vorgenommen werden.

4.8 Qualitätssicherung

Die Qualität der Tübbinge bei der Produktion ist durch ein entsprechendes Qualitätssicherungsprogramm von Beginn der Bewehrungsherstellung bis nach deren Einbau sicherzustellen, um die entsprechenden Anforderungen zu erfüllen und die vertraglich vereinbarten Toleranzen einzuhalten. Die Beschreibung der Maßnahmen zur Einhaltung der Qualität wird in einem Qualitätsmanagement-Handbuch (kurz QM-Handbuch), das projektspezifisch angepasst ist, festgehalten.[123]

[122] Die Ausrüstungsstraße wird oft auch als „Finish-Line“ bezeichnet.

[123] Siehe [BET13] Seite 246

Das QM-Handbuch beinhaltet unter anderem:

- Arbeitsanweisungen der einzelnen Arbeitsschritte
- Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit der Tübbinge
- Herstellung und Aufbau des Proberings
- Vermessung der Schalungen und Tübbinge
- Nachweis der Schweißverbindungen der Bewehrungen
- Betonprüfungen im Labor
- Wareneingangskontrolle
- Instandsetzungskonzept
- Übergabeprotokolle bei der Auslieferung der Tübbinge

Bei der Qualitätssicherung ist zu beachten, dass alle vertraglich vereinbarten Toleranzen (siehe auch Kapitel 2.11 ab Seite 32) eingehalten werden. Hierzu werden laufend Messungen an den ausgeschalten Tübbingen und Schalungen vorgenommen. Messhäufigkeit und –methode werden mit dem Auftraggeber abgestimmt und in einem Prüfplan festgehalten.

Die Mitarbeiter der Qualitätssicherung dokumentieren auch all jene Arbeitsschritte, die später nicht oder nur sehr schwer nachgewiesen werden können. So ist sicherzustellen, dass die Bewehrung überprüft wird. Die Herstellung der Bewehrung wird in Kapitel 4.2 beschrieben. Die Bewehrung wird in Schablonen, die den Bewehrungsplänen entsprechen, hergestellt. Dennoch wird die Maßhaltigkeit mittels einer Schublehre vor der Freigabe zum Einbau stichprobenartig überprüft. Alle statisch erforderlichen Schweißpunkte sind zu kontrollieren und nachzuweisen. Die Einhaltung der Betondeckung wird nach dem Ausschalen mit Hilfe eines Betondeckungsmessgeräts stichprobenartig geprüft.

Auch die verwendeten Baustoffe für die Herstellung und Instandsetzung der Tübbinge sind im QM-Handbuch bekannt zu geben. Prüfzeugnisse dieser Produkte sind dem Auftraggeber vorzulegen.

5 Lagerung und Transport

Vom Abheben des Tübbings aus der Schalung bis zum Einbau im Tunnel wird das Tübbingsegment sehr oft umgesetzt. Es gilt die Anzahl der Umschläge so niedrig wie möglich zu halten. Um größere Instandsetzungsmaßnahmen von Schäden während der Lagerung und des Transports zu vermeiden, ist auf die sorgfältige Manipulation der Tübbinge zu achten. Geringe Unachtsamkeiten beim Abheben der Fertigteile können zu Abplatzungen führen, die eine aufwendige Instandsetzung erforderlich machen. Auf mögliche Schäden durch den Transport wird im Kapitel 7.2 genauer eingegangen.

5.1 Lagerung

Zur Erreichung der erforderlichen 28-Tage-Festigkeit müssen die Tübbinge dem Vortrieb entsprechend im Vorlauf produziert und vorgelagert werden. Für die Lagerung ist eine ausreichende Fläche vorzusehen. Zudem sind Anforderungen an den Lagerplatz einzuhalten. Der Untergrund muss eben und tragfähig sein. Durch die Lagerung darf der Tübbing keine Formänderungen mehr erfahren. Außerdem ist er vor schädlichen Witterungseinflüssen zu schützen.[124]

Die Beanspruchungen aus der Lagerung wurden in Kapitel 3.1.1 bereits erläutert. Ebenda wird auch die Unterstützung durch Hölzer und die Anordnung derer beschrieben.

Die Tübbinge können liegend oder auf der Ringfuge stehend gelagert werden.

5.1.1 Stehende Lagerung

Die stehende Lagerung kann bei Tübbingen mit geringeren bis keinen Anforderungen an die Dichtigkeit zur Anwendung kommen. Wenn am Betonfertigteil ein Dichtrahmen angebracht ist, kann diese Lagerungsart zu Schäden am Dichtprofil führen. Deshalb ist sie auch ungeeignet für Tübbinge des einschaligen Ausbaus. Die Lagerung kann auch auf mehreren Ebenen erfolgen.

[124] Siehe [RIL09] Seite 42 - 44



Abb.5.1: Stehende Tübbinglagerung [@VOI]

5.1.2 Liegende Lagerung

Tübbinge mit Anforderungen an die Dichtigkeit werden liegend gelagert, um mögliche Schäden am Dichtrahmen aufgrund der Lagerung zu vermeiden. Abhängig vom Logistikkonzept kann die Lagerung mit der Bergseite nach oben oder nach unten erfolgen. Zumeist wird der Tübbing in der Halle vor der Ausrüstung gewendet und am Lagerplatz mit der Bergseite nach unten gelagert. Zum Schutz vor Beschädigungen durch den Kontakt mit anderen Tübbingen werden Auflagerhölzer verwendet. In der nachstehenden Abb.5.2 und in Abb.7.6 auf Seite 73 ist die liegende Lagerung von Tübbingen mit einer günstigen Anordnung der Abstandshölzer abgebildet.

Die Tübbinge können auf mehrere Arten liegend gestapelt werden. Die zwei üblichsten Arten sind:[125]

- RINGWEISE STAPELUNG: Die Segmente eines Ringes werden auf einem Lagerplatz übereinander gestapelt. Für die Beladung des Transportfahrzeugs, welches die Tunnelvortriebsmaschine versorgt, wird immer ein Lagerplatz mit vollständigem Ringsatz verwendet.
- SORTENREINE STAPELUNG: Die Segmente mit gleichem Typ werden übereinander gestapelt. Schadhafte Tübbinge können ohne Umlagerung entfernt werden.

[125] Siehe [RIL09] Seite 44



Abb.5.2: Liegende Tübbinglagerung [@HFW]

5.2 Transport

Um die Tübbinge, sofern diese nicht vor Ort in einer Feldfabrik hergestellt werden, vom Werk zur Baustelle zu transportieren, ist die Benutzung des öffentlichen Straßennetzes meist unumgänglich. Hierfür sind die jeweiligen Straßenverkehrsordnungen einzuhalten. In der Richtlinie 96/53/EG des Rates der Europäischen Union[126] sind die höchstzulässigen Abmessungen und Gewichte von Straßenfahrzeugen in der Europäischen Union geregelt. Diese Richtlinie wurde in Österreich im Kraftfahrgesetz 1967 (KFG)[127] umgesetzt. Gemäß § 4 Absatz 7a KFG darf bei Kraftwagen mit Anhängern die Summe der Gesamtgewichte sowie die Summe der Achslasten 40 to nicht überschreiten. Die Nutzlast des Kraftwagens ergibt sich aus dem maximal zulässigen Gesamtgewicht abzüglich des Eigengewichts des Kraftwagens und Anhängers. Die maximale Beladung für den Tübbingtransport ist durch die Nutzlast begrenzt. Daher sind für längere Tunnelprojekte sehr viele Transportwege erforderlich. Deshalb werden zumeist, wenn es die Platzverhältnisse und die Behörden erlauben, Tübbingproduktionsstätten vor Ort eingerichtet. Produktion in einer Feldfabrik und in einem stationären Fertigteilwerk werden im Kapitel 8 gegenübergestellt.

[126] Siehe Richtlinie 96/53/EG des Rates vom 25.07.1996 zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr

[127] Siehe KFG 1967 in der Fassung BGBl I 73/2015



Abb.5.3: Beladen eines Tunnelzugs [PLA15]

Für den Transport zur Tunnelvortriebsmaschine werden die Tübbinge im Portalbereich auf Versorgungswägen umgeschlagen. In Abb.5.3 wird ein Tunnelzug von einem Portalkran mit Tübbingen beladen. Für den Einbau ist es wichtig, dass die Tübbinge mit der Außenseite bzw. Bergseite nach unten zur Vortriebsmaschine gelangen. Meist geschieht das Wenden bereits zuvor in der Halle auf einem Wendetisch. Die Tübbinge werden dann wie in Abb.5.2 dargestellt mit der Innenseite nach oben gelagert. Die Wägen für den Tübbingtransport sind je nach Logistikkonzept des Tunnelprojekts gleis- oder radgebunden. Die Tübbinge werden im vorderen Bereich der Tunnelvortriebsmaschine von einem Vakkuumkran abgeladen.

6 Einbau

Ein Tübbingring besteht aus mehreren Segmenten, die hinter dem Bohrkopf im Schutze des Schildes mit einem Erektor (Punkt 1 in Abb.6.1) zu einem gesamten Ring zusammengebaut werden. Der Einbau beginnt meist im Sohlbereich. Dann werden alternierend links und rechts die Segmente angebracht, ehe der konische Schlussstein in die Lücke eingeschoben wird und den fertigen Tübbingring verspannt. Sobald ein Segment seine Einbauposition erreicht hat, wird es von den Vortriebspressen gegen den zuletzt fertiggestellten Tübbingring gedrückt (Punkt 2 in Abb.6.1) und verschraubt. Der fertige Tübbingring dient nicht nur zum Schutz vor Verbrüchen, sondern auch als Widerlager für die Vorschubpressen der Tunnelvortriebsmaschine. Die Kräfte werden über die Pressenschuhe in den zuletzt gebauten Ring übertragen, von wo diese dann durchgeleitet und über Reibung in den Baugrund abgetragen werden. Wie schon im Kapitel 3.1.1 auf Seite 39 erwähnt, sind die Einwirkungen aus dem Vortrieb meist für die Bemessung der Tübbinge maßgebend.[128]

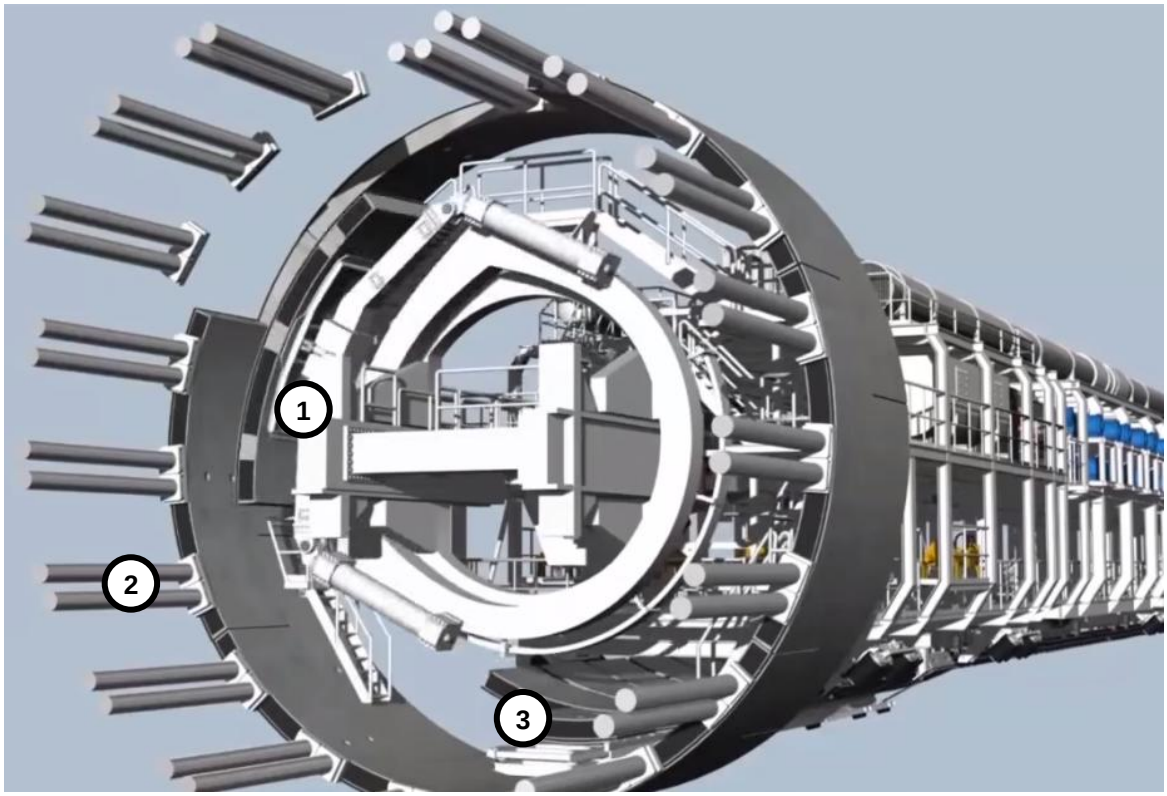


Abb.6.1: Ausschnitt einer Tunnelvortriebsmaschine [@HER]

Während beim oben genannten System Vortrieb und Ringbau intermittierend ablaufen, kann der Ringbau bei teleskopierbaren Doppelschild-Tunnelbohrmaschinen während des Vortriebs stattfinden. Die Vorschubkräfte werden bei dieser Art von Tunnelbohrmaschinen

[128] Siehe [BET13] Seite 249 - 250

über Gripperpaare in das Gebirge abgetragen. Der Einbau der Tübbinge ist hier für die Vortriebsdauer nicht maßgebend.[129]

6.1 Maschinentechnische Anforderungen

6.1.1 Vortriebspressen

In der Planung der Tunnelvortriebsmaschine ist das Tübbingsystem für die Anzahl und Anordnung der Vortriebspressen zu berücksichtigen.[130] In Kapitel 2.7.4 wird näher auf die Anordnung der Vortriebspressen in Abhängigkeit der Längsfugen eingegangen.

6.1.2 Tübbingkran und Erektor

Für einen genauen und beschädigungsarmen Einbau ist eine exakte Steuerbarkeit des Erektors erforderlich. Für das Heben und Steuern der Tübbinge werden meist dreifache Saugkissen verwendet, damit der Ringbau beim Ausfall einer Saugkammer nicht gestört wird.[131] Tübbingkran und Erektor werden auf das Maximalgewicht der Tübbinge ausgelegt. Der Tübbingkran hebt die Segmente vom Versorgungswagen auf den Tübbingfeeder (Punkt 3 in Abb.6.1), der die Segmente in den Erektorbereich transportiert. Der Erektor saugt die Segmente über die Vakuumsaugplatte an und bringt diese in Position. Für die richtige Positionierung des Erektors besitzt dieser eine Nase, die in den Konus[132] der Tübbinginnenseite geführt wird.

Um eine optimale Positionierung der Tübbinge zu gewährleisten, muss der Erektor folgende Bewegungen bewerkstelligen können:[133]

- ♦ Verschiebung in Tunnellängsrichtung
- ♦ 360° Drehung um die Schildachse in beide Richtungen
- ♦ Radiales Ein- und Ausfahren
- ♦ Verkippen des Erektorkopfes in Tunnellängs- und Querrichtung
- ♦ Verdrehen des Erektorkopfes

6.1.3 Schildschwanzdichtung

Die Schildschwanzdichtung dient zur Abdichtung zwischen der Schildschwanzinnenseite und der Tübbingaußenseite und soll Eindringen von Wasser, Boden und Verpressmaterial verhindern. Hierfür werden meist Stahlbürsten verwendet. Diese sind in drei bis vier Rei-

[129] Siehe [JOD04] Seite 28

[130] Siehe [RIL09] Seite 45

[131] Siehe [GIR13] Seite 586

[132] Ein Konus ist eine kegelstumpfförmige Vertiefung in der Mitte der Tübbinginnenseite.

[133] Siehe [RIL09] Seite 45

hen ringsum angeordnet. Die Kammern dazwischen werden mit Fett gefüllt, welches permanent unter Druck gehalten wird. So wird das Eindringen von Wasser, Boden und Verpressmaterial unterbunden.[134] Alternativ zu den Stahlbürsten können auch Kunststoffdichtungen zum Einsatz kommen. Diese Dichtungsart kann jedoch keinen Druck aufbauen und somit dem Wasserdruck nicht entgegenwirken. Ein Vorteil der Kunststoffdichtung ist jedoch der schnelle Austausch bei Schäden.[135]

6.2 Einbaukontrollen und –prüfungen

Vor dem Einbau werden die Tübbinge im Zuge einer Endabnahme am Lagerplatz für den Transport freigegeben. Die einzelnen Segmente werden auf Fehlstellen untersucht. Die Kriterien für die Transportfreigabe sind im Bauvertrag geregelt. Nicht konforme Tübbinge sind gesondert zu betrachten und einer technischen Bewertung hinsichtlich Verwendbarkeit zu unterziehen. Weisen diese nur optische Mängel auf und ist die Gebrauchstauglichkeit gegeben, so können auch nicht-konforme Tübbinge unter bestimmten Voraussetzungen, wie zum Beispiel Qualitätsabzug, zum Einbau freigegeben werden.[136] Werden Fehlstellen an den Tübbingen festgestellt, müssen diese gemäß einem Instandsetzungskonzept saniert werden. Ein solches sollte im QM-Handbuch enthalten sein. Darin wird beschrieben, wie mit den Fehlstellen umzugehen ist und wie die Instandsetzung erfolgt. Hinsichtlich der Sanierung bzw. Instandsetzung von Schäden wird auf das Kapitel 7 verwiesen.

Schäden können auch im Zuge des Transportes der Tübbinge vom Lagerplatz zur Einbaustelle entstehen. Daher müssen die Tübbinge vor dem Einbau nochmals auf Schäden geprüft werden. Auch nach dem Einbau erfolgt noch eine Kontrolle der Tübbinge auf Fehl- und Schadstellen infolge des Einbaus, Aufbringens der Vortriebskräfte sowie Gebirgs- und Wasserdrucks.[137]

6.3 Ringspaltverfüllung

Durch den Überschnitt des Schneidrades entsteht verfahrensbedingt zwischen dem Gebirge und dem Tübbing ein Hohlraum, der als Ringspalt (siehe Abb.6.2) bezeichnet wird. Die Dicke des Ringspaltes ist von der Bodenverdrängung bei der Kurvenfahrt, der Konizität des Schildmantels und der Schildschwanzdicke abhängig und beträgt zwischen acht und zwanzig Zentimetern. Um ein Aufschwimmen der Tunnelröhre infolge Auftriebs und ein Absinken infolge der Nachläuferbelastung zu vermeiden, wird dieser Ringspalt unmit-

[134] Siehe [GIR13] Seite 206

[135] Siehe [MAI11] Seite 170 - 172

[136] Siehe [RIL09] Seite 46 - 47

[137] Siehe [RIL09] Seite 46 - 47

telbar nach dem Einbau eines Tübbingringes mit Verpressmaterial verfüllt. Zudem stellt das Verpressmaterial die kraftschlüssige Verbindung des Gebirges mit dem Tübbingausbau her.[138]

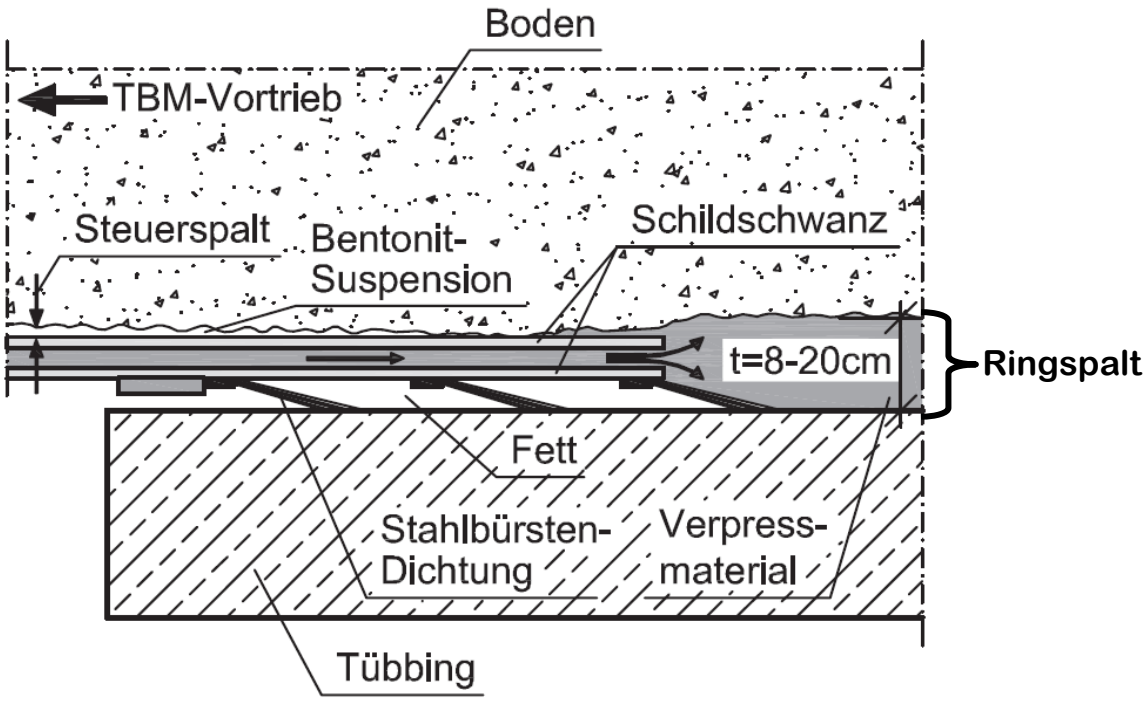


Abb.6.2: Ringspaltverfüllung [BET13]

Als Verpressmaterial wird meist Ringspaltmörtel oder Perlkies verwendet. Die Wahl ist vom Baugrund abhängig und projektspezifisch festzulegen. Das Material hat mehrere Anforderungen zu erfüllen:[139]

- ♦ Kraftschlüssige Verbindung des Gebirges mit der Auskleidung
- ♦ Bettung der Tunnelröhre
- ♦ Abstimmung der Steifigkeit an das Gebirge
- ♦ Setzungen an der Oberfläche vermindern bzw. vermeiden
- ♦ Gute Verarbeitbarkeit

6.3.1 Perlkies

Für die Verwendung von Perlkies werden gerundete oder leicht gebrochene Körner mit einem Durchmesser von acht bis zwölf Millimetern ohne Feinanteile benötigt. Eingesetzt wird dieser bei Vortrieben im offenen Modus ohne Stützung in standfestem Gebirge, wo der Einsatz von Verpressmörtel zu Schäden an der Tunnelvortriebsmaschine führen könnte. Um die Drainagewirkung des Perlkies zu verhindern, kann der Porenraum im Kies

[138] Siehe [BRE13] Seite 417

[139] Siehe [THE09] Seite 707

mit einer Zementsuspension in bestimmten Abständen verpresst werden.[140] Der Perlkies wird durch dafür vorgesehene Öffnungen im Tübbing in den Ringspalt eingeblasen. Dadurch wird dieser ausreichend verdichtet, um Druck- und Schubkräfte ins Gebirge einzuleiten.[141]

6.3.2 Ringspaltmörtel

Der Ringspaltmörtel wird beim Vortrieb im Gebirge mit geringer Standfestigkeit eingesetzt und besteht im Wesentlichen aus Zement, Flugasche, Wasser, Gesteinskörnung und Bentonit.[142] Es werden unterschiedliche Anforderungen an den Mörtel gestellt:[143]

- Verlängerte Verarbeitbarkeit, da immer nur geringe Mengen benötigt werden, allerdings aus logistischen Gründen eine größere Menge geliefert wird
- Gute Fließfähigkeit, jedoch nur bis zum Zeitpunkt des Vepressens, um den Ringspalt vollständig zu verfüllen
- Gute Pumpfähigkeit
- Rasche Festigkeitsentwicklung nach dem Verpressen

An die Druckfestigkeit des Mörtels werden nur geringe Anforderungen gestellt. So muss diese nach 24 Stunden größer 0,12 N/mm² sein.[144]

Beim Ringspaltmörtel wird zwischen Einkomponenten-Mörtel und Zweikomponenten-Mörtel unterschieden. Beim Einkomponenten-Mörtel werden die Bestandteile bereits vor der Verpressung vermischt. Um die Pump- und Verarbeitbarkeit zu verbessern, kann dem Mörtel ein Beschleuniger zugemischt werden (Zweikomponenten-Mörtel). Die beiden Komponenten werden erst kurz vor bzw. während dem Einbringen in den Ringspalt vermischt. Die Reaktionszeit kann durch Dosieren der Komponenten gesteuert werden.[145]

Der Ringspaltmörtel kann entweder durch Öffnungen im Tübbing oder durch Leitungen im Schildschwanz eingebracht werden. Bei der Verfüllung durch die Tübbinge müssen diese mit einem Verpressstutzen ausgerüstet sein, um das Verpressgut zurückzuhalten, nachdem es in den Ringspalt eingepresst wurde. Bei der Verpressung durch den Schildschwanz wird der Mörtel kontinuierlich eingebracht.[146]

[140] Siehe [THE09] Seite 708

[141] Siehe [BRE13] Seite 420

[142] Siehe [MAI11] Seite 151

[143] Siehe [BRE13] Seite 418

[144] Siehe [RIL09] Seite 61

[145] Siehe [THE09] Seite 707 - 709

[146] Siehe [THE09] Seite 709

Eine Weiterentwicklung stellt der verformbare Ringspaltmörtel dar. Durch Deformationen im Gebirge wird die Tübbingröhre zusätzlich belastet. Durch einen verformbaren Ringspaltmörtel, der ein Stauchungsvermögen bis zu 50% besitzt, kann die Kraftübertragung auf die Tübbinge zufolge Deformationsbeanspruchungen reduziert werden. Dieses Verpressmaterial muss sich in der Praxis noch bewähren.[147]

[147] Siehe [THE09] Seite 711

7 Fehl- und Schadstellen

Vom Herstellungsbeginn bis zum Einbau der Tübbinge können unterschiedliche Fehl- und Schadstellen am Tübbing auftreten. Während einige behoben werden können bzw. eine Instandsetzung zur Erfüllung der vertraglichen Anforderungen erforderlich ist, gibt es ebenso Fehlstellen und Schäden, die nicht behoben werden dürfen und so zum Ausschluss des Tübbings führen.

Bei den meisten Schäden ist die Tragfähigkeit des Tübbings nicht gefährdet, allerdings kann die Instandsetzung sehr teuer werden und zu wirtschaftlichem Misserfolg der gut kalkulierten Tübbingproduktion führen.[148]

Eine Unterteilung der Schäden kann nach dem Zeitpunkt deren Entstehung vorgenommen werden: Herstellung, Transport, Lagerung und Einbau.

Zudem muss nach dem Ausbautyp unterschieden werden. Bei zweischaligen Tunnelbauwerken, wo der Tübbing als Außenschale nur zum Schutz vor Verbrüchen und zur Aufnahme der Vortriebskräfte dient, sind Beschädigungen, die die Standsicherheit des Ringes nicht beeinträchtigen, weniger kritisch. Bei einem einschalig mit Tübbingen ausgebauten Tunnel sind die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit, Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Tübbinge weitaus höher, da der Tübbingausbau als endgültige Auskleidung des Tunnels dient. Die Instandsetzung von Schäden ist unumgänglich und mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden.[149]

Solange ein schadhafter Tübbing nicht eingebaut ist, kann er entweder gemäß einem vertraglich vereinbarten QM-Handbuch fachgerecht instand gesetzt oder er muss ausgeschieden werden. Im eingebauten Zustand kann der Tübbing nicht mehr ausgewechselt werden, es ist eine Sanierung im Tunnel notwendig. Um solch kostenintensiven Instandsetzungsmaßnahmen zu vermeiden, ist die Schadensquote möglichst gering zu halten.[150]

7.1 Fehlstellen und Schäden im Herstellungsprozess

Im Zuge der Herstellung von Tübbingen können Fehlstellen auftreten, die eine Instandsetzung erfordern. Ob die Instandsetzung im jeweiligen Fall erforderlich bzw. zulässig ist, ist von Art und Ort der Fehlstelle abhängig. Hat eine Fehlstelle keine Auswirkungen auf Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit, braucht diese auch nicht behandelt zu wer-

[148] Siehe [GRÜ98] Seite 324

[149] Siehe [MAI11] Seite 155 - 156

[150] Siehe [BET13] Seite 280 - 281

den.[151] Nach dem Ausschalen muss jeder Tübbing auf Fehl- und Schadstellen wie Poren, Lunker, Kiesnester, Ausbrüche oder Risse augenscheinlich untersucht werden.

In den folgenden Kapiteln 7.1.1 bis 7.1.7 werden Fehl- und Schadstellen im Herstellungsprozess beschrieben.

7.1.1 Nester

Nester können durch unzureichendes Verdichten des Betons entstehen. Auch eine undichte Schalung kann durch Auslaufen von Zementleim zur Bildung einer solchen Fehlstelle führen. Wird der Beton aus zu großer Höhe eingebracht, kann es zur Entmischung des Betons und so zur Nesterbildung kommen.[152] Nester in der Dichtungsnut, wie in Abb.7.1, sind gemäß der Richtlinie [RIL09] der ÖVBB unzulässig und die davon betroffenen Tübbinge sind auszuscheiden.[153]



Abb.7.1: Nesterbildung [PLA15]



Abb.7.2: Unzulässige Lunkerbildung in der Dichtungsnut [RIL09]

7.1.2 Lunker

Lunker entstehen an der Betonoberfläche durch Lufteinschlüsse in der Schalung. Werden die Toleranzen hinsichtlich der Tiefe und Häufigkeit gemäß den vertraglichen Anforderungen überschritten, sind die Lunker unzulässig und müssen dem vertraglich vereinbartem Instandsetzungskonzept entsprechend fachgerecht geschlossen werden. Die zulässige Lunkertiefe wird zu Projektbeginn bestimmt und in der Festlegung des Nennmaßes der Mindestbetondeckung berücksichtigt (siehe dazu auch Abb.4.4 auf Seite 46).[154]

In der Dichtungsnut müssen alle Lunker geschlossen werden, damit es zu keiner Unterwanderung des Dichtprofils kommt. Wird die Verdichtungsenergie auf Konsistenz und

[151] Siehe [RIL09] Seite 47

[152] Siehe [WEB13] Seite 29 - 30

[153] Siehe [RIL09] Seite 51

[154] Siehe [RIL09] Seite 48

Verarbeitbarkeit des Betons abgestimmt, kann die Lunkerbildung vermindert werden.[155] Bevor die Lunker in der Dichtungsnut instand gesetzt werden, ist der Nutgrund mit Stahlbürsten zu bearbeiten und das Lunkerbild zu bewerten. Gemäß der Richtlinie [RIL09] ist eine Instandsetzung unzulässig, wenn Lunker mehr als 30% der Nutgrundbreite, wie in Abb.7.2, ausfüllen.[156]

7.1.3 Abrisse und Abplatzungen

Abrisse und Abplatzungen entstehen bei der Tübbingherstellung durch Ausschalen bei zu geringer Betonfestigkeit und unsachgemäßem Abheben aus der Schalung. Wird zu wenig Trennmittel verwendet, sind Abplatzungen beim Ausschalen auch möglich, da der Beton an der Schalung haften könnte. Abrisse und Abplatzungen in der Dichtungsnut sind gemäß der Richtlinie [RIL09] unzulässig.[157]

Um Abplatzungen bei den Kanälen für die Tübbingverschraubungen zu vermeiden, werden die Schwerter bei der Schalung etwa zwei Stunden nach dem Betonieren gezogen. Der Zeitpunkt des Ziehens der Schwerter ist von der Frühfestigkeit des Betons abhängig. Zu frühes Ziehen führt zum Zuwachsen des Loches. Werden die Schwerter zu spät gezogen, haftet der Beton an den Schwertern, sodass ein schadfreies Ziehen nicht mehr möglich ist.

Kleinflächige Abplatzungen an der Luftseite der Tübbinge werden meist nicht instand gesetzt, wenn die Mindestbetondeckung gegeben ist.

7.1.4 Risse

Die zulässige Rissbreite ist von der Anforderungsklasse des Ausbausystems abhängig. An dieser Stelle wird auf die Tab.2.1 auf Seite 15 verwiesen, wo die Anforderungsklassen gemäß der Richtlinie [RIL09] definiert sind. Im Nutgrund gelten strengere Regeln. So sind Risse bis 0,15 mm Rissweite und bis zu 30% der Nutgrundbreite zulässig. Tübbinge mit Rissen außerhalb der Toleranzvorgaben gemäß [RIL09] sind auszuscheiden.[158]

7.1.5 Dichtrahmen

Um die Dichtigkeit gewährleisten zu können, sind Beschädigungen am Dichtrahmen, wie in Abb.7.3, nicht zulässig. Zur Instandsetzung wird der defekte Bereich ausgeschnitten,

[155] Siehe [BAB12] Seite 34

[156] Siehe [RIL09] Seite 50

[157] Siehe [RIL09] Seite 48 - 51

[158] Siehe [RIL09] Seite 49 - 50

ein neues Profil eingesetzt und mit dem restlichen Dichtrahmen vulkanisiert. Das Dichtprofil muss kraftschlüssig mit dem Tübbing verklebt sein.[159]

Auch die korrekte Lage des Dichtrahmens in der Dichtungsnut ist zu prüfen. Eine Aufschnabelung bzw. Einschnürung (siehe Abb.7.4) des Dichtrahmens an den Ecken entsteht, wenn sich der Dichtrahmen nicht in einer Flucht mit der Ecke befindet. Dies kann im eingebauten Zustand zu undichten Stellen führen. Daher muss der Dichtrahmen an dieser Stelle nochmals gelöst, richtig positioniert und neu verklebt werden.



Abb.7.3: Beschädigung [PLA15]

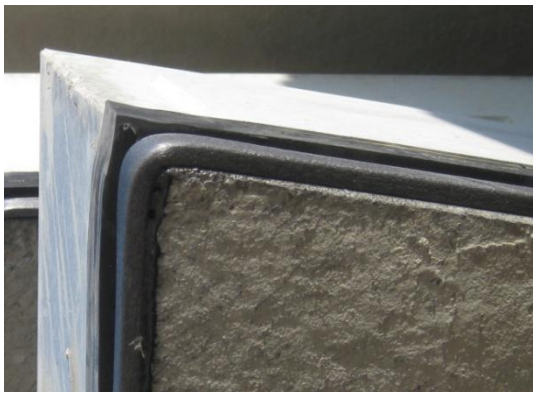


Abb.7.4: Einschnürung [PLA15]

7.1.6 Unterschreitung der Mindestbetondeckung

Die Mindestbetondeckung darf nicht unterschritten werden.[160] Zur Messung wird ein Betondeckungsmessgerät verwendet. Im Falle zu geringer Betondeckung ist der Tübbing auszuscheiden oder mit einem Oberflächenschutzsystem zu versehen. Das Oberflächenschutzsystem verhindert das Eindringen von Kohlenstoffdioxid und chemischen Stoffen und schützt dadurch die Bewehrung im Tübbing vor Korrosion. Beton besitzt einen hohen pH-Wert. Durch dieses basische Milieu wird die Bewehrung im Stahlbeton vor Korrosion geschützt. Die chemische Reaktion von Kohlenstoffdioxid und Feuchtigkeit im Beton wird als Carbonatisierung bezeichnet. Die Carbonatisierung setzt den pH-Wert des Betons herab und verringert so den Korrosionsschutz. Bei Feuchtigkeit besteht durch die Carbonatisierung somit die Gefahr, dass die Bewehrung korrodiert. Durch den Oberflächenschutz wird gewährleistet, dass die Bewehrung bei Unterschreitung der Mindestbetondeckung vor Korrosion geschützt ist.

7.1.7 Überschreitung der Fertigungstoleranzen

Zur Vermeidung von Zwangsbeanspruchungen aufgrund von geometrischen Abweichungen im eingebauten Zustand sind die Herstellungstoleranzen einzuhalten und regelmäßig

[159] Siehe [RIL09] Seite 52

[160] Siehe [RIL09] Seite 49

zu überprüfen. Die Überschreitung der Toleranzen kann durch eine Abweichung der Schalung vom Soll-Zustand hervorgerufen werden. Daher ist die Schalung ebenfalls regelmäßig zu vermessen.[161]

7.2 Schäden bei Transport und Lagerung

Die meisten Schäden während des Transports und der Lagerung der Tübbinge treten durch Stoßberührungen auf und sind durch sachgemäße Handhabung vermeidbar.[162]

Bei der Lagerung der Tübbinge ist darauf zu achten, dass die Abstandhölzer an der richtigen Position liegen, um Stoßberührungen zu vermeiden. Die Tübbingstapel sind möglichst gerade und in ausreichendem Abstand zueinander aufzubauen, da eine unsachgemäße Stapelung zu Beschädigungen an den Tübbingen und Gefahrsituationen für das Lagerplatzpersonal führen kann. Zur Vermeidung von Biegerissen während Lagerung und Transport sind die Lagerungsbedingungen in der Planung vorab zu definieren und in der Ausführung einzuhalten.[163]

Beim Anheben der Segmente mit Gabelstapler oder Kranzange kann es sehr leicht zu Abplatzungen an den Tübbingen kommen. Eine schlecht eingestellte Zange, zu kurze Auflagerpunkte und unsachgemäßes Steuern des Kranes sind häufige Schadensursachen. Solche Abplatzungen können zum Ausschluss des Tübbings führen, wenn diese bis in den Bereich der Dichtungsnut reichen. In Abb.7.5 ist ein Zangenschaden, ausgelöst von einer Kranzange, abgebildet. Die Dichtigkeit des Tübbings kann hier nicht mehr gewährleistet werden. Instandsetzungsmaßnahmen für Schäden solcher Art sind sehr kostenintensiv. Treten solche Schäden öfters auf, sollte umgehend die Einstellung des Hebegerätes überprüft werden, um so die Anzahl beschädigter Tübbinge gering zu halten. Durch Arbeitsvorbereitung und optimale Logistik kann die Anzahl der Umschläge der Tübbinge reduziert werden. Dies und die sachgemäße Handhabung aller Transportgeräte verkleinern das Gefahrenpotential von Abplatzungen.

[161] Siehe [BAB12] Seite 33

[162] Siehe [GRÜ98] Seite 325 - 326

[163] Siehe [BET04] Seite 347

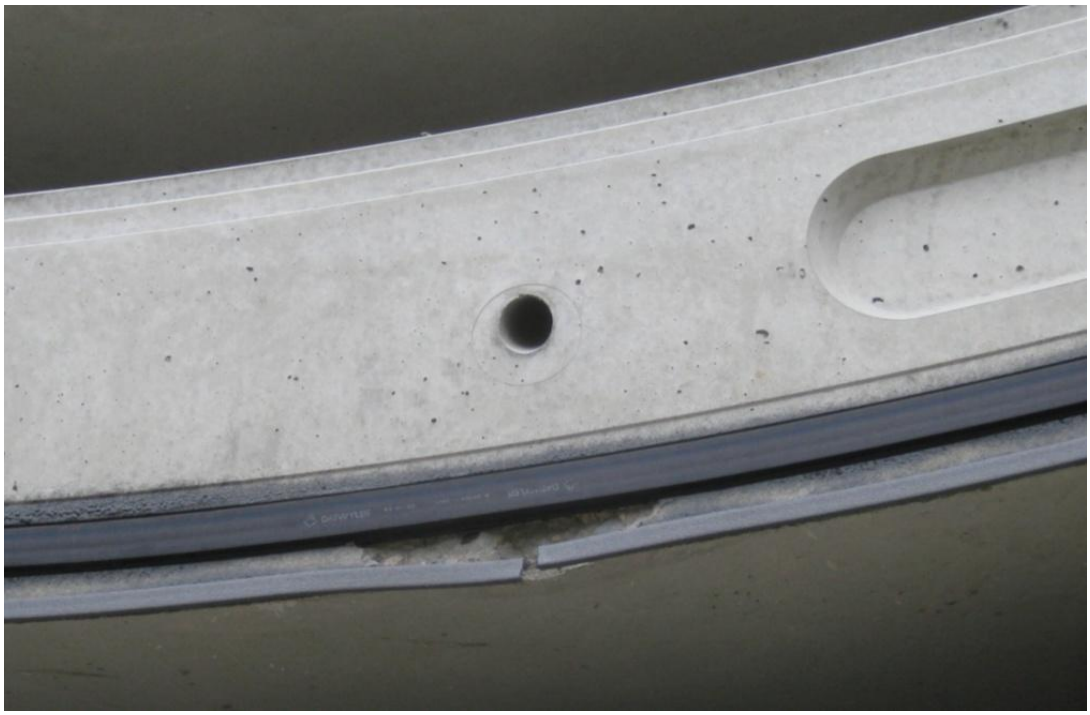


Abb.7.5: Zangenschaden [PLA15]

Aufgrund des hohen Platzbedarfs werden Tübbinge zumeist im Freien gelagert, sie sind daher den äußeren Witterungsbedingungen ausgesetzt. Die Verklebung von Dichtrahmen und Vordichtung sollte trotz Temperatureinwirkungen und Nässe am Tübbing haften. Eine Wasseransammlung im Konus des Tübbings kann bei Kälte gefrieren und so zu Schäden am Tübbing führen. Um ein Eindringen des Wassers zu verhindern, werden diese Vertiefungen, die zum Positionieren des Erektors dienen, bis zum Transport in den Tunnel mit einem Schaumstoffzylinder geschlossen. Für den Verschluss der Dübelöffnungen haben sich Verschlusskappen aus Kunststoff bewährt. Die Schutzvorrichtungen sind in Abb.7.6 dargestellt.

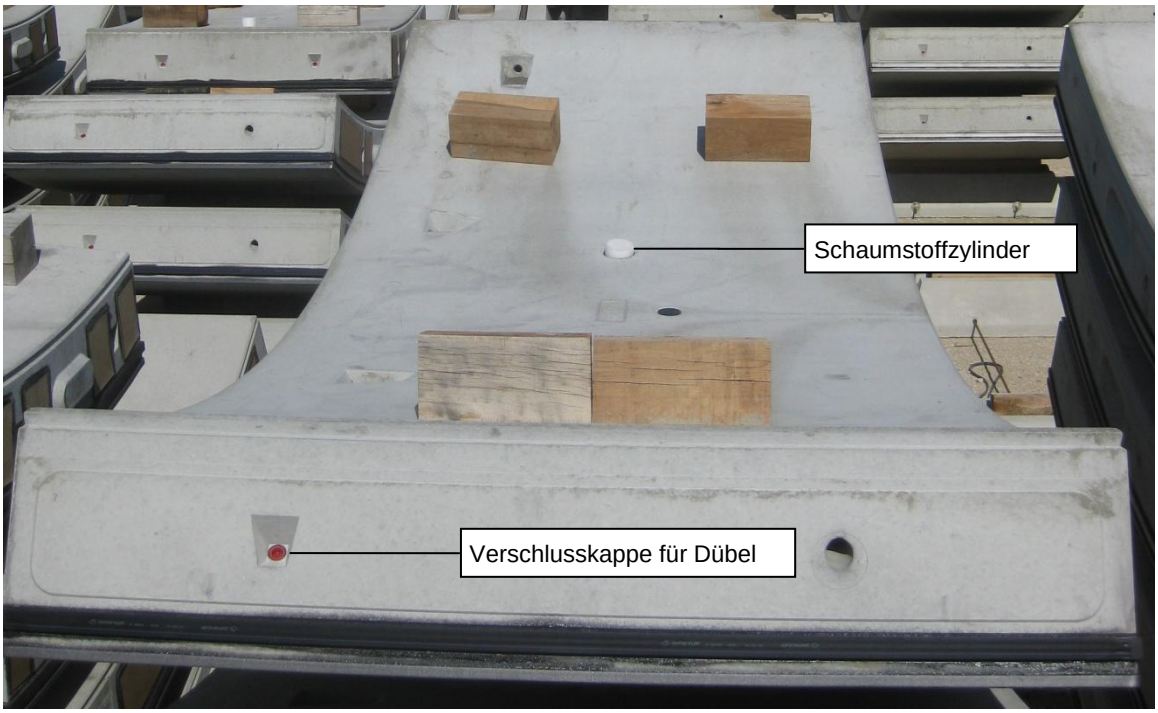


Abb.7.6: Temporäre Verschlüsse [PLA15]

7.3 Schäden im Bauzustand

Die Ursachen für die häufigsten Erscheinungsformen der Schäden im Bauzustand (Risse und Abplatzungen) sind zu hohe Beanspruchungen aus dem Vortrieb, ungenauer Einbau und daraus resultierende geometrische Unverträglichkeiten.[164] Im Endzustand nimmt der Ausbau, bestehend aus Tübbingring und Ringspaltverfüllung, Einwirkungen aus den äußeren Lasten schadlos auf. Die Schäden entstehen zumeist in Vortriebsnähe bei den letzten zehn Ringen hinter der Tunnelvortriebsmaschine, wo noch keine vollständige Verfüllung oder Aushärtung des Ringspaltes gegeben ist.[165]

7.3.1 Schäden bei der Ringmontage

Je sorgfältiger der Ringbau erfolgt, desto geringer ist das Schadenspotential. Beim Einschub des Schlusssteins kann es zu Beschädigungen an der Dichtung und zu Betonabplatzungen kommen.[166] Durch das Einschieben erfährt die Dichtung in der Längsfuge Schubspannungen, die bei mangelhafter Verklebung des Dichtrahmens zum Ablösen und Verschieben desselben führen und Undichtigkeiten hervorrufen. Durch sorgfältige Verklebung des Dichtrahmens kann der Widerstand gegen diese Schubspannungen vergrößert werden.[167] Das Einfetten der Dichtung kann das Einschieben des Schlusssteins erleich-

[164] Siehe [MAI11] Seite 155 - 156

[165] Siehe [GRÜ98] Seite 346 - 347

[166] Siehe [MAI11] Seite 156

[167] Siehe [BAB12] Seite 38

tern.[168] Bei zu geringem Abstand der Dichtungsnut zur Außenseite kann die Dichtigkeit nicht mehr gewährleistet werden, da es zu Abplatzungen aufgrund von Scherbruch der Nutflanken kommen kann. Daher ist bereits in der Planung ein ausreichender Abstand des Dichtrahmens zur Tübbingaußenseite in Abhängigkeit des Dichtprofils und der zu erwartenden Kompressionsdrücke zu berücksichtigen.[169]

Zudem kann es beim Einschieben des Schlusssteins zu Abplatzungen an den Flanken kommen. Um dies zu vermeiden, wird vor dem Ringschluss der Öffnungswinkel mit einer Lehre überprüft. Sollte der Abstand für den Schlussstein zu klein sein, sind die Nachbarsteine nochmals zu lösen und deren Längsfugen stärker zu komprimieren.[170]

Versätze beim Einbau und Überschreitung der Toleranzen können zu Zwangsbeanspruchungen führen, die Betonabplatzungen und Risse hervorrufen.[171] Vor allem die Eckbereiche reißen durch Berührungen mit Nachbarsteinen häufig ab, da hier keine Bewehrung vorhanden ist.[172] Eck- und Kantenabplatzungen an der Innenseite der Tübbinge sind unkritisch, wenn die Gebrauchstauglichkeit, vor allem die Betondeckung, nicht gefährdet ist. An der Außenseite der Tübbinge hingegen können Instandsetzungsarbeiten sehr teuer werden, wenn die Abplatzungen bis in die Dichtungsnut reichen. Hier kann die Dichtigkeit nicht mehr gewährleistet werden. Instandsetzungsmaßnahmen sind im eingebauten Zustand nur schwer realisierbar. Teure Sondermaßnahmen wie Baugrundinjektionen können erforderlich werden.[173]

Beim Einbau werden die Segmente mit dem Erektor durch Vakuum angesaugt. Zur richtigen Positionierung des Erektors wird die Erektornase in den Konus geführt. Wird die Erektorplatte gelöst, kann die Dichtung auf Schub beansprucht werden und die Erektornase den Randbeton des Konus, wie in Abb.7.7, abreißen. Dieser Schaden kann durch sorgfältige Steuerung des Erektors verhindert werden.[174]

[168] Siehe [BET13] Seite 282

[169] Siehe [BET04] Seite 346

[170] Siehe [GRÜ98] Seite 329

[171] Siehe [BET13] Seite 281 - 282

[172] Siehe [GRÜ98] Seite 329 - 330

[173] Siehe [BET04] Seite 345

[174] Siehe [BAB12] Seite 36



Abb.7.7: Abplatzung im Konusbereich [BAB12]

7.3.2 Schäden beim Vortrieb

Nach Fertigstellung des Rings und der Wiederaufnahme des Vortriebs wird der zuletzt gebaute, noch im Schildbereich befindliche Tübbingring mit voller Vortriebskraft belastet. Obwohl die Segmente miteinander verschraubt sind, wird jedes Segment eine stabile Lage anstreben, wodurch es zu Verschiebungen kommt. Dabei werden oft die Koppelstellen (Nut und Feder oder Topf und Nocke) abgeschert.[175]

Wie schon in Kapitel 3.1.1 erwähnt, ist die Beanspruchung aus dem Vortrieb durch die Vortriebspressen für die Bemessung der Tübbinge maßgebend. Wirken zu hohe Pressenkräfte auf den Tübbingring ein, können Längsrisse entstehen, die erst zwei bis drei Ringe hinter der Maschine in Form von Feuchtstellen erkannt werden. Ausgelöst werden diese Risse auch durch Montageungenauigkeiten, die zur Biegebeanspruchung des Segments führen. Dieses Schadensbild kann durch einen sorgfältigen Ringbau verhindert werden.[176]

7.3.3 Schäden nach Verlassen des Schildschwanzes

Nach Verlassen des Schildschwanzes wird der Tübbingring durch den Erd- und Wasserdruck und den Belastungen aus dem Vortrieb beansprucht. Der Ringspaltmörtel ist in diesem Bereich noch nicht vollständig erhärtet, was bei Auftrieb zu einer Ovalisierung des

[175] Siehe [GRÜ98] Seite 330 - 332

[176] Siehe [MAI11] Seite 157

Ringes führen kann. Durch die richtige Auswahl des Verpressmörtels kann dieser Effekt verhindert werden.[177]

Die Belastung der Räder des Nachläufers kann bei ungünstiger Fugenstellung oder schlechter Ringspaltverpressung Schäden verursachen. Daher ist dies bei der Planung der Tunnelvortriebsmaschine zu berücksichtigen. Die ersten Fahrwerke des Nachläufers sind möglichst weit hinter dem Schildschwanz anzuordnen.[178]

7.4 Instandsetzung

Die in der Planung festgelegten Anforderungen an den Tübbing definieren das Erfordernis der Instandsetzung von Fehlstellen. Zudem werden in der Planung Kriterien festgelegt, inwiefern Fehlstellen instand gesetzt werden dürfen bzw. müssen und wann ein Tübbing auszuscheiden ist. Wie schon in Kapitel 7.1 erwähnt, ist die Art der Instandsetzung vom Ort des Entstehens der Fehlstelle oder Schadens und der jeweils betroffenen Stelle am Tübbing abhängig. Im eingebauten Zustand können nur Fehlstellen und Schäden an der Luftseite saniert werden.[179]

Für die Instandsetzung ist ein Konzept zu erstellen, welches die Instandsetzung sämtlicher Fehlstellen in Form von Arbeitsanweisungen beschreibt. Das ausführende Personal muss entsprechend geschult sein. Die Instandsetzung und die verwendeten Produkte müssen der ÖBV-Richtlinie „Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton“ [RIL14] und dem ÖVBB-Merkblatt „Schutzschichten für den erhöhten Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke“ entsprechen.[180]

Nach Feststellung eines Schadens ist zu beurteilen, ob Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit oder Tragfähigkeit beeinflusst werden und wie sich der Schaden weiterentwickelt, wenn dieser nicht behoben wird.[181] Jeder Tübbing ist nach dem Ausschalen auf Fehl- und Schadstellen zu untersuchen.

Jede Instandsetzungsmaßnahme, die später nicht mehr oder nur sehr schwer nachverfolgt werden kann, ist mit einem Protokoll zu belegen, welches dem Auftraggeber zu übermitteln ist. Wesentliche Fehlstellen, die die Gebrauchstauglichkeit einschränken könnten, sind dem Auftraggeber zu melden und eine Instandsetzung ist mit diesem abzusprechen. Ist die Instandsetzung zu kostenintensiv, wird der Tübbing ausgeschieden.

[177] Siehe [MAI11] Seite 158

[178] Siehe [GRÜ98] Seite 341 - 342

[179] Siehe [RIL09] Seite 53

[180] Siehe [RIL09] Seite 53

[181] Siehe [RIL14] Seite 9 - 12

Die in den folgenden Kapiteln 7.4.1 bis 7.4.6 beschriebenen Instandsetzungsmaßnahmen stellen Vorschläge für die Instandsetzung von Tübbingen mit Fehl- und Schadstellen dar. Die in Kapitel 7.4.7 abgebildete Tab.7.1 fasst diese Fehl- und Schadstellen zusammen und gibt einen Überblick über mögliche Instandsetzungsmaßnahmen.

7.4.1 Kiesnester, Poren und Lunker

Für eine fachgerechte Instandsetzung muss gewährleistet sein, dass die Instandsetzungsprodukte für die gegebenen Bedingungen (z.B. hohe Temperatur des Tübbings nach dem Ausschalen) auch geeignet sind. Andernfalls sind Maßnahmen zu ergreifen, um die erforderlichen Bedingungen herzustellen oder es müssen andere Produkte gewählt werden.[182]

Wird die Mindestbetondeckung oder das vertraglich erlaubte Maß durch Kiesnester, Poren und Lunker unterschritten, so müssen diese Fehlstellen geschlossen werden. Zur Instandsetzung werden die Hohlräume mit einem Spitzhammer bis zu ihrem maximalen Querschnitt geöffnet und die Zementschlämme werden entfernt. Die betroffene Stelle wird durch Ausblasen gereinigt und mit Wasser vorgenässt. Anschließend wird eine Haftbrücke mit Korrosionsschutz aufgetragen und die Hohlräume werden mit einem Instandsetzungsmörtel geschlossen. Dieser ist durch eine Folie vor Austrocknung zu schützen. Nach Abbinden des Mörtels werden die Oberflächen abgeschliffen, um den Querschnitt nicht zu ändern.[183]

7.4.2 Abplatzungen in den Flanken

Abplatzungen in den Flanken werden in ähnlicher Weise instand gesetzt wie Poren und Lunker. Auch hier werden die betroffen Schadstellen vorbereitet und vorgenässt. Der Reparaturmörtel ist ebenso vor Austrocknung zu schützen und nach Erhärtung abzuschleifen.[184]

7.4.3 Abplatzungen luftseitig[185]

Bei Abplatzungen an der Luftseite der Tübbinge, die die Mindestbetondeckung nicht unterschreiten, sind keine Maßnahmen erforderlich. Gebrauchstauglichkeit, Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit sind dadurch nicht gefährdet, es handelt sich hierbei nur um eine optische Schadstelle. Wird die Mindestbetondeckung jedoch unterschritten, müssen Maßnahmen ergriffen werden.

[182] Siehe [RIL09] Seite 53

[183] Siehe [RIL14] Seite 13 - 45

[184] Siehe [RIL14] Seite 13 - 45

[185] Siehe [RIL14] Seite 13 - 45

1) Abplatzungen mit Betondeckung > 20 mm

Bei verbleibender Betondeckung von mehr als 20 mm wird die betroffene Fehlstelle, wie in Abb.7.8 abgebildet, abgeschliffen, gereinigt und die Randbereiche werden abgeklebt. Zur Erhöhung der Betondeckung wird ein geeignetes Oberflächenschutzsystem aufgebracht, damit der Bauteil wieder den Anforderungen entspricht. In Abb.7.9 wird im ersten Schritt eine Tiefenhydrophobierung aufgetragen, danach folgt ein Schutzanstrich.



Abb.7.8: Vorbereitete Fehlstelle beim Konus [PLA15]



Abb.7.9: Oberflächenschutzsystem [PLA15]

2) Abplatzungen mit Betondeckung ≤ 20 mm

Wird eine verbleibende Betondeckung von 20 mm oder weniger gemessen, müssen weitere Maßnahmen gesetzt werden. Die abgeplatzten Stellen sind mindestens 10 mm tief einzuschneiden. Um späteres Abreißen der sanierten Stelle zu vermeiden, muss der Instandsetzungsmörtel mit Edelstahlankern am Tübbing verankert werden (siehe Abb.7.10). Der Mörtel wird mit Edelstahldraht konstruktiv bewehrt. Die nachbehandelte Stelle wird mit einer Folie abgedeckt, um ein rasches Austrocknen des Mörtels zu verhindern. In Abb.7.11 erfolgt die Darstellung einer instand gesetzten Schadstelle, die durch Vlies vor Austrocknung geschützt wurde. Bei Verkehrstunneln können sich nicht verankerte Fehlstellen durch die Belastung lösen und als lose Teile den Verkehr gefährden. Daher sind diese Schadstellen bei einem einschaligen Tübbingausbau zu verankern.



Abb.7.10: Verankerte Fehlstelle [PLA15]



Abb.7.11: Instand gesetzte Fehlstelle [PLA15]

3) Abplatzungen mit sichtbarer Bewehrung

Ist an einer Schadstelle die Bewehrung sichtbar, ist der freigelegte Betonstahl zu reinigen und mit Korrosionsschutz zu versehen. Danach wird der Untergrund vorgenässt und der Instandsetzungsmörtel aufgebracht. Nach Erhärten der abgedeckten Fehlstelle wird der überschüssige Mörtel abgeschliffen, um den Querschnitt wieder herzustellen.

7.4.4 Abplatzungen bis in die Dichtungsnut

Instandsetzungen von Abplatzungen, die bis in die Dichtungsnut reichen, wie der Zangenschaden in Abb.7.5, müssen durch Versuchsreihen geprüft werden. Dadurch wird festgestellt, ob nach der Instandsetzungsmaßnahme die Dichtigkeit wieder gewährleistet werden kann. Ansonsten sind die betroffenen Segmente auszuscheiden.

7.4.5 Risse[186]

Um das Eindringen von korrosionsfördernden Wirkstoffen zu verhindern, werden Risse mit einem Füllstoff, der von der Rissbreite abhängig ist, verfüllt. Als Füllung kommen Tränkungen und Injektionen zur Anwendung. Die Füllgüter dürfen keine korrosionsfördernden Eigenschaften aufweisen und sollen mit dem Betongefüge gut verträglich sein. Zum Einsatz kommen je nach Anwendungsgebiet Epoxidharze, Polyurethane, Zementleim und Zementsuspension.

Bevor mit der Instandsetzung begonnen wird, ist der Riss mittels Pressluft auszublasen.

Tränkungen füllen die Risse drucklos durch Pinseln oder Gießen. Die Füllgüter dringen durch die Kapillaraktivität und die Schwerkraft in den Riss ein. Durch Tränkungen werden nur Risse im oberflächennahen Bereich gefüllt.

[186] Siehe [SPR07] Seite 421 - 426

Bei Injektionen werden die Risse mit Bohrungen erschlossen und unter Druck mit Packern verfüllt. Die Bohrlöcher werden nach Entfernung der Packer mit Instandsetzungsmörtel verspachtelt.

7.4.6 Dichtrahmen

1) loser Dichtrahmen

Ist der Dichtrahmen nicht vollständig in der Nut verklebt oder hat sich die Verklebung gelöst, muss die betroffene Stelle neu verklebt werden.

2) Beschädigungen am Dichtrahmen

Bei Beschädigungen des Dichtrahmens wird dieser entweder ausgetauscht oder fachgerecht repariert. Die betroffene Stelle wird ausgeschnitten und durch ein neues Stück ersetzt. Dieses wird mittels Vulkanisierung mit dem unbeschädigten Rahmen verbunden.

7.4.7 Instandsetzungsmaßnahmenmatrix

Angelehnt an die Instandsetzungsmatrix der Richtlinie [RIL09] befindet sich nachfolgend in der Tab.7.1 eine Empfehlung für die Instandsetzung der jeweiligen Fehl- und Schadstelle. Die Instandsetzungsmaßnahme ist abhängig vom Ort der Fehlstelle und vom projektspezifischen Ausmaß. Der Planer gibt das Ausmaß (hier mit „a“, „b“, „c“ bezeichnet) vor Projektbeginn an. Dieses kann ein Längenmaß, eine Breite oder eine Fläche sein. Zum Beispiel wird das Ausmaß für die Lunkertiefe in Millimeter angegeben. Die Größenordnung für die Rissbreite befindet sich im Zehntel-Millimeter-Bereich. Zur Definition der Bereiche wird die Einteilung der Bereiche aus der Richtlinie [RIL09] übernommen:[187]



Abb.7.12: Einteilung der Bereiche eines gedichteten Tübbings [RIL09]

[187] Siehe [RIL09] Seite 54

Fehlstelle	Bereich	Ausmaß	keine Instandsetzung erforderlich	Instandsetzungs-maßnahme	Ausschuss
Lunker	Lastübertragungsbereich	a	x		
		b		7.4.1	
	Dichtungsbereich	a	x		
		b		7.4.1	
		c			x
	Sonstige Bereiche	a	x		
		b		7.4.1	
Risse	Lastübertragungsbereich	a	x		
		b		7.4.5	
		c			x
	Dichtungsbereich	a		7.4.5	
		b			x
Abplatzungen, Abrisse	Lastübertragungsbereich	a		7.4.2	
		b			x
	Dichtungsbereich	-			x
	Sonstige Bereiche	a	x		
		b		7.4.2	
	luftseitig Betondeckung eingehalten	-	x		
	luftseitig Betondeckung > 20mm	-		7.4.3 - 1)	
	luftseitig Betondeckung ≤ 20mm	-		7.4.3 - 2)	
	luftseitig Bewehrung sichtbar	-		7.4.3 - 3)	
Nester	Lastübertragungsbereich	a		7.4.1	
		b			x
	Dichtungsbereich	-			x
	Sonstige Bereiche	-		7.4.1	
Dichtung	Beschädigung am Rahmen	-		7.4.6 - 2)	
	Verklebung	-		7.4.6 - 1)	

Tab.7.1: Instandsetzungsmaßnahmenmatrix für ein gedichtetes Tübbingsystem [PLA15]

8 Gegenüberstellung Vor-Ort- und Werkproduktion

Die Herstellung von Tübbingen kann sowohl in einer für das jeweilige Bauprojekt errichteten Feldfabrik auf dem Baustellengelände als auch in einem bestehenden Werk, wo die Anlieferung der einzelnen Segmente zur Baustelle notwendig wird, erfolgen. Die Entscheidung für eine der beiden Varianten ist von mehreren Faktoren abhängig und wird in diesem Kapitel genauer erörtert. Sie kann durch unterschiedliche Vorschriften und Auflagen in der Ausschreibung, durch den Bauherrn oder auch durch Vorgaben der Behörden gelenkt werden. Oft liegt die Entscheidung der Ausführungsvariante gar nicht beim mit dem Projekt beauftragten Unternehmen.

8.1 Vor-Ort-Produktion in einer Feldfabrik

Eine Feldfabrik ist eine Tübbingproduktionsstätte auf der Baustelle, die eigens für das Bauprojekt errichtet und nach dessen Fertigstellung wieder abgebaut wird. Diese benötigt entsprechend viel Platz für die Fertigungshalle und den Lagerplatz. Schon die verfügbare Fläche bestimmt, ob eine Feldfabrik in Frage kommt.

Die Feldfabrik wird von einem Tübbingproduzenten betrieben. Dieser steht mit jenem Unternehmen bzw. jener Arbeitsgemeinschaft in einem Vertragsverhältnis, das bzw. die mit der Projektausführung beauftragt ist.

Bei der Errichtung eines Tübbingwerks entstehen hohe Investitionskosten. Die komplette Produktionsstätte samt deren Ausrüstungsteile müssen neu gekauft werden. Die Hauptposten der Investitionen bilden die Baufeldfreimachung, die Halle, die Mischanlage sowie die Krane am Lagerplatz und in der Fertigungshalle. Die Schalungssätze zählen im Vergleich zur Werkproduktion nicht zu den großen Investitionsposten, da diese in der Regel auch dort neu gekauft werden müssen. Nach der Fertigstellung werden die Investitionsgeräte wieder verkauft, wenn kein Nachfolgeauftrag lukriert wird.

Ein oft entscheidender Aspekt für die Errichtung einer Feldfabrik ist der ökologische Fußabdruck. Durch die Vermeidung der vielen Transporte der Tübbinge von einem stationären Werk zur Baustelle wird die Umwelt geschont. Abhängig von Anzahl, Größe und Gewicht der Segmente, der Entfernung vom nächst gelegenen Werk zur Baustelle sowie der Ladebegrenzung des Transportmittels werden bei einer Feldfabrik im Gegensatz zu einer Produktion im stationären Werk viele LKW-Fahrten eingespart und die CO_2-Emissionen so verringert. Zwar sind Materialanlieferungen, wie zum Beispiel Ausgangsstoffe für Beton und Bewehrung erforderlich, diese sind aber auch für stationäre Werke unumgänglich. Mag sein, dass die Fahrtstrecken zum stationären Werk kürzer als solche zur Feldfabrik sind, da sich viele Fertigteilproduzenten in der Nähe von Gewinnungsstätten mit geeigneten Gesteinskörnungen für Beton ansiedeln. Zusammenfassend kann

jedoch festgehalten werden, dass durch die Sperrigkeit der Segmente immer Leerfracht entsteht, die bei Schüttguttransporten zur Feldfabrik nicht anfällt. So ist - eine gewisse Projektgröße vorausgesetzt - meist eine positive CO_2-Bilanz für die Feldfabrik darstellbar.

Aus logistischer Sicht vereinfacht die Produktion in einer Feldfabrik die Lagerhaltung, da auf Erfordernisse des Vortriebs jederzeit reagiert werden kann. Durch die Reduzierung der Umschläge der Segmente wird auch das Risiko der Beschädigung verringert.

Durch die Errichtung der Feldfabrik auf dem Baustellengelände besteht eine örtliche Nähe zum Vertragspartner des Tübbingproduzenten. Der Kontakt zwischen den Vertragspartnern ist viel direkter als bei der Anlieferung der Segmente, wodurch problematische Aufgabenstellungen leichter und schneller gelöst werden können.

Beispiele für Tunnelprojekte mit Feldfabriken auf der Baustelle:

- Wienerwaldtunnel (Österreich): 35 cm Dicke, 2,25 m Ringlänge, 10,35 m Außendurchmesser, ~57.000 Segmente [@ÖBB]
- Koralmtunnel Baulos KAT 2 (Österreich): 35 cm Dicke, 1,9 m Ringlänge, 9,5 m Außendurchmesser, ~104.000 Segmente [@ÖBB]
- Koralmtunnel Baulos KAT 3 (Österreich): 35 cm Dicke, 1,9 m Ringlänge, 9,5 m Außendurchmesser, ~50.000 Segmente [@ÖBB]
- Finnetunnel (Deutschland): 45 cm Dicke, 2 m Ringlänge, 10,5 m Außendurchmesser, ~48.000 Segmente [DRE11]
- Bosslertunnel (Deutschland): 45 cm und 65 cm Dicke, 2 m Ringlänge, 10,94 m Außendurchmesser, ~50.000 Segmente [@BSU]

8.2 Werkproduktion

Die Produktion der Tübbinge in einem bestehenden Fertigteilwerk erfordert die Adaptierung der Einrichtungen in diesem. Produktionshalle, Brückenkrane und Betonmischanlage sind meist vorhanden und müssen nicht neu angeschafft, sondern gegebenenfalls nur entsprechend angepasst werden. Schalungssätze, Komponenten aus der Ausrüstungslinie, Handlingwerkzeuge usw. hingegen sind wie bei einer Feldfabrik neu anzuschaffen.

Bei der Werkproduktion entfallen Vorarbeiten für die Herstellung und Räumung der Produktionsstätte. Darüber hinaus können die Halle, die Mischanlage, die Krane und Teile der Produktionsausrüstung auf weitere Projekte abgeschrieben werden, wodurch sich ein wirtschaftlicher Vorteil ergibt. Weiters begünstigt, wie schon in Kapitel 8.1 erwähnt, die örtliche Ansiedelung von Betonfertigteilwerken die Anlieferung von Gesteinskörnungen für den Beton. Einrichtungen für die Verarbeitung von Bewehrung sind im Werk oft auch vorhanden oder können für weitere Projekte eingesetzt werden und begünstigen so die Tübbingproduktion in einem stationären Fertigteilwerk.

Für die Herstellung der Tübbinge in einem stationären Werk ist meist qualifiziertes Personal verfügbar, welches entsprechend geschult ist und sich schneller einarbeitet. Für Feldfabriken muss zuerst Personal gesucht werden, vor allem qualifiziertes Personal ist meist schwer zu finden. Auch die Einarbeitungszeit des Personals ist bei der Feldfabrik länger. In Abb.8.1 ist der Unterschied der Einarbeitungszeit *„Δ Einarbeitungszeit“* grafisch dargestellt. Während das Personal des stationären Werks zu einem früheren Zeitpunkt auf vollem Leistungsbetrieb ist, dauert die Einarbeitungszeit des Personals einer Feldfabrik wesentlich länger, da das Personal des stationären Werks bereits mit den notwendigen Arbeitsschritten vertraut ist.

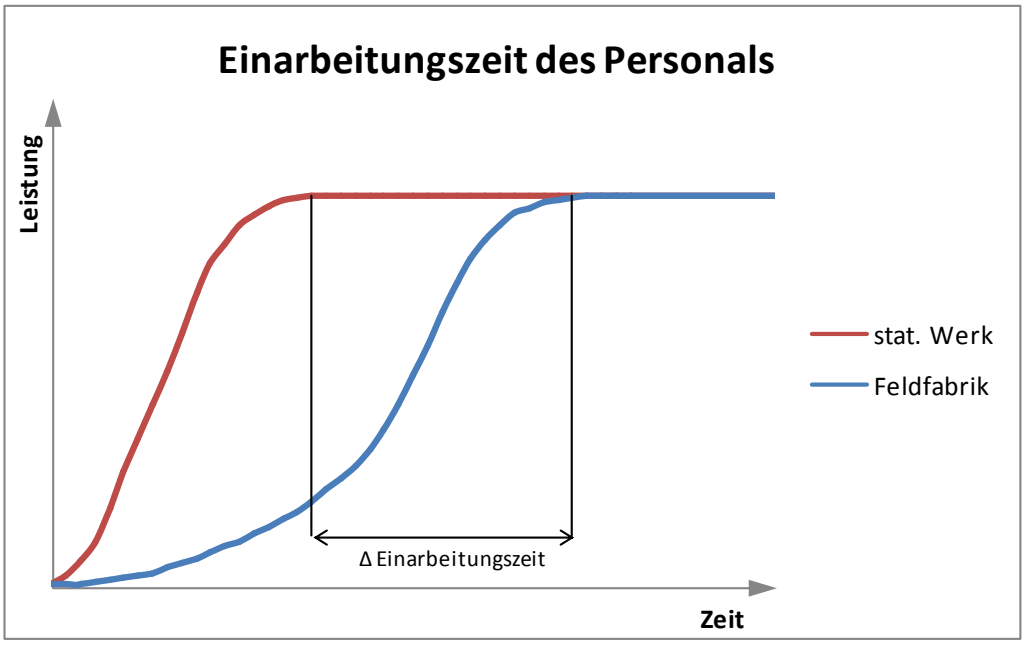


Abb.8.1: Einarbeitungszeit des Personals [PLA15]

Die Qualitätssicherungsabteilung eines stationären Fertigteilwerks ist mit den Bedürfnissen von staatlichen Großkunden vertraut. Die Überwachung und Qualitätssicherung kann daher im Vergleich zu einer Feldfabrik in kleinerem Rahmen, daher durch weniger Personal, stattfinden. Somit ergibt sich für die Herstellung der Tübbinge ein reduzierter Overhead.

Den Vorteilen steht allerdings die hohe Anzahl an Tübbingtransporten und -umschlägen gegenüber. Nicht nur die schon erwähnten hohen CO_2-Emissionen, sondern auch die potentiellen Tübbingschäden während der Umschläge und des Transports sprechen gegen die stationäre Werkproduktion.

Um einen gewissen Tübbingvorrat auf der Baustelle lagern zu können, muss zusätzlich zum Lagerplatz beim Fertigteilwerk ein weiterer Zwischenlagerplatz im Bereich der Baustelleneinrichtungsfläche errichtet und bewirtschaftet werden. Dieser Zwischenlagerplatz entfällt bei der Produktion in der Feldfabrik zur Gänze. Die Tübbinge werden am Lager-

platz der Feldfabrik gelagert und dort direkt auf die Fahrzeuge, die den Längstransport in den Tunnel durchführen, geladen.

Beispiele für Tunnelprojekte mit angelieferten Tübbingen aus Fertigteilwerken:

- Fildertunnel (Deutschland): 45 cm und 60 cm Dicke, 2 m Ringlänge, 10,5 m Außendurchmesser, ~54.000 Segmente, Tübbinganlieferung aus Sengenthal größtenteils mit der Bahn (~240 km) [@BSU]
- Wientalsammelkanal – Entlastungskanal (Österreich): 40 cm Dicke, 1,50 m Ringlänge, 8,3 m Außendurchmesser, ~10.000 Segmente, Tübbinganlieferung aus Wiener Neustadt (~60 km) [@POR]
- Tunnelkette Perschling (Österreich): 30 cm Dicke bzw. 60 cm im Sohlbereich, 2 m Ringlänge, 12,7 m Außendurchmesser, ~3.200 Segmente, Tübbinganlieferung aus Langenlebarn (~40 km) [@GER]

8.3 Berechnungstool TKT für eine Gegenüberstellung

Im Zuge dieser Diplomarbeit hat der Verfasser ein Tübbingkalkulationstool (Kurzbezeichnung: TKT) erstellt, mit dessen Hilfe in einer frühen Projektphase überschlagsmäßig abgeschätzt werden kann, ab welcher Entfernung des geplanten Tunnelprojekts vom nächstgelegenen Betonfertigteilwerk die Errichtung einer Feldfabrik auf der Baustelle wirtschaftlich ist.

Die Produktion der Tübbinge in einem stationären Werk weist gegenüber der Herstellung in einer Feldfabrik wirtschaftliche Vorteile (siehe Kapitel 8.2) auf. Im ersten Schritt werden die Mehr- und Minderkosten des stationären Werks im Vergleich zur Feldfabrik zu den Differenzkosten des stationären Werks zusammengefasst. Danach werden diese Differenzkosten den Transportkosten, die aus der Anlieferung der Tübbinge resultieren, gegenübergestellt. Solange die Transportkosten die Differenzkosten nicht übersteigen, erweist sich die Produktion in einem stationären Werk wirtschaftlicher als die Herstellung der Tübbinge in einer Feldfabrik.

8.3.1 Rahmenbedingungen für TKT

Zur Abgrenzung des Ausmaßes des Berechnungstools müssen einige Rahmenbedingungen festgelegt werden, um die monetäre Gegenüberstellung der Kosten von Werk- und Vor-Ort-Produktion simpel zu halten. Grundsätzlich wird pro Tunnelvortriebsmaschine eine Tübbingproduktionsanlage benötigt. Auf diesen Grundsatz ist TKT ausgelegt. Zudem wird mit der Kostengegenüberstellung nur der Transport per LKW abgebildet. Die Ringe werden in gleich große Segmente geteilt, der Schlussstein hat also dieselbe Größe wie die anderen Tübbingsegmente.

Die Produktion von Tübbingen wird auf die prognostizierte Vortriebsleistung abgestimmt und die Produktionsanlage darauf ausgelegt. Die Vortriebsdauer legt somit die Produktionsdauer und das erforderliche Arbeitszeitmodell fest. Bei niedrigen Vortriebsleistungen und langer Produktionsdauer kann die Produktion im einschichtigen Wochenbetrieb ausreichend sein. Bei höheren Leistungen des Vortriebs kann die Tübbingproduktion zusätzlich durch den Einsatz von weiterem Personal in einer Nachtschicht und auch durch die Umstellung auf Dekadenbetrieb forciert werden.

8.3.2 Bedienungsanleitung für TKT

TKT soll in diesem Kapitel anhand eines Beispiels mit fiktiven Werten und Angaben beschrieben werden.

8.3.2.1 Eingabemaske

Im ersten Schritt werden die Ausgangswerte in die Eingabemaske, siehe Abb.8.2, eingegeben. Die Eingabefelder sind in den Abbildungen blau hinterlegt. Die Anzahl und Größe der zu produzierenden Segmente, der Bewehrungsgrad und die Produktionsdauer sind projektspezifische Angaben.

Die Werte, die in diesem Beispiel angenommen wurden, entsprechen einem Tunnelausbau mit 2 m langen und 45 cm dicken Tübbingen. 26.005 zu produzierende Tübbinge mit sieben Segmenten je Ring entsprechen einer Tunnellänge von 7.430 m und einem Innendurchmesser von etwa 10,6 m.

1. Eingabe		
1.1	Steine	26.005 Stk
1.2	Kubatur eines Steins im Mittel	4,5 m³
1.3	Kubatur gesamt	117.023 m³
1.4	Masse im Mittel	11,3 to/Stein
1.5	Bewehrungsgrad	100 kg/m³
1.6	Bewehrungsmenge	11.702 to
1.7	Produktionsdauer	14 Mo
1.8	Kosten LKW	70 €/h
1.9	Vorteil Abschreibung	25%
1.10	Mittellohnkosten	35 €/h
1.11	zulässige Nutzlast LKW	23 to

Abb.8.2: Eingabe der projektspezifischen Werte [PLA15]

Die Steinanzahl (Punkt 1.1 in Abb.8.2) ist abhängig von der Tunnellänge, der Tübbingbreite und der Ringteilung. Die Tunnellänge von 7.430 m geteilt durch die Tübbingbreite von 2 m ergibt die notwendige Ringanzahl, diese beträgt 3.715 Ringe. Aus der Ringanzahl multipliziert mit den angenommenen sieben Segmenten pro Ring folgt die Steinanzahl, die für den Tunnelausbau erforderlich ist. Im Beispiel sind dies 26.005 Steine.

Die Kubatur eines Steins im Mittel (Punkt 1.2 in Abb.8.2) bestimmt sich nach folgender Formel (8.1):

$$\boldsymbol{Kubatur_{Mittel}} = \frac{\left(\left(\frac{\boldsymbol{Innendurchmesser+2*Tübbingdicke}}{\boldsymbol{2}}\right)^{\boldsymbol{2}} * \boldsymbol{\pi} - \left(\frac{\boldsymbol{Innendurchmesser}}{\boldsymbol{2}}\right)^{\boldsymbol{2}} * \boldsymbol{\pi}\right) * \boldsymbol{Tübbinglänge}}{\boldsymbol{Ringteilung}}$$

(8.1 Kubatur eines Tübbings)

Im Beispiel berechnet sich mit der Formel (8.1) bei einem Innendurchmesser von 10,6 m und einer Tübbingdicke von 45 cm eine mittlere Kubatur von ca. 4,5 m³. Die Gesamtkubatur (Punkt 1.3 in Abb.8.2) ergibt sich aus der Multiplikation der Steinanzahl mit der Kubatur eines Steins im Mittel.

Die Masse im Mittel (Punkt 1.4 in Abb.8.2) ergibt sich aus der Kubatur eines Steins im Mittel und der Dichte von Beton, die hier mit 2,5 to/m³ bestimmt ist. Im Beispiel folgt daraus eine Masse im Mittel von etwa 11,3 to je Stein.

Der Bewehrungsgrad (Punkt 1.5 in Abb.8.2) gibt die Menge der Bewehrung in Tonnen je m³ Beton an und ist von den statischen Erfordernissen abhängig. Im Beispiel wird dieser mit 100 kg/m³ angenommen.

Die Bewehrungsmenge (Punkt 1.6 in Abb.8.2) errechnet sich aus der Gesamtkubatur dividiert durch den Bewehrungsgrad. Im Beispiel beträgt die Bewehrungsmenge ca. 11.702 to.

Wie schon in Kapitel 8.3.1 erwähnt, ist die Produktionsdauer (Punkt 1.7 in Abb.8.2) von der Vortriebsdauer abhängig. Die Vortriebsleistung bzw. Vortriebsdauer beruht wiederum auf projektspezifischen Faktoren wie zum Beispiel der Geologie. Auch das Arbeitszeitmodell in der Tübbingproduktion wird auf die Vortriebsleistung abgestimmt, damit es beim Vortrieb zu keinen Tübbingengpässen kommt. Im Beispiel wird eine Produktionsdauer von 14 Monaten angenommen.

Die Kosten für den Tübbingtransport mit LKWs (Punkt 1.8 in Abb.8.2) setzen sich wie folgt zusammen: Die Berechnung der Gerätekosten kann auf Basis der in der Österreichischen Baugeräteliste[188] (kurz ÖBGL) angegebenen Werte für Reparatur sowie Abschreibung und Verzinsung erfolgen. Diese Werte sind pro Monat angegeben. Diese monatlichen Kostenwerte werden durch die Vorhaltestunden pro Monat dividiert und mit einem Abminderungsfaktor, der eine mögliche längere Nutzung des LKWs aufgrund sorgfältigen Umgangs berücksichtigt, multipliziert. Daraus ergeben sich die Kosten für Abschreibung und

[188] Siehe [ÖBG15]

Verzinsung sowie für Reparatur je Stunde für Sattel-Zugmaschine und Sattelanhänger[189]. Die Kosten für die Betriebsstoffe errechnen sich durch Multiplikation der in der ÖBGL angegebenen Motorleistung in Kilowatt mit dem Kraftstoffverbrauch in Liter je Kilowattstunde und dem Treibstoffpreis je Liter. Für den Verbrauch der Schmiermittel werden die Kosten mit 10% der Kosten für Betriebsstoffe beaufschlagt. Die Summe aus den Kosten für Abschreibung und Verzinsung, Reparatur, Betriebsstoffe und Schmiermittel ergibt die Kosten für Sattel-Zugmaschine und Sattelanhänger je Stunde. Diese werden durch die Lohnkosten für den Gerätefahrer ergänzt, um so zu den Transportkosten je Stunde zu gelangen. Die Kosten für den Transport pro Stunde werden von der regionalen Verfügbarkeit an Transportunternehmen, von eingesetztem Personal und von der Marktsituation beeinflusst. Für dieses Beispiel werden die Kosten für Gerät und Fahrer mit 70 €/h angenommen.

Der Abschreibungsvorteil (Punkt 1.9 in Abb.8.2) für die Investitionskosten des stationären Werks gegenüber der Feldfabrik ergibt sich aus der beim stationären Werk stets vorhandenen weiteren Werknutzung für andere Projekte. Wird eine Feldfabrik aufgebaut, ist nicht vorhersehbar, ob die Investitionen auch für Nachfolgeprojekte genutzt werden können. Der Abschreibungsvorteil wird im nachstehenden Beispiel mit 25% bewertet.

Den Mittellohnkosten (Punkt 1.10 in Abb.8.2) für die Herstellung von Betonfertigteilen liegt der Kollektivvertrag für Arbeiter der Stein- und keramischen Industrie zugrunde. Die Berechnung der Mittellohnkosten kann mit Hilfe eines K3-Blattes erfolgen. In den Mittellohnkosten sind Aufzahlungen für Mehrarbeit und Erschwernisse sowie Lohnnebenkosten berücksichtigt. Im Beispiel werden Mittellohnkosten von 35 €/h angenommen.

Die zulässige Nutzlast LKW (Punkt 1.11 in Abb.8.2) setzt sich wie in Kapitel 5.2 dargelegt aus dem maximal zulässigen Gesamtgewicht in Höhe von 40 to abzüglich des Eigengewichts von Kraftwagen und Anhänger zusammen. Im Beispiel erfolgt die Annahme einer dreiachsigen Sattel-Zugmaschine mit Tieflade-Sattelanhänger mit durchgehender Plattform laut ÖBGL. Die Sattel-Zugmaschine hat ein Eigengewicht von 10,5 to, der Sattelanhänger wiegt 6,5 to. Daraus ergibt sich eine Nutzlast des LKWs in Höhe von 23,0 to.

8.3.2.2 Differenzkosten stationäres Werk

In der zweiten Eingabemaske, siehe Abb.8.3, werden einige in Kapitel 8.1 und 8.2 beschriebene Vor- und Nachteile monetär bewertet und zu den Differenzkosten des stationären Werks zusammengefasst.

[189] Sattel-Zugmaschine und Sattelanhänger werden im Beispiel laut ÖBGL angenommen. Die Auswahl wird weiter unten bei der zulässigen Nutzlast des LKWs (Punkt 1.11 in Abb.8.2) genauer erläutert.

2. Differenzkosten stat. Werk							
2.1	Entfall Vorarbeiten			P	850.000 €		
2.2	Entfall Räumen			P	650.000 €		
2.3	Vorteil Abschreibung Halle	mittlerer Neuwert	1.125.000 €	P	281.250 €	2.523.750 €	$= \Sigma_P$
2.4	Vorteil Abschreibung Portalkran		650.000 €	P	162.500 €		
2.5	Vorteil Abschreibung Mischanlage		700.000 €	P	175.000 €		
2.6	Vorteil Abschreibung Brückenkrane		300.000 €	P	75.000 €		
2.7	Vorteil Abschreibung Produktionsausrüstung		200.000 €	P	50.000 €		
2.8	eingearbeitetes Personal			P	280.000 €		
2.9	reduzierter Overhead			ZA	336.000 €	-581.360 €	$= \Sigma_{ZA}$
2.10	zus. Lagerplatzbewirtschaftung Baustelle			ZA	-917.360 €		
2.11	Vorteil Gesteinskörnung		7,0 €/to	MA	1.638.315 €	2.223.428 €	$= \Sigma_{MA}$
2.12	Vorteil Bewehrungsfertigung		50,0 €/to	MA	585.113 €		
						4.165.818 €	**= Σ**

Abb.8.3: Berechnung der Differenzkosten stat. Werk [PLA15]

Die Vorarbeiten (Punkt 2.1 in Abb.8.3) beinhalten all jene Leistungen, die zum Aufschluss der Baustelleneinrichtungsfläche erforderlich sind, wie zum Beispiel das Roden von Bäumen, das Herstellen eines befestigten Untergrundes und der Anschluss an Kanalisation, Wasser- und Stromversorgung. Die Kosten für die Vorarbeiten entfallen bei einem stationären Werk. Für dieses Beispiel werden die Vorarbeiten mit 850.000 € bewertet.

Ebenso entfällt beim stationären Werk das Räumen und der Rückbau der Baustelleinrichtungsfläche (Punkt 2.2 in Abb.8.3) am Ende des Projektes. Für diese Arbeiten werden Kosten in Höhe von 650.000 € angenommen. Dies beinhaltet den Rückbau sämtlicher Einrichtungen, wie zum Beispiel Container, Halle, Mischanlage, Fundamente, Bauzaun, Strom- und Wasserversorgung.

Der Vorteil aus der Abschreibung von Halle (inklusive Fundierung), Portalkran, Mischanlage, Brückenkrane und Produktionsausrüstung (Punkt 2.3 – 2.7 in Abb.8.3) wird in der Eingabemaske Abb.8.2 in Prozent angegeben. Die weiß hinterlegten Werte in Punkt 2.3 – 2.7 in Abb.8.3 beziehen sich auf den mittleren Neuwert (=blau hinterlegte Werte in Punkt 2.3 – 2.7 in Abb.8.3) der jeweiligen Einrichtung. Je nachdem auf wie viele Projekte diese Investitionsgeräte abgeschrieben werden können, wird dieser Abschreibungsvorteil entsprechend bewertet.

Der Vorteil von eingearbeitetem Personal (Punkt 2.8 in Abb.8.3) wird mit 280.000 € angenommen. Der monetären Bewertung liegen die Lohnkosten (20 Personen pro Tag- und Nachtschicht) für einen Monat bei Annahme von 200 Arbeitsstunden je Person im Monat zu Grunde. Bei einer Feldfabrik muss für die Herstellung der Tübbinge Personal gesucht werden, vor allem qualifiziertes Personal ist schwer zu finden. Die Einarbeitungszeit für das Personal einer Feldfabrik ist, wie in Abb.8.1 dargestellt, dementsprechend länger. Auch bei der Feldfabrik wird sich das Personal mit Fortdauer der Produktion einarbeiten und so den Herstellungsprozess optimieren. Für die Produktion in einem stationären Werk ist hingegen bereits ausreichend qualifiziertes Personal verfügbar und die Einarbeitungszeit ist kürzer. Dies stellt einen Vorteil der Produktion in einem stationären Werk dar.

Die Einsparung durch reduziertes Overhead-Personal (Punkt 2.9 in Abb.8.3) bei stationären Werken bezieht sich auf die gesamte Produktionsdauer. Die Qualitätssicherungsabteilung in einem stationären Werk ist im Vergleich zu der in einer Feldfabrik mit weniger Personal besetzt, da man mit den Bedürfnissen von staatlichen Großkunden vertraut ist. Für die Ermittlung der Minderkosten in Höhe von 336.000 € wird angenommen, dass die Kosten (Lohn, Unterkunft, Anreise usw.) für zwei Mitarbeiter im Vergleich zu einer Feldfabrik eingespart werden können. Die Berechnung erfolgt aufgrund der Annahme, dass diese Kosten bei einer Produktionsdauer von 14 Monaten für einen Mitarbeiter 12.000 € pro Monat betragen.

Das Erfordernis eines zusätzlichen Lagerplatzes (Punkt 2.10 in Abb.8.3) in Tunnelprojektnähe benachteiligt die Werkproduktion mit Anlieferung. Der Lagerplatz muss sowohl einen Portalkran aufweisen als auch von entsprechendem Personal bewirtschaftet werden. Der Portalkran wird zum Entladen der LKWs und zum Beladen der Tunnelversorgungswägen benötigt. Der Lagerplatz muss eine gewisse Größe aufweisen, um Lieferengpässe ausgleichen zu können. Über die Projektdauer werden ein Kranfahrer und ein Anschläger pro Schicht in der Kostenberechnung berücksichtigt. Die Kosten für einen kleinen Portalkran werden mit 200.000 € bewertet. Dazu kommen die Lohnkosten für das Lagerplatzpersonal bei Annahme von 24-stündiger Besetzung des Lagerplatzes 30,5 Tage pro Monat über die 14-monatige Produktionsdauer durch zwei Personen.

Die Vorteile aus Gesteinskörnung und Bewehrungsfertigung des stationären Werks gegenüber einer Feldfabrik (Punkt 2.11 – 2.12 in Abb.8.3) sind von der Gesamtkubatur der Tübbinge abhängig. Zusätzlich wird für den Vorteil aus der Bewehrungsfertigung der Bewehrungsgrad benötigt.

Durch Multiplikation der Gesamtkubatur in Höhe von 117.023 m³ mit einer Dichte der Gesteinskörnung von 2 to/m³ und einem angenommen Vorteilswert von 7 €/to ergibt sich ein Vorteil aus Gesteinskörnung (Punkt 2.11 in Abb.8.3) in Höhe von 1.638.315 €. Der Vorteilswert der Gesteinskörnung, angenommen in Höhe von 7 €/to, folgt aus einem reduzierten Transportaufwand der Gesteinskörnung von der nahe gelegenen Gewinnungsstätte zum stationären Werk und niedrigeren Kosten für die Gesteinskörnung aufgrund von besseren Konditionen, welche dem Betreiber des stationären Werks wegen langjährigen Geschäftsbeziehungen gewährt werden.

Der Vorteil der Bewehrungsfertigung (Punkt 2.12 in Abb.8.3) in Höhe von 585.113 € berechnet sich durch Multiplikation der Bewehrungsmenge von 11.702 to mit dem Vorteilswert von 50 €/to. Die Herstellung der Bewehrung in einem stationären Werk kann in einer zentralen Schneid- und Biegeanlage des Betonfertigteilwerks erfolgen. Es ergeben sich daher für die Herstellung der Tübbinge in einem stationären Werk reduzierte Einmalkos-

ten für Investitionsgeräte, wie Schweißgasabsaugung, Leiterschweißmaschine usw., da diese Investitionsgeräte auch für weitere Projekte verwendet werden.

Die Summe aus all diesen Positionen (Punkt 2.1 – 2.12 in Abb.8.3) ergibt die Differenzkosten eines stationären Fertigteilwerks gegenüber einer Feldfabrik.

8.3.2.3 Transportkosten

Die Transportkosten Tk in Abb.8.4 sind von der Anzahl der zu transportierenden Steine (Punkt 1.1 in Abb.8.2), der Steinanzahl bei Ausladung des Transportfahrzeuges, der Umlaufzeit und den Kosten für das Transportfahrzeug pro Stunde (Punkt 1.8 in Abb.8.2) abhängig. Sie berechnen sich nach folgender Formel (8.2):

$$Tk = \frac{Steine}{Steine\ pro\ LKW} * Umlaufzeit * Kosten_{LKW\ pro\ Stunde} \qquad \textbf{(8.2 Transportkosten)}$$

Die Umlaufzeit ist jene Zeit, die ein LKW für das Beladen, die Hinfahrt zur Baustelle, das Entladen und die Rückfahrt zum stationären Werk benötigt. Die Dauer für das Be- und Entladen eines LKWs ist von der Anzahl der beförderten Tübbinge sowie von der Organisation im Werk und auf der Baustelleneinrichtungsfläche abhängig und beträgt jeweils in etwa 15 bis 30 Minuten. Die Fahrzeit ist von der Fahrtstrecke, vom Verkehr und der Fahrgeschwindigkeit des LKWs, welche wiederum durch den Beladungszustand bestimmt wird, abhängig. Die Fahrzeit des LKWs im beladenen Zustand ist aufgrund der erschwerten Anfahr- und Bremsvorgänge länger als die Fahrzeit eines unbeladenen LKWs. Die Fahrzeit wird um die Stehzeit ergänzt, die aus der Wartezeit vor bzw. nach dem Be- und Entladen resultiert. Daraus ergibt sich für die Berechnung der Umlaufzeit folgende Formel (8.3):

$$\boldsymbol{Umlaufzeit = Beladezeit + Fahrzeit_{beladen} + Fahrzeit_{unbeladen} + Entladezeit + Stehzeit}$$

(8.3 Umlaufzeit)

Durch die Masse eines Tübbings (Punkt 1.4 in Abb.8.2) und die Begrenzung des höchstzulässigen Transportgewichts (Punkt 1.11 in Abb.8.2) wird die maximal erlaubte Anzahl an Segmenten pro LKW berechnet. Im Beispiel in Abb.8.4 ergibt sich dadurch eine mögliche Beladung von maximal 2 Steinen pro LKW. Die erforderliche Anzahl an Transporten berechnet sich aus der Gesamtzahl der zu transportierenden Tübbinge (Punkt 1.1 in Abb.8.2) und der Beladung des LKWs. In Abhängigkeit der Umlaufzeit werden die Transportkosten für die Anlieferung aller Segmente berechnet. Diese sind in der Abb.8.4 ersichtlich.

3. Transportkosten

23 to/LKW
11,3 to/Stein

2 Stein(e)/LKW

Anzahl	26.005 LKWs	13.003 LKWs	8.668 LKWs	6.501 LKWs	5.201 LKWs	4.334 LKWs
Umlaufzeit	1 Stein/LKW	2 Steine/LKW	3 Steine/LKW	4 Steine/LKW	5 Steine/LKW	6 Steine/LKW
1,0 h	1.820.350 €	910.175 €	606.783 €	455.088 €	364.070 €	303.392 €
2,0 h	3.640.700 €	1.820.350 €	1.213.567 €	910.175 €	728.140 €	606.783 €
3,0 h	5.461.050 €	2.730.525 €	1.820.350 €	1.365.263 €	1.092.210 €	910.175 €
4,0 h	7.281.400 €	3.640.700 €	2.427.133 €	1.820.350 €	1.456.280 €	1.213.567 €
5,0 h	9.101.750 €	4.550.875 €	3.033.917 €	2.275.438 €	1.820.350 €	1.516.958 €
6,0 h	10.922.100 €	5.461.050 €	3.640.700 €	2.730.525 €	2.184.420 €	1.820.350 €
7,0 h	12.742.450 €	6.371.225 €	4.247.483 €	3.185.613 €	2.548.490 €	2.123.742 €
8,0 h	14.562.800 €	7.281.400 €	4.854.267 €	3.640.700 €	2.912.560 €	2.427.133 €

Abb.8.4: Übersicht der Transportkosten [PLA15]

Die grünen Felder in Abb.8.4 entsprechen einem wirtschaftlichen Vorteil der Werkproduktion gegenüber der Herstellung in der Feldfabrik bei gegebener Umlaufzeit, da die Transportkosten hier geringer sind als die Differenzkosten des stationären Werks in Abb.8.3. Die Transportkosten in den weißen Feldern übersteigen die Differenzkosten des stationären Werks und befürworten daher eine Produktion in einer Feldfabrik. Übersteigt das Gewicht der auf den LKW aufgeladenen Tübbinge das höchstzulässige Transportgewicht (im Beispiel ab einer Beladung des LKWs von drei Tübbingen) ist ein Transport nicht möglich. Die potentiellen Transportkosten sind in der Abb.8.4 grau hinterlegt.

8.3.2.4 Kostengegenüberstellung

In der nachstehenden Abb.8.5 werden die Differenzkosten der stationären Werksfertigung den Transportkosten gegenübergestellt. Die rote Linie stellt die Differenzkosten des stationären Werks dar. Die Transportkosten mit einer Beladung von einem Tübbing pro LKW werden in violett, jene mit einer Beladung von zwei Tübbingen pro LKW in blau abgebildet. Die grau dargestellten Linien beziehen sich auf die grau hinterlegten Werte in Abb.8.4, ein Transport ist aufgrund der Überschreitung des maximal zulässigen Transportgewichts nicht erlaubt.

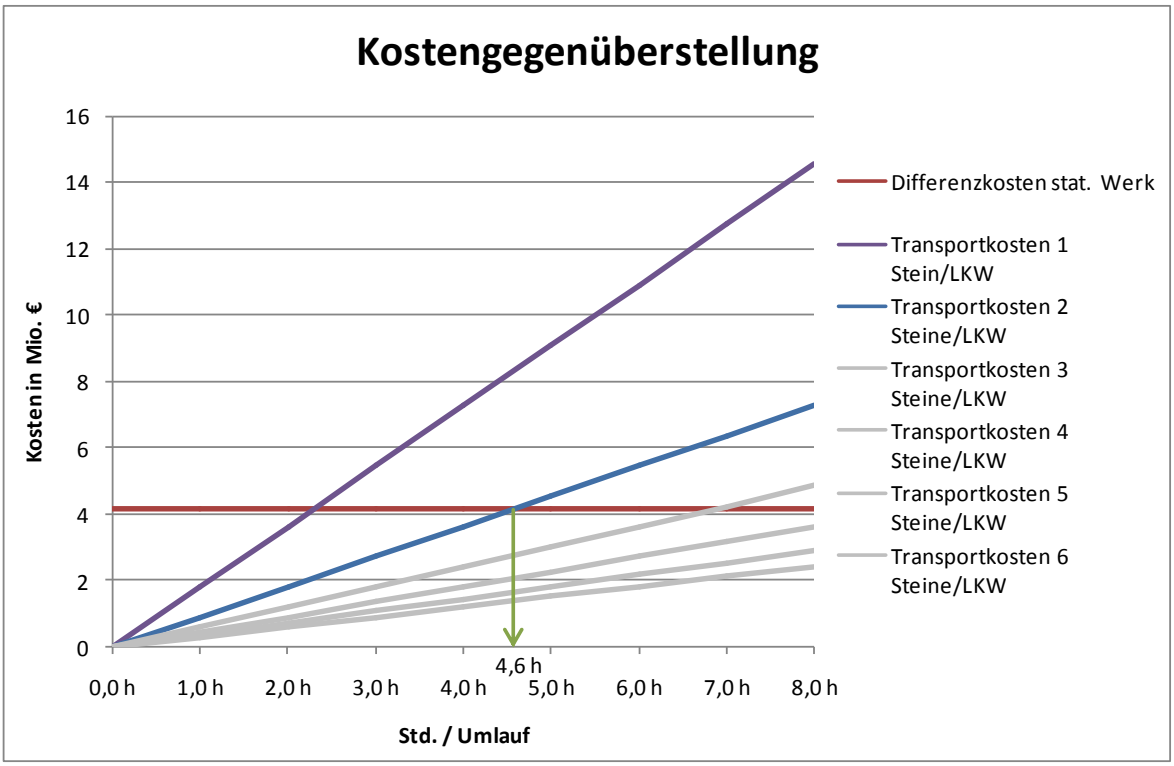


Abb.8.5: Kostengegenüberstellung [PLA15]

Im Beispiel sind die Transportkosten bei einer Beladung des LKWs mit zwei Tübbingen und die Differenzkosten des stationären Werks bei einer Umlaufzeit von etwa 4,6 Stunden gleich groß (siehe grüne Linie in Abb.8.5). Wird die Umlaufzeit von 4,6 Stunden überschritten, ist die Herstellung von Tübbingen in einer Feldfabrik wirtschaftlich rentabler. Eine Umlaufzeit von 4,6 Stunden entspricht gemäß der Formel (8.3) bei einer Steh-, Be- und Entladezeit von jeweils 15 Minuten einer Fahrzeit für Hin- und Rückfahrt von insgesamt 3,85 Stunden. Dies ergibt bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit des LKWs im beladenen Zustand von 50 km/h und einer Durchschnittsgeschwindigkeit des LKWs im unbeladenen Zustand von 55 km/h eine einfache Strecke von etwa 100 km. Im Beispiel wäre daher ab einer Entfernung zwischen Baustelle und stationärem Werk von etwa 100 km die Errichtung einer Feldfabrik kostentechnisch von Vorteil.

8.3.3 Kostendiagramme für eine grafische Abschätzung der Kosten

Mit der Produktionsdauer und der Steinanzahl kann relativ schnell ein Vergleich zwischen den Differenzkosten des stationären Werks und den Transportkosten hergestellt werden. Dieser soll in der Folge grafisch ermittelt werden. Das Ergebnis der grafischen Ermittlung ist die maximal erlaubte Umlaufzeit, sodass die Transportkosten die Differenzkosten des stationären Werks nicht übersteigen.

8.3.3.1 Ausgangssituation

Für die Erstellung der Diagramme in Abb.8.6 und Abb.8.7 werden die nachfolgenden Werte angenommen:

Kubatur eines Steins im Mittel:	4,5 m³
Bewehrungsgrad:	100 to/m³
Kosten LKW (23 to):	70 €/h
Mittellohnkosten:	35 €/h
Vorteil Abschreibung:	25%

Für die Beladung des LKWs wird hier die wirtschaftlichste Lösung berücksichtigt. Das heißt, der Transport erfolgt mit der größtmöglichen Steinanzahl, die das höchstzulässige Transportgewicht nicht überschreitet. Im angeführten Beispiel sind dies zwei Steine pro LKW.

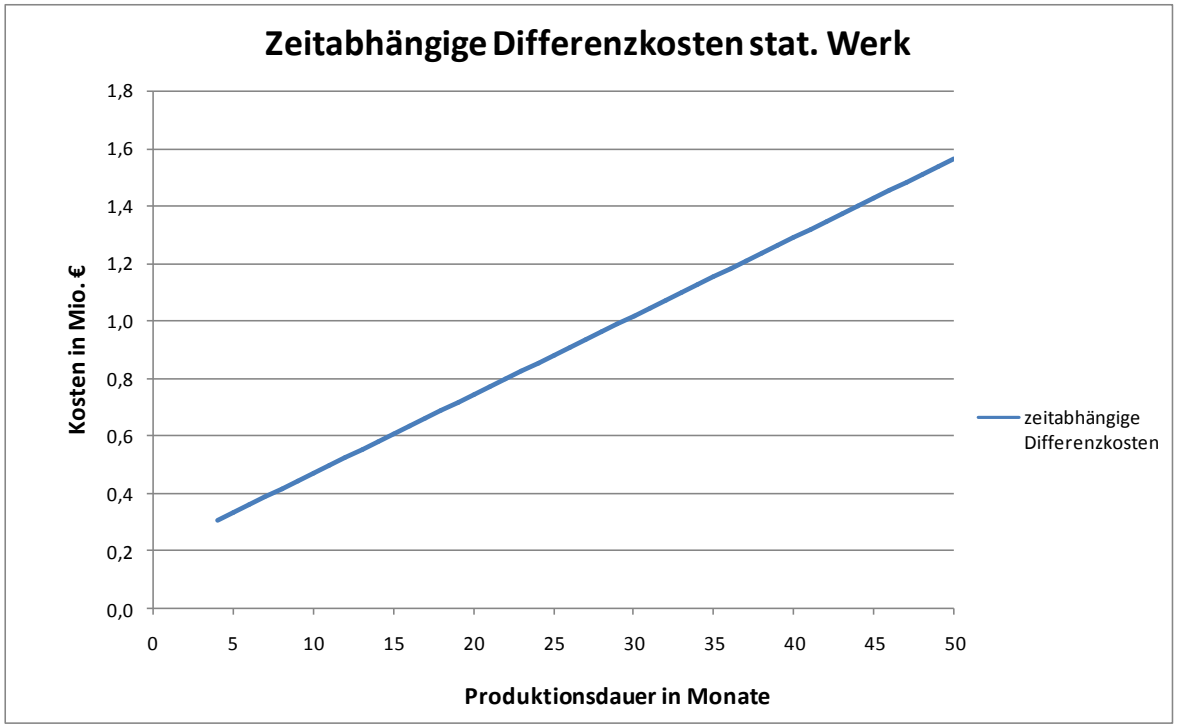


Abb.8.6: Zeitabhängige Differenzkosten stat. Werk [PLA15]

Die Abb.8.6 stellt die zeitabhängigen Differenzkosten (reduzierter Overhead und zusätzliche Lagerplatzbewirtschaftung – in Abb.8.3 mit ZA gekennzeichnet) des stationären Werks in Abhängigkeit von der Produktionsdauer dar. Zu den Annahmen der zeitabhängigen Differenzkosten kann auf Kapitel 8.3.2 und die dortigen Ausführungen zum reduzierten Overhead und zur zusätzlichen Lagerplatzbewirtschaftung verwiesen werden.

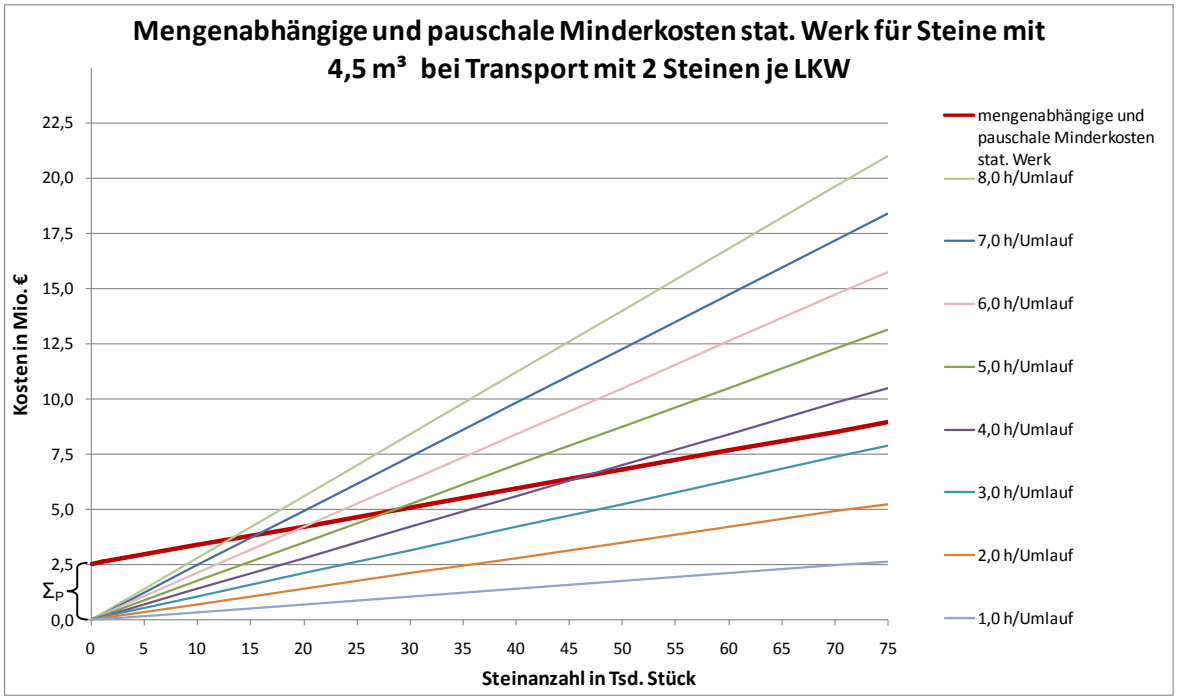


Abb.8.7: Mengenabhängige und pauschale Minderkosten stat. Werk [PLA15]

In Abb.8.7 werden die mengenabhängigen und pauschalen Minderkosten des stationären Werks (in Abb.8.3 mit MA und P gekennzeichnet) mit der roten Linie abgebildet. Die Summe der pauschalen Minderkosten des stationären Werks, in Abb.8.3 mit *„Σ_P“* bezeichnet, bildet den Anfangswert der roten Linie, die mengenabhängigen Minderkosten hingegen bestimmen die Steigung dieser Linie. Die Transportkosten werden mit anders-farbigen Linien, abhängig von der jeweiligen Umlaufzeit, dargestellt. Diese berechnen sich nach der Formel (8.2).

8.3.3.2 Anleitung zur grafischen Kostenabschätzung

Im ersten Schritt der Kostenabschätzung werden die zeitabhängigen Differenzkosten des stationären Werks ermittelt. Zuerst wird die Produktionsdauer, in Abb.8.8 entspricht das dem roten Pfeil, eingetragen. Diese beträgt im angenommenen Beispiel 14 Monate. Beim Schnittpunkt mit der Kostengerade, in Abb.8.8 die blaue Linie, ergeben sich die zeitabhängigen Differenzkosten des stationären Werks, dem grünen Pfeil in Abb.8.8. Im Beispiel betragen diese 0,58 Mio. €. Dieser Wert ergibt sich aus dem reduzierten Overhead (Punkt 2.9 in Abb.8.3) und der zusätzlichen Lagerplatzbewirtschaftung (Punkt 2.10 in Abb.8.3). Die Einsparung aus dem reduzierten Overhead erhöht die Minderkosten des stationären Werks. Die Kosten der zusätzlichen Lagerplatzbewirtschaftung stellen im Gegensatz dazu Mehrkosten des stationären Werks im Vergleich zu einer Feldfabrik dar. Bei Saldierung der Einsparung aus dem reduzierten Overhead und der Mehrkosten aus der zusätzlichen Lagerplatzbewirtschaftung ergeben sich im Beispiel Mehrkosten des stationären Werks gegenüber einer Feldfabrik in Höhe von 0,58 Mio. €.

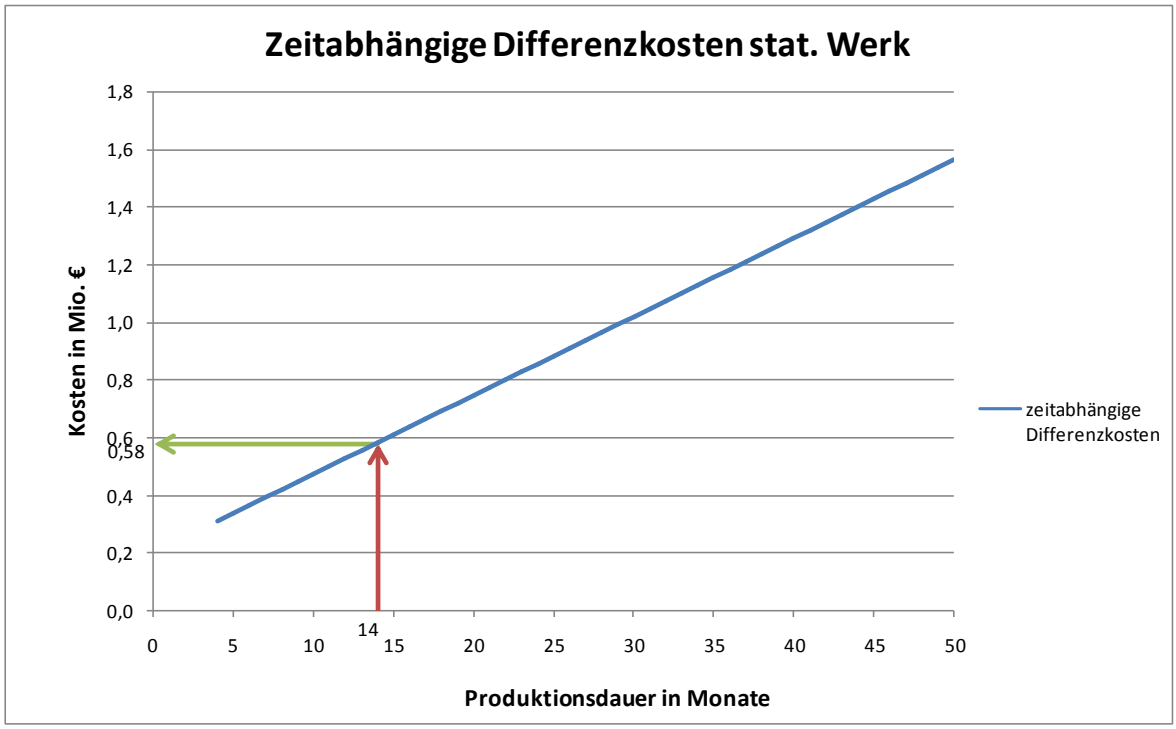


Abb.8.8: Beispiel zeitabhängige Differenzkosten stat. Werk [PLA15]

Somit muss im zweiten Schritt die Gerade der mengenabhängigen und pauschalen Minderkosten des stationären Werks (graue Linie in Abb.8.9) um den Wert der zeitabhängigen Differenzkosten aus Abb.8.8 parallel nach unten verschoben werden. So ergeben sich die Differenzkosten des stationären Werks (die rote Linie in Abb.8.9).

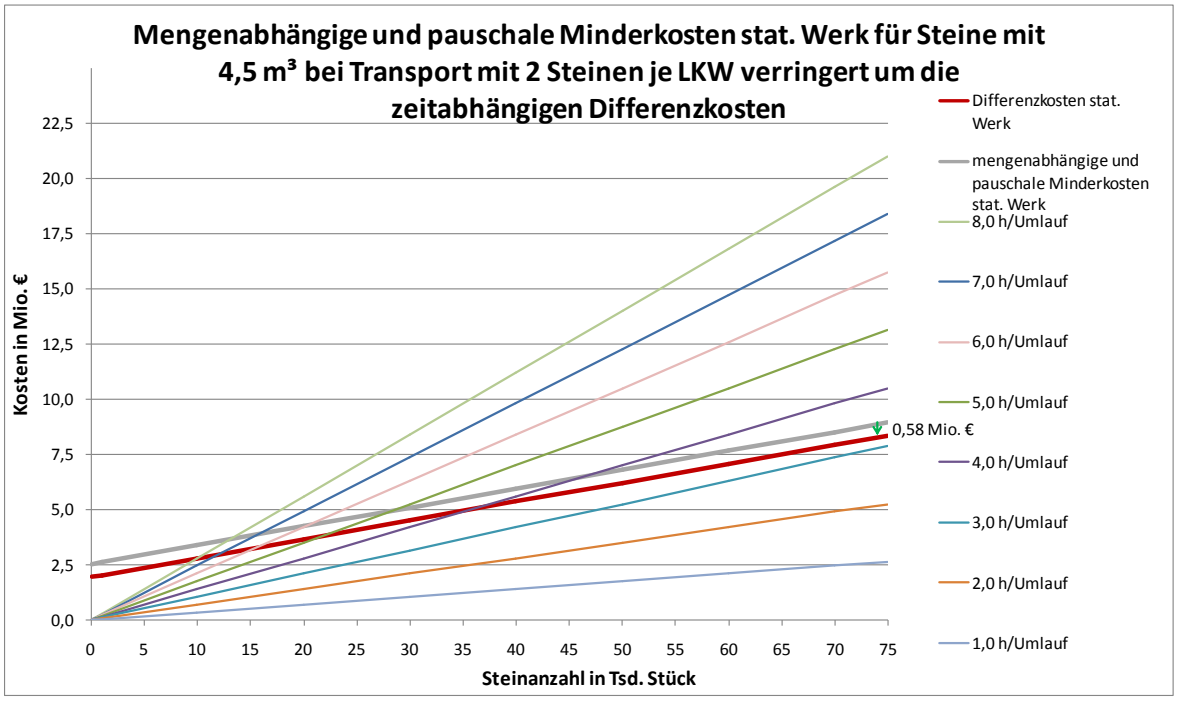


Abb.8.9: Mengenabhängige und pauschale Minderkosten stat. Werk verringert um die zeitabhängigen Differenzkosten [PLA15]

Im dritten Schritt wird die Steinanzahl (im Beispiel aus Abb.8.2 sind dies 26.005 Steine), wie in Abb.8.10 ersichtlich, in Form einer schwarzen Linie eingezeichnet. Beim Schnittpunkt dieser schwarzen Linie mit der roten Linie, der Differenzkosten des stationären Werks, ergibt sich jene Umlaufzeit, bei welcher die Transportkosten gleich hoch sind wie die Differenzkosten des stationären Werks. Im Beispiel liegt diese bei ungefähr 4,6 Stunden.

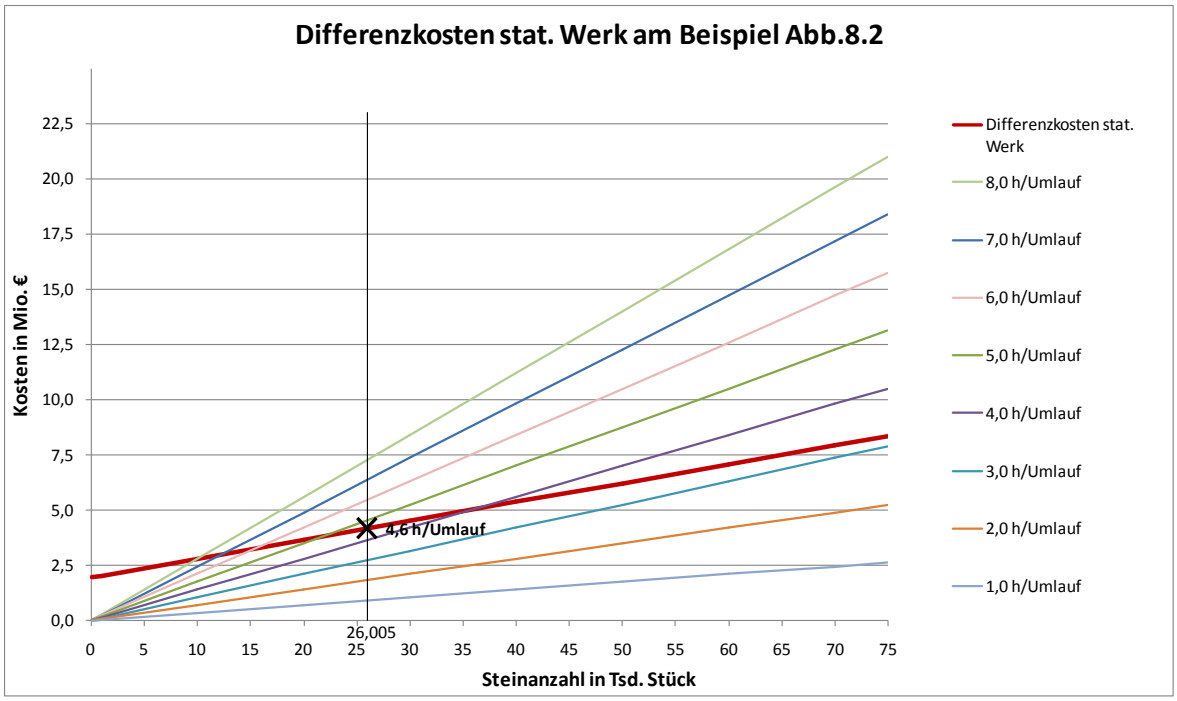


Abb.8.10: Differenzkosten stat. Werk am Beispiel Abb.8.2 [PLA15]

Mit Hilfe der Diagramme aus Abb.8.6 und Abb.8.7 kann, wie eben gezeigt, relativ zügig in einer frühen Projektphase grafisch eine Abschätzung der wirtschaftlicheren Lösung für die Wahl zwischen Vor-Ort-Produktion und Werkproduktion gemacht werden.

Im nächsten Schritt werden stationäre Betonfertigteilwerke in Baustellenähe gesucht, bei welcher die Umlaufzeit der Tübbingtransporte in Höhe von ungefähr 4,6 Stunden nicht überschritten wird. Dann ist zu prüfen, ob das in Frage kommende stationäre Werk die Kapazitäten und Möglichkeiten für eine Tübbingproduktion aufweist. Befindet sich kein stationäres Werk mit entsprechenden Kapazitäten in Baustellennähe, welches die Tübbingtransporte innerhalb der gegebenen Umlaufzeit ermöglicht, so ist es wirtschaftlicher eine Feldfabrik zu errichten.

9 Zusammenfassung

Durch den großen Einsatzbereich von Tunnelvortriebsmaschinen und der Vielfalt von Ausbaukonstruktionen ist das Spektrum für den Einsatz von Tübbingen sehr groß. Eine Unterteilung der Tübbinge kann nach der Konstruktionsform, den Anforderungen an die Auskleidung oder der Ausbauform erfolgen. Beim einschaligen System ist im Gegensatz zum zweischaligen System der Tübbingausbau die endgültige Auskleidung des Tunnels, daher ist keine Herstellung einer Innenschale mehr notwendig. Nacharbeiten, Herstellen von Verbindungsbauwerken mit anderen Tunnelröhren usw. können parallel zum Vortrieb stattfinden. Beim zweischaligen System kann hingegen erst nach Ende des Vortriebs die Ortbetoninnenschale eingebaut werden, wodurch die Bauzeit des Projekts verlängert wird. Der einschalige Tübbingausbau stellt jedoch höhere Ansprüche an Maßgenauigkeit und Qualität der Tübbinge.

Die hohen Anforderungen an Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Tübbinge erfordern große Sorgfalt bei Herstellung, Lagerung, Transport und Einbau. Die Qualität ist durch Überwachung dieser Vorgänge sicherzustellen. Auch die Instandsetzung von Fehl- und Schadstellen, die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit beeinflussen, ist ein wichtiger Aspekt bei der Tübbingproduktion. Schäden können in allen Prozessschritten von der Herstellung bis zum Einbau des Tübbings auftreten und sollten nach Möglichkeit durch sorgfältiges Arbeiten verhindert werden, um aufwendige Instandsetzungsarbeiten oder gar das Ausscheiden des Tübbings zu vermeiden.

Die Herstellung der Tübbinge in einem stationären Betonfertigteilwerk läuft ähnlich ab wie jene in einer Feldfabrik. Der größte Unterschied liegt in der örtlichen Nähe zum Tunnelprojekt. Die Feldfabrik befindet sich am Baustellengelände und die Tunnelversorgungswägen werden unmittelbar am Lagerplatz der Feldfabrik beladen. Bei der Produktion in einem stationären Werk sind die Anlieferung der Tübbinge und ein zusätzlicher Lagerplatz am Baustellengelände erforderlich.

Das fiktive Beispiel in Kapitel 8 zeigt, dass bei der Produktion in einem stationären Werk und einer Tübbinganzahl von 26.005 Segmenten mit einer mittleren Kubatur von 4,5 m^3 und einer Nutzlast von 23 Tonnen pro LKW 13.003 LKW-Fahrten erforderlich sind, um alle Segmente zur Baustelle des Tunnelprojekts anzuliefern. Aus dem Vergleich der Transportkosten mit den Differenzkosten des stationären Werks geht hervor, dass im Beispiel diese Kosten bei einer Umlaufzeit des LKWs von 4,6 Stunden gleich hoch sind. Diese Umlaufzeit entspricht bei einer Steh-, Be- und Entladezeit des LKWs von jeweils 15 Minuten einer Fahrtzeit (Hin- und Rückfahrt) von 3,85 Stunden oder einer einfachen Strecke von 100 km bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit des unbeladenen LKWs von 55 km/h und einer Durchschnittsgeschwindigkeit des beladenen LKWs von 50 km/h. Ab

dieser Umlaufzeit ist die Errichtung einer Feldfabrik aufgrund der niedrigeren CO_2-Bilanz nicht nur ökologischer, sondern hat auch einen wirtschaftlichen Vorteil. Die Entscheidung für Vor-Ort- oder Werkproduktion ist vom Projekt abhängig, allerdings sollte dabei auch der Aspekt der hohen Umweltbelastung berücksichtigt werden.

Während bislang in Österreich Tunnel mit Tübbingausbau mit Durchmessern bis 11 m gebaut wurden, beträgt der europaweit bisher größte Tunneldurchmesser mit Tübbingausbau 15,55 m. Dieser wurde in Italien beim Sparvo-Tunnel mit 70 cm dicken Segmenten erreicht. Diese Dimensionen stellen den Grenzwert des aktuellen Stands der Entwicklung im maschinellen Vortrieb dar. Bei dieser Größe wird der Ring öfters geteilt, damit die Segmente steuerbar bleiben. Dadurch ergibt sich auch eine höhere Anzahl an Tübbingsteinen. Die Produktion dieser hohen Anzahl an Segmenten in einer Feldfabrik ist bereits nach einer kurzen Vortriebsstrecke wirtschaftlicher als die Produktion in einem stationären Werk.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zukünftig nicht nur wirtschaftliche Aspekte, die in dieser Diplomarbeit vorrangig behandelt werden, die Tübbingproduktion beeinflussen werden. Auch ökologische Faktoren gewinnen immer mehr an Bedeutung.

10 Literaturverzeichnis

[ADA10] D. Adam: Tunnelbau im Festgestein und Lockergestein. 2. Auflage (2010)

[BAB12] T. Babendererde, C. Hahn: Einflüsse auf Tübbingschäden. In: Tunnel 3/2012. Bauverlag, Gütersloh (2012)

[BET04] H. Balthaus, H. Dorgarten, B. Billig: Tunnelsicherung und Tunnelausbau. In: BetonKalender 2005. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (2004)

[BET13] O. Fischer, T. Nevrly, G. Behnen: Fertigteile im Tunnelbau. In: BetonKalender 2014. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (2013)

[BRE13] R. Breitenbücher: Spezielle Anforderungen an Beton im Tunnelbau. In: BetonKalender 2014. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (2013)

[DAU10] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB): Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen. DAUB, Köln (2010)

[DAU13] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB): Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen. DAUB, Köln (2013)

[DRE11] O. Drescher, R. Kauper, F. Kugler, B. Otten: Der Bau des Finnetunnels. In: Beton-Informationen 3/2011. Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf (2011)

[GIR13] G. Girmscheid: Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (2013)

[GRÜ98] F. Grübl: Baustoffe und Bauteile für den Tunnelbau: Einschaliger Tunnelausbau mit Stahlbetontübbingen – Welche Lasten sind maßgebend, wie kann man Schäden vermeiden. In: Tunnelbau-Taschenbuch. Verlag Glückauf, Essen (1998)

[HAN11] D. Hansel, P. Guirguis: Stahlfaserbeton-Tübbinge: Stand der Technik und realisierte Projekte. In: Tunnel 1/2011. Bauverlag, Gütersloh (2011)

[HAN12] D. Handke: Hochpräzise Tübbinge: Voraussetzung für ein qualitativ hochwertiges Tunnelbauwerk in einschaliger Bauweise. In: Tunnel 8/2012. Bauverlag, Gütersloh (2012)

[HOF08] C. Hofstadler: Schalarbeiten. Springer, Berlin (2008)

[JOD04] H.G. Jodl, D. Kolic, W. Schlosser: Planung, Herstellung und Anwendung von Tübbingen. In: Österreichischer Betontag 2004: Konferenz und Fachausstellung. ÖVBB , Wien (2004)

[MAI11] B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer: Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (2011)

[ÖBG15] Fachverband der Bauindustrie der Wirtschaftskammer Österreich, Österreichische Baugeräteliste (ÖBGL) 2015, Bauverlag, Gütersloh (2015)

[PLA15] Eigenes Bildarchiv

[POD10] R. Podjadtke, G. Weidig: Verstellbarer nachgiebiger Tübbingausbau. In: Tunnel 7/2010. Bauverlag, Gütersloh (2010)

[RIL09] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB): Richtlinie – Tübbingsysteme aus Beton. ÖVBB, Wien (2009)

[RIL14] Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV): Richtlinie – Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton. ÖBV, Wien (2014)

[SCH01] W. Schlosser: Tunnelbau - Auswahlverfahren für Tübbingsysteme (Diplomarbeit). TU Wien, Wien (2001)

[SPR07] R. Springenschmid: Betontechnologie für die Praxis. Bauwerk, Berlin (2007)

[STU06] Autorenteam: STUVA-Empfehlung für die Verwendung von Dichtungsrahmen in Tübbingauskleidungen. In: Tunnel 2/2006. Bauverlag, Gütersloh (2006)

[THE09] M. Thewes, C. Budach: Mörtel im Tunnelbau. In: BauPortal 12/2009. Erich Schmidt Verlag, Berlin (2009)

[WEB13] S. Weber: Betoninstandsetzung. Springer Vieweg, Wiesbaden (2013)

[WIN00] D. Winselmann, A. Städing, L. Babendererde, J. Holzhäuser: Aktuelle Berechnungsmethoden für Tunnelauskleidungen mit Tübbingen und deren verfahrenstechnische Voraussetzungen. Vorträge der Baugrundtagung 2000 in Hannover, 18.-21.September 2000. Verlag Glückauf, Essen (2000)

[@BSU] www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de – Internetseite des Bahnprojektes Stuttgart – Ulm. Zuletzt abgerufen am: 28.09.2015

[@DAT] sealing.datwyler.com – Internetseite Datwyler, Hersteller von Dichtungsrahmen. Zuletzt abgerufen am: 10.09.2015

[@DEV] www.devo-tech.ch – Internetseite Devo-Tech, Hersteller von Tübbingproduktionseinrichtungen. Zuletzt abgerufen am: 10.09.2015

[@GER] www.gerocret.at – Internetseite Gerocret – Ockermüller Betonwaren GmbH, Betonfertigteilhersteller für den Tiefbau. Zuletzt abgerufen am: 28.09.2015

[@HER] www.herrenknecht.com – Internetseite Herrenknecht, Unternehmen in der maschinellen Tunnelvortriebstechnik. Zuletzt abgerufen am: 10.09.2015

[@HFW] www.herrenknecht-formwork.com – Internetseite Herrenknecht Formwork, Hersteller von Tübbingproduktionseinrichtungen. Zuletzt abgerufen am: 10.09.2015

[@ÖBB] www.oebb.at/infrastruktur – Internetseite ÖBB-Infrastruktur , Auftraggeber von Eisenbahntunneln. Zuletzt abgerufen am: 28.09.2015

[@POR] www.porr.at – Internetseite Porr, österreichischer Baukonzern. Zuletzt abgerufen am: 28.09.2015

[@VOI] www.voith.at – Internetseite Voith, Unternehmen mit Spezialisierung auf den Kranbau. Zuletzt abgerufen am: 10.09.2015

11 Normen

[EC 1] ÖNORM EN 1991-1-1: 2011-09, Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau

[EC 2] ÖNORM EN 1992-1-1: 2015-02, Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

[EC 7] ÖNORM EN 1997-1: 2014-11, Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln

[ON 13369] ÖNORM EN 13369: 2013-06, Allgemeine Regeln für Betonfertigteile

[ON 4710] ÖNORM B 4710-1: 2007-10, Beton – Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis

12 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die hier vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt sowie der Literatur wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Wien, am 18.11.2015 _____

Dieter Plank