

1 Einführung

Gegenstand und Anlass dieses Vortrages ist die Herausgabe der neuen Fachpublikation „Sachstandsbericht Tübbingern“ der Österreichischen Vereinigung für Beton und Bautechnik zum Österreichischen Betontag 2004. Das Ziel dieses Sachstandsberichtes ist die Darstellung des aktuellen Standes der Technik für die Planung, die Herstellung und die Anwendung der Tübbingern im österreichischen Tunnelbau. In der vorliegenden Kurzfassung wird ein Auszug aus den wichtigsten Kapitel des Sachstandsberichtes erläutert. Die Anwendung der Tübbingern wird an einigen Fallbeispielen dargestellt.

2 Planung

2.1 Planungsgrundlagen

Bestimmend für die Entscheidung zu einem Ausbau des Tunnels mit Tübbingern (Fertigteilesegmenten) ist die Frage der Vortriebsmethode (Tunnelvortriebsmaschine – Tunnelbohr- oder Schildmaschine) und die Entscheidung für einen ein- oder zweischaligen Ausbau.

Als Entscheidungskriterien für die technisch-wirtschaftliche Auswahl für den Tübbingerausbau werden herangezogen:

- Geotechnische Randbedingungen (Geologie, Hydrologie)
- Trassierung (Länge, Kurvenradien)
- Geometrische Randbedingungen (Querschnitt, Durchmesser, Lichtraum)
- Technische Machbarkeit (Risikoabschätzung)
- Wirtschaftlichkeit

Als technische Auswahlkriterien für das Tübbingersystem werden herangezogen:

- Projektanforderungen - Nutzungsart
- Bauweise (einschalig oder zweischalig)
- Anforderungen an die Dauerhaftigkeit des Bauwerks
- Dichtigkeitsanforderungen (Korrosionsschutz)
- Schutz vor aggressiven Bergwässern
- Brandschutz
- Konstruktiv technische Anforderungen (Fugengestaltung, Belastung, baubetriebliche Anforderungen (TVM, Erektor, Tübbinglogistik)
- besondere Lastannahmen

Die Formstabilität des Vielfugensystems Tübbingerausbau wird entweder durch Verbindungsmittel, über die um einen halben Tübbingstein versetzt angeordneten Tübbingerringe verstärkt oder über einen Spreitzübbingerausbau (Sonderform) erreicht. Im Zusammenwirken von Betongelenken in den Längsfugen, Koppellelementen in den Ringfugen und der stützenden Wirkung des umgebenden Gebirges einschließlich der erforderlichen Ringspaltverpressung kann die Dauerstandfestigkeit bzw. Tragsicherheit der Tübbingerausbaukonstruktion sichergestellt werden. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist im Allgemeinen gegeben, wenn die Bauleistung unter Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik erbracht wurde.

Bei einschaligem Tunnelausbau gelten folgende grundsätzliche Anforderungen an das Tübbingersystem; der Tübbing erhält eine Dreifachfunktion (Sicherheit, zumeist Dichtung und konstruktiver Ausbau), der Vortrieb im Grundwasser ist möglich und aufgrund der allfällig, geforderten Dichtfunktion bestehen sehr hohe Anforderungen an die Herstell- und Versetzgenauigkeit der Tübbingern.

Beim zweischaligen Tunnelausbau lassen sich folgende Anforderungen an das Tübbingersystem ableiten:

- der Tübbing übernimmt nur Sicherungsfunktion,
- der Tübbingerausbau kann nur im trockenen Fest- und Lockergestein eingesetzt werden, wenn keine Fugendichtbänder vorgesehen sind,
- Genauigkeitsanforderungen bei der Herstellung sind aufgrund der fehlenden Dichtfunktion geringer als bei der einschaligen Bauweise,
- der Einbauvorgang ist wegen der fehlenden Dichtung etwas zügiger und
- eine eventuelle Abdichtung sowie ein Innengewölbe sind notwendig.

Die zweischalige Bauweise mit zusätzlichem Einbau einer Ortbetoninnenschale erscheint aus wirtschaftlichen sowie technischen Überlegungen gegenüber der einschaligen Bauweise in folgenden Fällen berechtigt:

- Dem Tübbingausbau wird nur eine temporäre Tragwirkung abverlangt und ein schneller, wirtschaftlich günstiger Vortrieb mit einer ersten, lediglich vorläufigen Sicherung wird angestrebt.
- Es werden besonders hohe Anforderungen an die Dichtigkeit des Tunnels gemäß der Dichtigkeitsklasse 1 gestellt.
- Bei hohem Wasserandrang und zugleich sehr großem Wasserdruck werden die Dichtigkeitsanforderungen mit Kompressionsdichtungen und wasserundurchlässigen Stahlbetontübbingungen nicht mehr zuverlässig und dauerhaft erzielt.

Eine umfassende Lösung der Problematik dichter Tübbingausbau kann nur aus einer übergreifenden Verknüpfung von Anforderungen des Bauherrn, der konstruktiven Ausbildung durch den Planer, einer ausgereifen Betontechnologie sowie angepasste Fugenverbindungs- und Fugenabdichtungskonzeptionen in Hinblick auf eine abgestimmte Logistik im Zuge der Bauausführung erfolgen. In Analogie zur ÖVBB-Richtlinie „Weiße Wannen“ wird eine Einteilung in Anforderungsklassen für die Wasserundurchlässigkeit (siehe Tabelle 1) des Tübbingsystems (Tübbinge + Fugenabdichtung) vorgenommen:

Anforderungsklasse Wasserundurchlässigkeit (Dichtigkeitsklassen)	Einschaliges System	Zweischaliges System	Erläuterungen Feuchtigkeitsdefinitionen für die innere Leibung
DK 1		X	vollständig trocken
DK 2	X		weitgehend trocken
DK 3	X		kapilar durchfeuchtet
DK 4	X		feucht
DK 5	X	X	nass

Tabelle 1: Anforderungsklassen an die Wasserundurchlässigkeit für Tübbingsysteme (Dichtigkeitsklassen) in Anlehnung an die ÖVBB-RL „Weiße Wannen“

Aus baupraktischen Gründen wird eine Ringunterteilung in weniger als vier Teilsegmente nicht empfohlen, da solche Tübbinge über oder vor dem Nachläufer, aufgrund wenig vorhandenen Platz im Schildschwanz, nicht mehr in Einbauposition gebracht werden können. Da der Ringbau einen entscheidenden Zeitanteil an der gesamten Vortriebsdauer in Anspruch nimmt, muss v.a. eine Ringgeometrie gewählt werden, die projektspezifisch einen raschen und einfachen Ringbau zulässt. In Abbildung 1 sind die Grundtypen der Ringgeometrien gängiger Tübbingsysteme veranschaulicht.

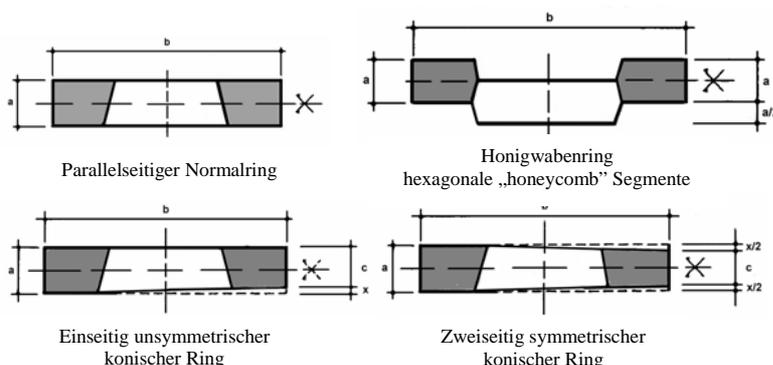


Abbildung 1: Grundtypen der Ringgeometrie
Legende: a ... Ringbreite, b ... Ringdurchmesser,
c ... verkürzte Ringbreite, x ... Konizitätsmaß

Zur Auffahrung von Krümmungen der Tunnelröhre und zum Ausgleich systemimmanenter Abweichungen der Vortriebsmaschine von der Tunnelachse werden die Tübbingringe konisch hergestellt, so dass die Stirnflächen der Tübbingringe nicht parallel sind. Durch entsprechendes Verdrehen der Tübbingringe (speziell beim zweiseitig symmetrisch-konischen Ring) zueinander kann jede räumliche Krü-

mung aufgefahren werden.

Das Tübbingsystem lässt sich bei Kenntnis der Tübbinggeometrie unter Bezugnahme auf die vier wesentlichen Formen der Ringgeometrie, mit den jeweiligen Verbandseigenschaften und der Ringbaubedingung zuordnen (siehe Tabelle 2).

Tübbingsystem	Längsfuge	Ringfuge	Schlussstein	Ringbaufolge	Segmentanzahl Segmentformen
rechteckig 	versetzte Anordnung v.a. bei Dichtigkeitsanforderung (T-Stoßausbildung)	durchgehend	eigene Geometrie erforderlich	Ring für Ring	gerade und ungerade Segmentanzahl rechteckig + trapezförmig

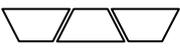
trapezförmig 	versetzte Anordnung v.a. bei Dichtigkeitsanforderung (T-Stoßausbildung)	durchgehend	nicht erforderlich (Sekundärstein)	Ring für Ring kontinuierlich	gerade Segmentanzahl mit abgestimmter Pressenkonfiguration trapezförmig
rhomboidal Segmente nur trapezförmig 	versetzte Anordnung v.a. bei Dichtigkeitsanforderung (T-Stoßausbildung)	durchgehend	eigene Geometrie erforderlich	Ring für Ring kontinuierlich	gerade und ungerade Segmentanzahl rhomboidal + trapezförmig
hexagonal 	immer verzahnt	immer verzahnt	nicht erforderlich (jedes Segment kann schließen)	kontinuierlich fortschreitend	gerade Segmentanzahl hexagonal

Tabelle 2: Zuordnung der Tübbinggeometrie

2.2 Konstruktion

Bei der Wahl der Tübbingabmessungen spielen statische und baupraktische Gründe eine Rolle. Zuzufolge baupraktischer Gründe sind Teilungen von fünf an aufwärts in Ausführung, wobei mit steigender Tübbinganzahl eindeutig die Ringbauzeit wächst. Dagegen kann in widerstandsfähigem Boden eine Erhöhung der Längsfugenzahl im Ring durchaus sinnvoll sein, wenn die Kostenersparnis an der Bewehrung durchschlägt.

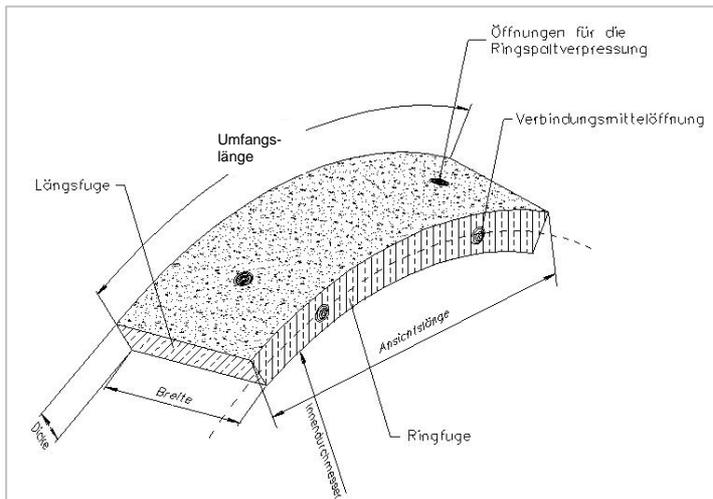


Abbildung 2: Begriffsdefinitionen der Tübbingabmessungen

Die geometrische Konstruktion der Tübbing muss so ausgelegt sein, dass die aus den Tübbingringen gebildete Röhre der durch die Fahrt der Schildmaschine vorgegebenen Raumkurve zwangungsfrei folgen kann. Dabei muss neben der geplanten Raumkurve auch die durch eine rückkorrigierende Fahrt zu beschreibende Raumkurve berücksichtigt werden. Die geometrische Konstruktion (siehe Abbildung 2) der Tübbing muss auf die Auffahrtoleranzen der Schildmaschine abgestimmt sein.

Die Tübbingbreite beeinflusst wesentlich die Schildlänge (Hub und Zylinderlänge der Vortriebspresen) und wird durch die trassierte Raumkurve im Hinblick auf den minimalsten Fahrradius der Tunnelvortriebsmaschine und das gewählte Bauverfahren bestimmt. Schmale Ringe erlauben engere Kurvenradien, während breite Ringe die Anzahl der Fugen verringern und die Vortriebsleistung aufgrund der Herabsetzung der kumulierten Ringbauzeiten erhöhen.

Der Schlussstein vervollständigt den Tübbingring zu einem geschlossenen Tragring. Die Geometrie des Schlusssteines wird durch seine Umfangslänge und seinen Öffnungswinkel definiert und bestimmt damit wesentlich den Platzbedarf beim Einbau bzw. die Länge des Schildschwanzes. Eine kleinere Umfangslänge und ein größerer Öffnungswinkel verringern tendenziell den Platzbedarf.

2.3 Tübbingbemessung

Die erforderlichen Nachweise für die Stabilität, Bauzustände, Transport- und Zwischenlagerungslasten Dichtigkeit, etc. sind zu erbringen. Die dabei wesentlichen Eingangsparameter für die Tübbingbemessung und relevanten Planungslasten (siehe Abbildung 3) sind:

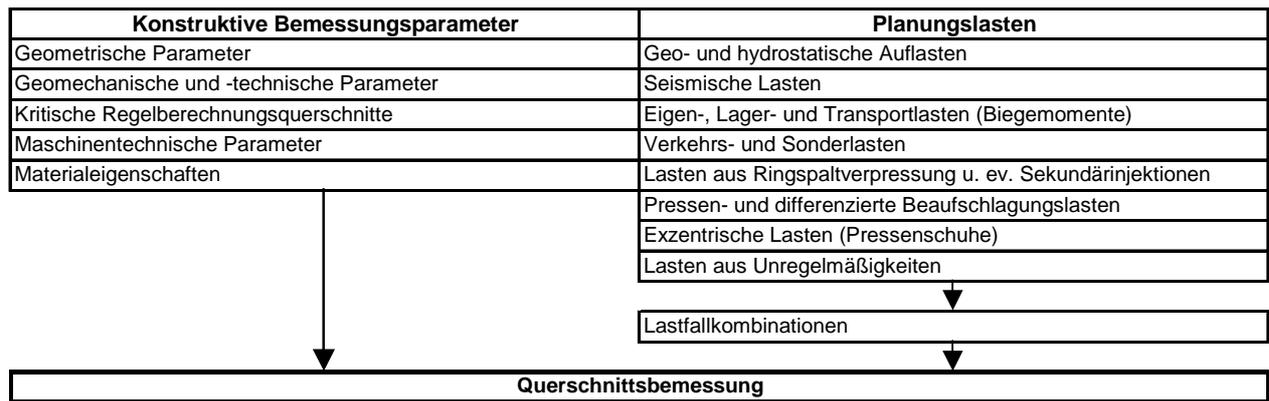


Abbildung 3: Bemessungsparameter und Planungslasten für das Tübbingsystem

Bei der technisch-konstruktiven Fugenausbildung ist im Speziellen zu berücksichtigen:

- die Fugenbelastung resultierend aus der Überleitung der Koppelkraft
- das Zentriersystem (mit/ohne Funktion als Koppelkraftübertragung)
- das Dichtsystem

Es kann grundsätzlich nach folgenden Grundformen der Fugenausbildungen (siehe Tabelle 3) unterschieden werden, wobei auch Kombinationen der Fugenarten untereinander und insbesondere Kombinationen mit verschiedenen Verbindungsmitteln und Zentrierhilfen möglich sind.

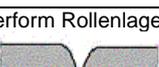
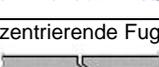
Fugenart	Anwendung	Vorteile	Nachteile
vollflächig ebene Fuge 	Nicht gedichtete, niedrig belastete Ringfugen, bei hoher Boden- bzw. Gebirgsüberdeckungen, symmetrische Belastungen	schalungstechnisch einfache und kostengünstige Lösung	Schäden bei geringfügiger Verkantung, lagegenauer Einbau wird erschwert
ebene Teilflächenfuge 	für gedichtete Ringfugen und niedrig belastete Längsfugen, bei geringer Bodenüberdeckung	zentrale Lastübertragung, gut mit Selbstzentrierung kombinierbar	Kerbbeanspruchung bei geringfügiger Verkantung
Wälzgelenkfuge 	für hochbelastete Längsfugen (konvex/konkav oder konvex/konvex)	zentrale Lastübertragung auch bei geringfügiger Verdrehung u/o Ausmittigkeit	Spaltzugbewehrung erforderlich, Ausbildung von Fugenversätzen zufolge Vibrationen der TVM möglich, relativ hohe Empfindlichkeit gegen Verdrehung und Ausmittlung
Sonderform Rollenlagerung 	vorwiegend bei Spreitzübbingsystemen mit niedrig belasteten Längsfugen	zentrale Lastübertragung, niedrige Empfindlichkeit gegenüber Einbauungenauigkeiten	Ausbildung von Fugenversätzen zufolge Vibrationen der TVM möglich
selbstzentrierende Fuge 	zumeist gedichtete Ausführung für Ringfugen „Nutm und Kamm“ bzw. „Topf und Nocke“, bei asymmetrischer Belastung, statisch wirksames Koppellement	Systemsteifigkeit der Tübbingausbau, Montage und Zentrierhilfe – daher lagegenauer Einbau möglich, Verbesserung der Systemsteifigkeit	Schäden bei nicht exaktem Einbau, Lastkonzentration an den Nutkanten, Betonabplatzungen zufolge Einbauhindernissen

Tabelle 3: Kriterien der Anwendung verschiedener Fugenarten

Die in Richtung der Tunnelachse verlaufenden "Längsfugen" der Tübbingauskleidung übertragen die auf die Auskleidungsschale wirkenden primären und sekundären Lasten. Der Gestaltung und Bemessung der Längsfugen kommt insbesondere bei einem hohen äußeren Lastniveau eine entscheidende Bedeutung zu.

Alle Längsfugen müssen miteinander verriegelt sein. Die Längsfugen sind von Ring zu Ring versetzt anzuordnen. Insbesondere unter Berücksichtigung der beim Aufbau der Tübbingschale unvermeidbaren Imperfektionen (Exzentrizität und Ovalität) muss die Form der Längsfugen die Vermeidung von Kantenpressungen sicherstellen, wodurch bei Längsfugen überwiegend eine zentrische Teilflächenpressung zur Lastübertragung angestrebt wird.

Die Ringfugen sind im Ringabstand der Tübbinge orthogonal zur Tunnel-Längsachse angeordnet und sind je nach System durchlaufend (Parallel- oder konisches Ringsystem) oder versetzt angeordnet (z. B. Hexagonalsystem). Die Belastung der Ringfugen erfolgt in der Regel temporär beim Versetzen der Tübbinge

(Haltekräfte) und allenfalls durch den Hilfsvorschub (Doppelschild-TBM) oder den Hauptvorschub des Maschinensystems (Schild-TBM).

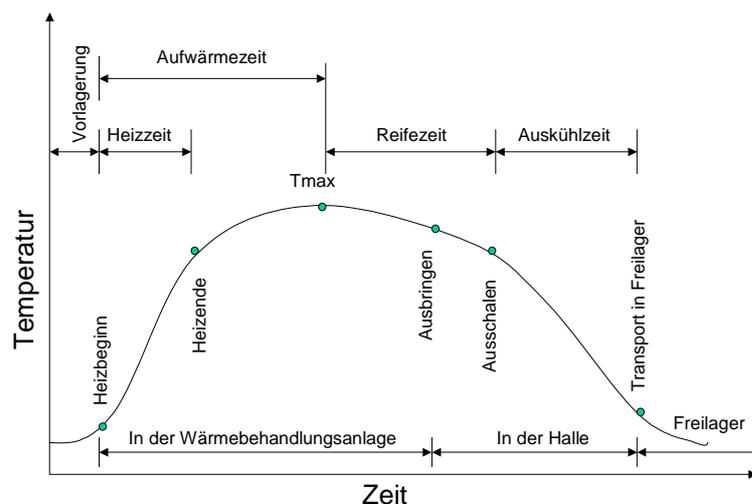
Längs- und Ringfugen der Tübbinge sind durch geeignete Verbindungsmittel gegeneinander zu verspannen. Die Segmente werden verbunden um eine gewisse Stabilität während des Baues zu gewährleisten, die Bauqualität zu erhöhen, um eine stufenweise Verschiebung der Segmentausrichtung zu verhindern, um die Starrheit (Scherkraft) zwischen den Ringen zu verteilen und um die Dichtungsbänder zusammenzupressen. Im Sachstandsbericht wird ausführlich auf die gängigen Verbindungsmittel und Abdichtungssysteme eingegangen.

3 Herstellung

Zur Sicherstellung einer angemessenen Bauwerksqualität unter besonderer Bedachtnahme auf den Tübbingausbau sind sowohl im Planungs- als auch Ausführungsstadium im Zuge des Qualitätsmanagements Angaben zur Nachweisführung und wirksame Kontrollmaßnahmen vorzusehen.

3.1 Tübbingfertigung

Bei der Produktion von Tübbingern ist wie bei jeder Fertigteilerstellung aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen eine möglichst kurze Ausschaltfrist anzustreben. Dies erfordert die Bereitstellung von Energie (in Form von Wärme), um eine schnellere Festigkeitsentwicklung des Betons zu erzielen. Die Wärmebehandlung (siehe Abbildung 4) stellt einen bedeutenden Kostenfaktor bei der Tübbingerstellung dar. Die Produktionstechnik entspricht in der Regel der eines herkömmlichen Fertigteilerwerkes. Die Produktionsanlage ist entweder als Anlage mit stationärer Fertigung (stehende Schalung für eher große Segmente mit hoher Anforderung an die Maßhaltigkeit) oder umlaufender Fertigung (stehende oder liegende Schalung für eher kleine Segmente mit geringer Anforderung an die Maßhaltigkeit) anzulegen.



Zum Erreichen einer verkürzten Ausschaltzeit von ca. 6 bis 8 Stunden sind betontechnologische Zusatzmaßnahmen zur Erzielung einer ausreichenden Ausschaltfestigkeit erforderlich. Dabei hat sich bewährt, den Frischbeton mit einer Temperatur von 30 bis 35 °C in die Schalung einzubringen und ihn anschließend auf dieser Temperatur zu halten. Für das Abheben des Tübbings ist in der Regel eine Ausschaltfestigkeit von 15 bis 20 N/mm² erforderlich.

Abbildung 4: Schematischer Ablauf der Wärmebehandlung

Im Falle einer Ausschaltzeit von ca. 18 bis 20 Stunden ist eine Frischbetontemperatur von 20 bis 25°C ausreichend wobei eine Wärmebehandlung nicht notwendig ist.

3.2 Tübbingebau

Die einzelnen Tübbinge werden in der TVM im Schutze der Schildkonstruktion mit Hilfe eines sogenannten Tübbingerektors mechanisch versetzt. Der Erektor, seine Befestigungsmittel und seine Kraftübertragung sind auf die zu erwartenden Maximalgewichte der Tübbinge unter Einbeziehung dynamischer Lasterhöhungen mit ausreichender Sicherheit zu bemessen.

Dieser Maschinenteil muss so konstruiert sein, dass ein zwängungsfreies Versetzen aller Tübbinge gewährleistet ist. Folgende Bewegungen muss der Erektor getrennt voneinander ausführen können:

- Verschiebung in Tunnellängsrichtung
- Drehung um die Schildachse um 360°
- Radiales Aus- und Einfahren
- Verkippen des Erektorkopfes in Tunnellängsrichtung
- Verkippen des Erektorkopfes in Querrichtung
- Verdrehen des Erektorkopfes

Für alle vorgenannten Bewegungsmöglichkeiten muss eine Feinsteuermöglichkeit bestehen. Die Bedienung der Erektorsteuerung muss so angeordnet sein, dass von ihr aus eine direkte Einsicht zur Einbaustelle eines jeden Tübbingsegmentes möglich ist.

Der Tübbingeinbau muss ohne Absetzen auf den Schildschwanz bündig an den letzten Ring und ohne Abstützungen durchgeführt werden. Entsprechende projektspezifische Einbautoleranzen sind zu beachten. Die Zusammendrückung der Dichtungsprofile auf das für die Dichtfunktion erforderliche Maß muss beim Versetzen gesichert möglich sein. Gem. Tabelle 4 kann bei der Einbaufolge prinzipiell unterschieden werden:

Einbaufolge	Beschreibung	Anwendung
intermittierende Systeme	der Einbau der Tübbinge erfolgt intermittierend im Takt: Vortrieb – Ringbau – Vortrieb – Ringbau ..., die Dauer der Vorgänge Vortrieb und Ringbau ist zeitbestimmend.	bei Einfach-Schildmaschinen und Doppelschild-Maschinen werden die hohen Vorschubkräfte im Lockergesteinseinsatz über einen Lastverteilungsring bzw. über Pressenschuhe schonend auf die Ringfuge des zuletzt eingebauten Tübbingringes übertragen.
kontinuierliche Systeme	der Einbau der Tübbinge erfolgt während des Vortriebs zeitunkritisch, die Vortriebsgeschwindigkeit ist maßgebend für die Vortriebsdauer;	bei teleskopierbaren Doppelschild-Tunnelbohrmaschinen werden die Vorschubkräfte in der Regel bei Festgesteinseinsatz über die Gripperpaare in das Gebirge abgetragen;

Tabelle 4: Einbaufolge der Tübbingsysteme

Der hinter der Schildschwanzdichtung beim Vorfahren des Schildes entstehende Spalt zwischen Gebirge und Außenleibung des Tübbingringes wird mit einem auf die Geologie abgestimmten Verfüllmaterial druckbeaufschlagt verfüllt. Zur satten, druckkontrollierten Füllung des Ringraumes ist ein nach allen Seiten abgeschlossenes System zu gewährleisten.

3.3 Tübbingschäden

Bei der Anwendung der Tübbinge im Produktionsprozess der Tunnelauffahrung ist die Gefahr von Beschädigungen möglichst frühzeitig zu erkennen und durch entsprechende Verbesserungen bei der Produktion,

Schadensklasse	Definition
I	Mikrorisse aus Temperatur, Schwinden
II	Oberflächenschaden ohne freiliegender Bewehrung
III	Oberflächenschaden mit freigelegter Bewehrung
IV	Durchgehende Risse aus mechanischer Einwirkung
V	Undichte Fugen

der Lagerung, des Transports und des Einbaus zu minimieren. Hinsichtlich eines möglichen Schadensbildes werden Schadensklassen (siehe Tabelle 5) definiert.

Tabelle 5: Schadensklassen

Schadensanierung (vgl. Tabelle 6) kann nur dann zum Tragen kommen, wenn zum Beispiel beim Einbau des Tübbing dieser vor Ort durch eine Unachtsamkeit beschädigt wird. In diesem Zusammenhang ist aus statischer Sicht zu klären, ob ein Sanieren möglich ist. Beim Ausschalvorgang beschädigte Tübbinge sind auszuschneiden.

Schadensklasse	P	T	E	V	I	G	F	Sanierungsmaßnahme
I	X	X						Ausscheiden s. RL-EI
II	X							Ausscheiden s. RL-EI
III	X		X					Ausscheiden 2 cm unter die Bewehrung freilegen – Sanierung gem. RL-EI
IV	X		X					Ausscheiden Vorgangsweise analog III
V				X				Ausscheiden s. RL-EI – Tübbing kann aus dem Verbund nicht mehr gelöst werden s. RL-EI – Tübbing kann aus dem Verbund nicht mehr gelöst werden
					X	X		Tübbing nicht mehr aus Verbund lösbar – Fugenverbreiterung + Fugenverfüllung
							X	Tübbing nicht mehr aus Verbund lösbar – Fugenverbreiterung + Fugenverfüllung

Legende:
P ... Produktion
T ... Transport
E ... Einbau
V ... Vorschub
I ... Injektion
G ... Gebirgsdruck
F ... Fugen
RL-EI RL Erhalten und Instandsetzen von Bauteilen aus Beton und Stahlbeton

Tabelle 6: Sanierungsmaßnahmen in Abhängigkeit von der Schadensklasse

4 Anwendung

Die Anwendung der Tübbinge wird heute hauptsächlich für Verkehrs-, Wasserversorgungs-, Abwasser- und Leitungstunnels verwendet. Die Planung der unterschiedlichen Tübbingsysteme ist von den Anforderungen der Tunnelnutzung abhängig. Deshalb liegen die Durchmesser der Tübbingauskleidung im Bereich von 3.0 bis 15.0 m. Klassisch bewehrte Tübbinge repräsentieren heute die überwiegende Art des Tübbingausbaus und sind für alle Tunnelarten in Verwendung: für einschalige Tübbingauskleidung, aber auch für zweischalige Auskleidung, wo die Tübbinge als äußere Schale wirken. Für die zukünftige Verwendung der Tübbinge zeichnen sich bestimmte Entwicklungsrichtung ab.

4.1 Zukünftige Projekte

Der Vergleich unter den alten, neuen und zukünftigen Projekten zeigt die Tendenz zu größeren Durchmessern, jedoch bei fast gleichbleibender Tübbingdicke. Es wird erwartet, dass zukünftige Projekte sogar mehr Freiraum innerhalb des Tunnels, nicht nur wegen der steigenden Anforderungen bei Verkehrstunnels sondern auch wegen der immer höheren Anforderungen an die Sicherheit haben werden.

Es wird auch erwartet, dass in Zukunft noch längere Tunnels errichtet werden, als einige der in Ausführung befindlichen AlpTransit Projekte in der Schweiz oder der geplanten Projekte in Österreich, wie z.B. der Wienerwald-Tunnel (~13 km), der Brenner Basis-Tunnel (~55 km) oder der Koralmtunnel (~32 km).

Tunnel	Baujahr	Durchmesser D_{TVM}	Tübbingdicke t
Passante Ferroviario, Mailand, I	1990-1992	9.00 m	30 cm
EOLE Lot35B, Paris, Fr	1993-1996	7.40 m	35 cm
Lefortovo, Moskau, Russland	2001-2003	14.21 m	60 cm
Groene Hart, Holland	2001-2004	14.87 m	60 cm
SOCATOP, VL1, Paris, Fr	2001-2007	11.56 m	42 cm
Metro Barcelona, Spanien	2004-2007	12.06 m	40 cm
Malaysia SMART	2004-2007	13.21 m	40 cm

Tabelle 7: Alte, neue und zukünftige Projekte

4.2 Tendenzen und Ausblick

Aus heutiger Sicht sind, auf Basis der aktuellen Anwendung der Tübbingauskleidung einige Tendenzen der kommenden Entwicklung erkennbar.

- **größere TVM-Durchmesser und »dünnere« Tübbinge:**

Es ist eine starke Steigerung der TVM-Durchmesser in der letzten Dekade zu bemerken. Die Größe der TVM Durchmesser stieg von 1993 mit einem Bereich von 7.50 - 9.00 m auf den derzeit größten TVM Durchmesser von 14.87 m an. Die Maschine ist beim Groene Hart Tunnel Projekt (siehe Abbildung 5) in den Niederlanden im Einsatz. Im Vergleich zum Tunneldurchmesser, ist jedoch bei der Tübbingdicke nur eine geringfügige Zunahme festzustellen. Deshalb wirken Tübbingdicken heute relativ „dünnere“ als vor 10 Jahren und geben das Gefühl einer dünneren Auskleidung. Die Segmentbreite hat sich außerdem mit der Zunahme des Durchmessers erhöht und liegt derzeit im Bereich von 1.80 - 2.00 m für Tunneldurchmesser über 10.00 m. Hier hat die Entwicklung des TVM-Erektors wesentlich beigetragen und es ist heute fast keine Beschränkung bei der Erektorkapazität gegeben. Die Installation eines Segmentes über 10 Tonnen Eigengewicht stellt kein Problem mehr dar.



Abbildung 5: Groene Hart, Netherlands -: Transport der Tübbinge (t=60 cm) zur Übernahmeverrichtung

- **TVM für wechselhafte Geologie und kontinuierlichen Vortrieb:**

Neue Konstruktionen zeigen, dass Anforderungen an die TVM sehr breit sind und wechselhafte Bodenverhältnisse sowie extrem ungünstige Zustände dennoch mit einer guten Leistung bewältigt werden können. Manchmal sind auch für die Erkundung der geologischen Verhältnisse Pilotstollen notwendig, die in weiterer Folge auf den endgültigen Tunnelquerschnitt aufgeweitet werden müssen. Diese Tendenz ermöglicht

eine breitere Anwendung der TVM, auch in geologischen Formationen die früher für den mechanisierten Vortrieb nicht geeignet waren. Zusätzlich ist der kontinuierliche Vortrieb ein Thema, das es in naher Zukunft anwendungssicher zu verwirklichen gilt. Beide Themen haben direkten Einfluss auf Anforderungen an den Tübbingausbau. Mögliche Auswirkungen daraus verursachen die Verwendung hochfesten Betons und die wirtschaftliche Kombination der Tübbingbewehrung als Mischung aus Stäben und Fasern.

- **Ein- oder Zweischaligkeit - konstruktive und wirtschaftliche Überlegungen:**

Neue Projekte zeigen im Allgemeinen zwei Konstruktionsformen der Tunnelauskleidung: als einschalige oder zweischalige Lösung. Die Anforderungen an die Tübbingauskleidung sind hierbei unterschiedlich und stellen zwei verschiedene Konzepte aus wirtschaftlicher und konstruktiver Sicht hinsichtlich des Kosten/Leistungsverhältnisses dar. Zusätzlich gibt es einen Unterschied im Konzept zwischen der ein- und zweischaligen Bauweise. Die zweischalige Bauweise erlaubt die Verwendung neuer Tübbinggeometrien und Vortriebskonzepte, wie z.B. der Wabentübbing (honeycomb segments) im kontinuierlichen Vortrieb und daraus resultierenden höheren Tagesleistungen.

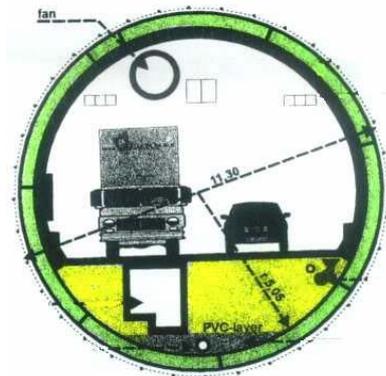


Abbildung 7: Westerschelde Tunnel mit 11.30 m Ausbruchsdurchmesser und zweischaliger Tunnelauskleidung

Weitere Überlegungen über die Sicherheit im Eisenbahntunnel haben

am Beispiel des Groene Hart Tunnels ergeben, dass eine einschalige, wasserundurchlässige Tübbingauskleidung mit einer vertikalen Trennwand ausreichende Sicherheit und eine wirtschaftliche Lösung mit einem Durchmesser von 14.87 m ermöglicht wird (siehe Abbildung 6). Gleichzeitig wird ein anderes Projekt am Beispiel des Westerschelde Tunnels (zweispuriger Straßentunnel 60 m unter dem Meeresspiegel), ebenfalls in den Niederlanden, aus Sicherheitsgründen mit einem zweischaligen Tunnelausbau ausgeführt (siehe Abbildung 7).

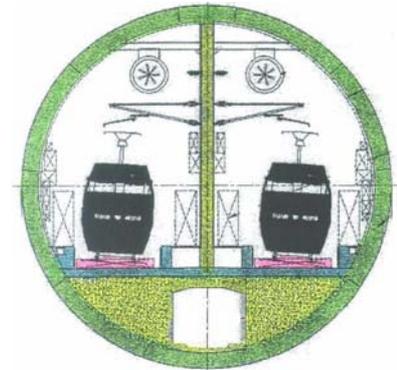


Abbildung 6: Groene Hart Tunnel mit 14.87 m Ausbruchsdurchmesser und einschaliger Tunnelauskleidung ($t=60$ cm)

- **erhöhte Sicherheitsmaßnahmen im Tunnel:**

Der mechanisierte Tunnelvortrieb bietet und wird in Zukunft noch mehr zahlreiche technische Möglichkeiten bieten können. Die Anforderungen an die Sicherheit in Verkehrstunnels werden weiterhin zunehmen. Größere Tunnelquerschnitte und längere Tunnels eröffnen die Möglichkeit, eine große Menge an Fahrzeugen und Personen gleichzeitig in einem unterirdischen Raum unterzubringen. Deshalb sollen spezielle



Abbildung 9: SOCATOP West Tunnel VLI, Paris, France: Ausbruchsdurchmesser 11.56 m, einschaliger wasserdichter Tübbingausbau ($t=42$ cm)

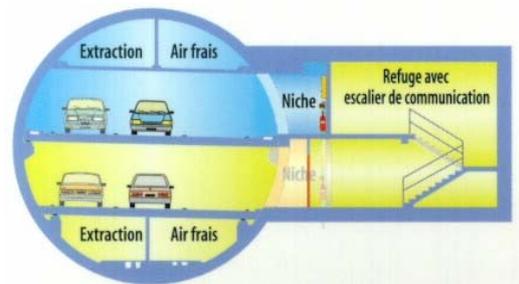


Abbildung 8: SOCATOP, West Tunnel VLI, Paris, France: Sicherheitskaverne für Passagiere; einschaliger Tübbingausbau ($t=42$ cm)

Lösungen und weitere Anforderungen an Tübbingauskleidungssysteme zukünftig entwickelt werden, wie z.B.: Tunnelverkehr auf verschiedenen Ebenen (siehe Abbildung 8, 9), Ausbau zahlreicher Sicherheits- und Ventilationskavernen, ausreichend Fluchtschächte entlang der Tunneltrasse sowie neue Planungsvorschriften für die Innenausstattung, Beleuchtung-, Sicherheitsausrüstung und Überwachung des Verkehrs im Tunnel.

Hinweis: Literaturangaben siehe Sachstandsbericht Tübbinge