
Maschinelles Tunnelbau

I. Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen

Die Empfehlungen geben einen Überblick über den Stand der Technik beim Entwurf, der Herstellung und dem Einbau von Tübbingringen beim maschinellen Tunnelvortrieb. Sie wurden vom Arbeitskreis „Tübbingdesign“ des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB) aufgestellt. Die Empfehlungen fassen die Konstruktionsgrundlagen sowie die erforderlichen Berechnungen und Nachweise bei der Bemessung eines Tübbingringes nach dem neuesten Stand der Normung zusammen. Außerdem werden Hinweise für den Entwurf von Anschluss- und Übergangs-

Empfehlungen des Arbeitskreises „Tübbingdesign“ des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB). Mitglieder: Prof. Dipl.-Ing. Grübl, PSP Consulting Engineers GmbH, München und Hochschule für Technik, Stuttgart (Vorsitzender), Dr.-Ing. Billig, Hochtief Consult, Essen, Dipl.-Ing. Böhme, Wayss+Freytag Ingenieurbau AG, Frankfurt, Dipl.-Ing. Dietsch, Bilfinger Construction GmbH, NL Tunnelbau, München, Prof. Dr.-Ing. Heimbecher, ehem. BAST, Bergisch-Gladbach, jetzt Hochschule für Technik, Münster (korrespondierendes Mitglied), Prof. Dr.-Ing. Kirschke, Beratender Ingenieur, Ettlingen, Dr.-Ing. Leucker, STUVA Köln (korrespondierendes Mitglied), Dr.-Ing. Maidl, Maidl Tunnelconsultants GmbH & Co. KG (korrespondierendes Mitglied), Prof. Dr.-Ing. Mark, Ruhr-Universität Bochum, Dr.-Ing. Mayer, Züblin AG, Stuttgart (stellv. Vorsitzender), Dipl.-Ing. Neuenchwander, Lombardi Engineering Ltd., Minusio (TI), Dipl.-Ing. Neumaier, Ing. Büro Spiekermann, Duisburg (korrespondierendes Mitglied), Dipl.-Ing. Beck, Ing. Büro Vössing (korrespondierendes Mitglied), Dipl.-Ing. Schuck, Deutsche Bahn AG TBT, München, Dr.-Ing. Tirpitz, Bilfinger Construction GmbH, Wiesbaden, Dr.-Ing. Winselmann, Ing.-Büro Prof. Duddeck und Partner GmbH, Braunschweig; außerdem haben korrespondierend mitgewirkt: Dipl.-Ing. (HTL) Lemmerer, ÖBB Infrastruktur AG, Wien, Dipl.-Ing. Babendererde, Babendererde Engineers GmbH, Bad Schwartau, Animateur ITA Workinggroup 14, Mechanized Tunneling, Dr.-Ing. Ring, Maidl Tunnelconsultants GmbH & Co. KG, Dipl.-Ing. Putke, Ruhr-Universität Bochum

bauwerken gegeben. Ebenfalls behandelt werden die Bemessung für den Brandfall und der Einsatz von Stahlfasern.

Recommendations for the design, the production and the assembly of segmental rings

Published by the Working Group "Segmental Ring Design" of the DAUB (German Tunnelling Committee)

The recommendations give an overview of the state of the art for the design, the production and the assembly of the tunnel lining made of precast segmental rings. They were elaborated by the DAUB working group "Segmental Ring Design". The recommendations give a résumé of the construction fundamentals and the necessary calculations and verifications for the dimensioning of the precast segments according to the actual standards. Moreover they give references for the design of transverse constructions to cross passages and portal buildings. Also treated are the dimensioning for fire loads and the use of steel fibres.

1 Allgemeingültiges

1.1 Zweck der Empfehlungen

Die Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen wurden vom Arbeitskreis „Tübbingdesign“ des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB) aufgestellt. Sie sollen den Stand der Technik im Bereich der Tunnelauskleidungen mittels Betonfertigteilen wiedergeben und Grundlagen für die Konstruktion und die Berechnung der Tübbingringe im Hinblick auf die Gebrauchseigenschaften, die Bauausführung und die Qualitätssicherung zusammenstellen.

Die hierzu bereits vorliegenden Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Entwurfspraxis und bereits veröffentlichte Vorschriften, wie die Richtlinie 853 der DB AG [1], die ZTV-ING Teil 5, Abschnitt 3 [3] und die entsprechende österreichische Richtlinie [48], Tübbingsysteme aus Beton, werden nachfolgend zusammengefasst und im Zusammenhang dargestellt. Damit werden Empfehlungen

für die Herstellung qualitativ hochwertiger Tunnelauskleidungen gegeben, die die Gebrauchsfähigkeit über eine Nutzungsdauer von rund 100 Jahren bei geringen Unterhaltskosten sicherstellen.

1.2 Rahmen der Anwendung

Die Empfehlungen können für die Herstellung von Auskleidungen aus Stahlbeton- oder Stahlfaserbetonfertigteilen (Stahlbeton- oder Stahlfaserbetontübbings) im Verkehrstunnelbau, bei Wasserstollen (Triebwasserstollen für Wasserkraftanlagen, Trinkwasserstollen, Abwasserstollen) sowie im Infrastrukturtunnelbau angewendet werden. Sie befassen sich hauptsächlich mit einschaligem Tübbingausbau, bei dem besonders hohe Anforderungen an den einzelnen Tübbing und an das Ringsystem gestellt werden. Sie können jedoch auch für Tübbingsysteme ohne Abdichtung und zweischaligen Ausbau sowie für Schachtbauwerke mit Tübbingauskleidung sinngemäß angewendet werden.

1.3 Begriffsbestimmungen

Um begriffliche (Fehl-)Interpretationen auszuschließen, werden im Folgenden die wichtigsten verwendeten Fachbegriffe zusammengestellt und erläutert.

Abdichtungssystem:

Dichtungssystem, bestehend aus Dichtungsbändern (Dichtraumen), die jeden einzelnen Tübbing umschließen und im Zusammenwirken aller Tübbings als Schale eine dauerhafte Abdichtung der Tunnelröhre gegen Grundwasser sicherstellen

Einschalige Auskleidung:

Alle statischen und konstruktiven Anforderungen der Tunnelauskleidung werden vom Tübbingring wahrgenommen. Es wird keine weitere innen liegende Betonschale eingebaut, die zur Lastabtragung oder Abdichtung beiträgt. Der Ringspaltverpressmörtel sowie etwaige Brandschutzvorsatzschalen auf der Tübbinginnenseite, sofern sie keine statische oder abdichtende Funktion haben, zählen nicht als zusätzliche Schale.

Keilform („Konizität“) des Tübbingrings:

Differenz zwischen der maximalen und minimalen Ringbreite (Abmessung des Ringes in Tunnel längsrichtung)

Längsfuge:

Begrenzungs- und Kontaktfläche zwischen den Tübbings innerhalb eines Rings. Die Längsfugen verlaufen ungefähr parallel zur Tunnelachse.

Maschinelles Vortrieb:

Vortrieb mit Hilfe einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM), bei dem die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und des Stützmitteleinbaues maschinell und in einem festen Arbeitszyklus ausgeführt werden

Ovalisierung:

Verformung eines ursprünglich kreisförmigen Tübbingrings, z. B. zu einer stehenden oder liegenden ovalen Form

Querstollen (Querschlag, Verbindungstunnel):

Verbindungsbauwerk zwischen zwei Tunnelröhren oder zwischen einer Tunnelröhre und der Geländeoberfläche oder einem Schachtbauwerk mit speziellen Übergangskonstruktionen im Anschlussbereich (Regelanschluss im Ulmenbereich) der Hauptröhre. Die Querschnittsgestaltung ist vom Verwendungszweck abhängig.

Ringfuge:

zur Tunnelachse annähernd senkrecht stehende Fuge zwischen zwei benachbarten Tübbingringen (auch Umfangsfuge genannt)

Ringkopplung:

statisch wirksame Verbindung zwischen zwei benachbarten Tübbingringen, z. B. durch Verbindungselemente über die Ringfuge hinweg, wie Dübel, Nut- und Feder- oder Topf/Nocke-Konstruktionen, oder durch die Reibung in den Ringfugen (Reibungskopplung), die i. d. R. durch verbleibende Längskräfte aus dem Vortrieb der TVM aktiviert wird

Ringbreite (Tübbingbreite):

Abmessung des Tübbingringes in seiner Mittelachse in Tunnel längsrichtung (mittlere Ringbreite)

Ringspalt:

Raum zwischen dem Ausbruchquerschnitt im Boden oder Gebirge und der äußeren Oberfläche des Tübbingringes

Ringspaltverfüllung, Ringspaltverpressung, Ringspaltverblasung
Vorgang des Verfüllens oder des Verpressens des Ringspalt mit Mörtel bzw. Einblasen von Einkornkies (Perlkies) in den Ringspalt zur Herstellung eines Kraftschlusses zwischen dem Baugrund und der Tübbingröhre

Schildvortrieb (SV):

Vortrieb mit einer TVM mit einem vorderen Stahlmantel, in dem die Abbau- und Antriebseinrichtungen untergebracht sind (Schildschneide und Mittelschuss), sowie einem hinteren Stahlmantel, in dessen Schutz der Tübbingring eingebaut wird (Schildschwanz)

Tübbing (Mehrzahl: Tübbings oder Tübbinge):

gekrümmtes Fertigteil aus Beton (Stahlbeton/Stahlfaserbeton), Stahl, Stahlguss oder Gusseisen für die Auskleidung von Gebirgshohlräumen für Tunnel, Stollen und Schächte

Tübbingdicke:

Abstand zwischen der Tübbingaußen- und der Tübbinginnenseite

Universalring:

keilförmiger Tübbingring, bei dem der Ring in jeder möglichen Position des Schlusssteins eingebaut werden kann (d. h. auch mit Schlusssteinpositionen im Sohlbereich)

Verbindungsmittel:

auf Zug und/oder Abscheren beanspruchbare Verbindungselemente zur temporären oder dauerhaften festen Verbindung zweier Tübbings oder Tübbingringe in den Längs- und Ringfugen (z. B. Schrauben, Dübel)

Zweischalige Auskleidung:

Tunnelauskleidung aus zwei Schalen mit unterschiedlichen statischen und konstruktiven Anforderungen, die in unabhängigen Arbeitsgängen und mit unterschiedlichen Bauverfahren hergestellt werden (z. B. Außenschale Tübbingausbau, Innenschale Ortbeton)

1.4 Abkürzungen

CEN:	Comité Européen de Normalisation
DIN:	Deutsche Industrie Norm
EPDM:	Ethylene-Propylene-Diene-Monomer
GW:	Grundwasser
ISO:	International Standardisation Organisation
QM:	Qualitätsmanagement
QSS:	Qualitätssicherungssystem
SM:	Schildvortriebsmaschine
TBM:	Tunnelbohrmaschine
TBM-DS:	Doppelschild-TBM
TVM:	Tunnelvortriebsmaschine

2 Überblick über übliche Tübbingsysteme

Die üblichen Betontübbingringe lassen sich in verschiedene Systeme einteilen (Bild 1):

Grundsätzlich kann zwischen Ringen mit ebenen Ringstirflächen (Ringfugen) und Ringen mit versetzten Ringfugen (Hexagonal- oder Wabentübbingringen) unterschieden werden. Bei den Ringen mit ebenen Ringfugen wird zwischen keilförmigen und Parallelringen unterschieden.

Erläuterungen zu den Ringtypen:

a) Ringe mit ebenen Ringfugen

Bei diesem, am weitest häufigsten eingesetzten Ringtyp werden meist sechs bis neun Einzeltübbings zu einem kompletten Ring zusammengesetzt.

b) keilförmige („konische“) Tübbingringe

Um auch bei Bogenfahrten im Grund- und Aufriss einen zwangsfreien Einbau der Tübbings zu ermöglichen, muss die Ringgeometrie entsprechend ausgeführt werden: Auf der Krümmungsaußenseite muss die Ringbreite in Tunnellängsrichtung etwas größer, auf der Krümmungsinneseite etwas kleiner ausgeführt werden. Die einfachste Umsetzung ergibt sich bei keilförmigen Tübbingringen, die beim Einbau beliebig

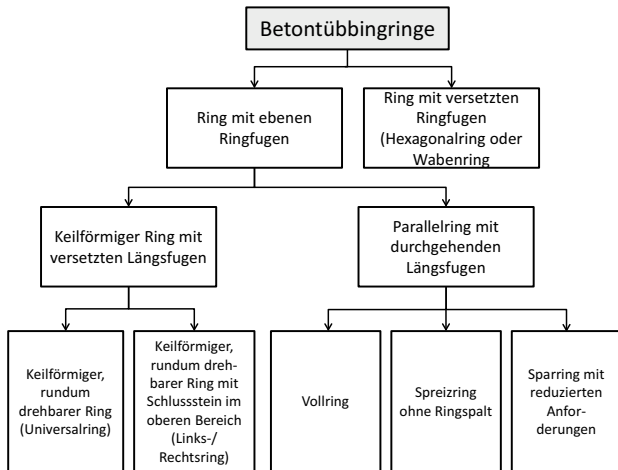


Bild 1. Einteilung der Betontübbingringe in Ringtypen

gegeneinander verdreht werden können (Universalring). Die größte Ringbreite kann dabei an jeder Stelle des Umfangs liegen. Möglich sind einseitig und beidseitig keilförmige Ringe. Einseitig keilförmige Ringe, mit der schrägen Seite in Vortriebsrichtung hinten, sind für sofortige Korrekturen beim Einbau im Schildschwanz besser geeignet.

Soll der Schlussstein möglichst über der Ulme, im oberen Bereich des Ringes, eingebaut werden, müssen zwei verschiedene Ringe verwendet werden („Links- und Rechtsring“).

c) Spreiztübbingringe

Spreiztübbingringe werden meist beim zweischaligen Ausbau als einfache Ausbruchssicherung eingesetzt. Der Tübbingring wird im stark vereinfachten ausgeführten Schildschwanz (ohne Schildschwanzdichtung) mit einem seitlich keilförmigen

Schlussstein kürzerer Breite vormontiert. Nachdem die TVM weitergefahren ist und der Ring den Schildschwanz verlassen hat, wird der Schlussstein weiter in den Ring eingeschoben und dadurch der gesamte Ring so weit gespreizt, dass der Tübbingring am Gebirge anliegt. Die Ringspaltverfüllung kann damit entfallen. Spreiztübblinge können alleine nur im zumindest kurzfristig standfesten, nicht wasserführenden Baugrund eingesetzt werden. Für einen wasserdichten Tunnel sind eine Grundwasserhaltung während der Bauzeit und eine Innenschale für den Endzustand zwingend notwendig.

d) Spartübblinge mit reduzierten Anforderungen

Als vereinfacht ausgeführter Ring kann der Spartübbling dort eingesetzt werden, wo die Hauptbelastung erst nach Einbau der Innenschale auftreten wird, z. B. beim Vortrieb unter Grundwasserabsenkung oder im quellenden Gebirge. Schäden am Tübbingring können hingenommen werden, solange die Standsicherheit gegeben ist.

Als Variante kann dieser Ringtyp auch für Situationen verwendet werden, in denen der Tübbingring nach temporärer Funktion wieder entfernt wird, z. B. zum Durchfahren von nichtausgehobenen Baugruben für Schacht- oder Bahnhofsbauwerke.

e) Ringe mit versetzten Ringfugen (Hexagonal- oder Wabentübblinge)

Dieser Ringtyp ist sehr einfach und schnell einzubauen und wird daher insbesondere beim Bau von Wasserstollen im Hartgestein bei geringen Bergwasserzutritten verwendet. Die Betontübblings haben alle eine sechseckige Form und werden untereinander nicht verschraubt. Es wird nach dem Vortrieb einer halben Tüblinglänge die Hälfte der Tübblings eines kompletten Ringes eingebaut.

Bei diesem Ringtyp ist ein wasserdichter Ausbau nicht ohne weiteres möglich. Bei Kurvenfahrten muss der in den Ringfugen entstehende Spalt durch den Einbau von unterschiedlich dicken Zwischenlagen ausgeglichen werden.

Der Stollen kann durch tiefliegende Gebirgsinjektionen vorgespannt werden, auch der Einbau einer Innenschale ist möglich.

f) weitere Ringtypen

Insbesondere im Hartgestein werden noch weitere Ringtypen eingesetzt:

- Ringe mit speziellen Sohlübblings,
- einschaliges Parallelringsystem im Druckstollenbau,
- zweischaliges Ringsystem mit Regenschirmabdichtung,
- einschalige Auskleidung in der Sohle und zweischalige im Gewölbe.

Bei allen Ringen kann zwischen ein- und zweischaliger Auskleidung unterschieden werden. In Deutschland ist die einschalige Auskleidung üblich. In Österreich und der Schweiz werden viele Tunnel mit großem Durchmesser, insbesondere im Festgestein, mit zweischaliger Auskleidung (Außenschale: Tübbingring, Innenschale: bewehrter und unbewehrter Ort beton) ausgeführt. Beim zweischaligen Ring wird meist ein Parallelring verwendet.

Bei der einschaligen Auskleidung sind die Verhältnisse für die Lastabtragung eindeutig zuweisbar, da der Tübbingring sämtliche äu-

Beren und inneren Einwirkungen aufnehmen muss. Bei der zweischaligen Auskleidung hängt die Lastaufnahme durch die beiden Schalen von verschiedenen Faktoren ab. Meist wird angenommen, dass der Tübbingring als Außenschale ohne Abdichtung die gesamten äußeren Einwirkungen (ohne Wasserdruck) aufnimmt und die Ortbetoninnenschale die inneren Lasten sowie, bei wasserdruckhaltender Abdichtung, den Wasserdruck aufnehmen muss.

3 Tübbingkonstruktion

3.1 Beschreibung des einschaligen Tübbingringes

3.1.1 Allgemeine Aspekte der Tunnelauskleidung

Die Auskleidung von Tunneln, die in geschlossener Bauweise hergestellt wurden, muss mehrere Aufgaben sowohl im Bauzustand als auch als endgültiges Bauwerk erfüllen:

- Sicherung des Gebirges zur Verhinderung von Nachbrüchen,
- Aufnahme der Einwirkungen aus Eigengewicht, Auflasten, Gebirge und Grundwasser,
- Abdichtung des Tunnels gegen Grundwasser,
- Befestigungssystem für Ausrüstungsteile (z. B. Oberleitung, Beleuchtung, Lüfter),
- Aufnahme der Vortriebs- und Steuerkräfte der Vortriebsmaschine.

Bei der Auskleidung mit einschaligen Stahlbetontübbings muss der Tübbingring alle genannten Aufgaben übernehmen.

Wenn der Tübbingring die TVM verlässt, kann dieser sofort Lasten aufnehmen. Nach erfolgter Ringspaltverpressung bzw. Verfüllung hat er seine endgültige Tragfähigkeit bereits weitgehend erreicht. Da Stahlbetontübbings in einem Fertigteilwerk mit umfangreichen Qualitätsüberwachungsmöglichkeiten hergestellt werden, ist die Qualität üblicherweise hoch und gleichbleibend. Durch Kompressionsdichtungsrahmen wird der Tunnel sofort gegen den anstehenden Grundwasserdruck abgedichtet.

Die Ringspaltverpressung, am besten durch den Schildschwanz, wird kontinuierlich mit dem Vortrieb vorgenommen. Sie bewirkt

eine Vergleichmäßigung der Einwirkungen auf den Tübbingring und stellt eine sofortige Bettung sicher.

Der Tübbingring bildet einen Gelenkring, der seine Stabilität hauptsächlich über die Bettung im umgebenden Gebirge erhält. Koppelungsmöglichkeiten über die Ringfugen und die Aufnahme von Momenten in den Längsfugengelenken durch ausmittige Normalkraftübertragung tragen zur Ringtragfähigkeit bei.

Zur Vermeidung von Kreuzfugen werden die Tübbingringe üblicherweise von Ring zu Ring versetzt eingebaut. Kreuzfugen sind in der Regel zu vermeiden oder nur in geringem Umfang zulässig.

3.1.2 Ringgeometrie

Bei der Festlegung des Ringinnendurchmessers muss darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Auffahrtoleranz vorgesehen wird. In Europa wird meist ein Toleranzkreis für die Schildfahrt von $R = \pm 10$ cm eingerechnet, d. h., der Tunnel wird im Durchmesser 20 cm größer als die erforderliche innere Tragwerksbegrenzung hergestellt. Insbesondere bei langen Tunneln über 10 km können die Vermessungstoleranzen und gegebenenfalls die Durchschlagsbedingungen einen weiteren Zuschlag erfordern. Bei einer zweischaligen Auskleidung können die Toleranzforderungen gegebenenfalls verringert werden.

Die Tübbingdicke orientiert sich an statischen und konstruktiven Vorgaben (z. B. Dichtungsdetails, Dauerhaftigkeit) und liegt im Allgemeinen zwischen 15 und ca. 75 cm. Bei einschaligem Ausbau mit Kompressionsfugenband sollte die Dicke 30 cm nicht unterschreiten.

Die Ringbreite liegt in Abhängigkeit vom Durchmesser etwa zwischen 0,75 und 2,50 m.

Bei Kurvenfahrten werden keilförmige Ringe eingesetzt. Die erforderliche Keilform k lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$k = (\varnothing_A \times b_m) / R$$

k Keilform (Differenz von maximaler zu minimaler Ringbreite)

\varnothing_A Außendurchmesser des Tübbingringes

b_m mittlere Ringbreite
 R minimaler Kurvenradius

Zu berücksichtigen ist außerdem eine Korrekturkurvenfahrt bei Fehlfahrten. Der Korrekturkurvenradius sollte mindestens 20 % kleiner gewählt werden als der kleinste Sollkurvenradius im Grund- und Aufriss.

Da die Tunnelvortriebsmaschine nie genau der Soll-Kurve folgt, sollten auch bei geraden Tunnelvortrieben keilförmige Tübbingringe verwendet werden. Dies gilt insbesondere bei Verwendung von Zwischenlagen in den Ringfugen, da diese durch unterschiedliche Pressendruckbeaufschlagung ungleichmäßig zusammengedrückt werden. Bei geraden Tunnelstrecken sollte der Korrekturkurvenradius entsprechend den Steuerungsmöglichkeiten der Vortriebsmaschine gewählt werden (z. B. $R_{\text{Korrektur}} = 400 \text{ m}$).

Geradeausringe (Parallelringe) sollten planmäßig nur als Spezialringe, z. B. beim Einsatz von Stahltübbings im Bereich von späteren Querschlägen, eingesetzt werden.

Zu berücksichtigen ist außerdem, dass bei versetzten Längsfugen die Keilform nicht vollständig ausgenutzt werden kann, da das Maximum/Minimum nur mit dem vorgegebenen Längsfugenversatz im Ring angeordnet werden kann.

Die Keilform sollte einseitig und an der in Vortriebsrichtung hinteren Seite des Tübbingringes vorgesehen werden, da nur so der neu zu bauende Ring sofort mit der gesamten Keilform korrigieren kann.

Die Ringstellung des neu zu bauenden Ringes sollte immer so gewählt werden, dass die Ringvorderseite möglichst mittig im Schildschwanz zu liegen kommt und die Vorlaufdifferenzen der Vortriebspresen möglichst gering sind.

Um zu vermeiden, dass der Schlussstein unterhalb der Ulme eingebaut werden muss, werden häufig Links-/Rechtsringe verwendet. Hierbei wird die maximale/minimale Ringlänge 90° von der Schlusssteinachse angeordnet. Obwohl die modernen Tübbingerektoren und die heutigen Pressensteuerungen in der Lage sind, problemlos den Schlussstein im unteren Schildbereich ein-

zubauen und die Logistik beim „Universalring“ etwas einfacher durchzuführen ist, stellen Links-/Rechtsringe keinen Nachteil dar: Sollte der gelieferte Ringtyp nicht „passen“, kann er wie ein Universalring verwendet und der Schlussstein im unteren Ringbereich eingebaut werden.

3.1.3 Konstruktion des Tübbingrings

Die Ringteilung muss auf die Pressenanordnung der Vortriebsmaschine abgestimmt sein. Bei versetzt einbaubaren Tübbingringen bedeutet dies, dass eine regelmäßige Pressenverteilung über den Umfang der TVM vorgesehen wird. Die Pressen sollten immer an dafür vorgesehenen Stellen auf den einzelnen Tübbing drücken. An diesen Stellen werden gezielt die Spaltzugbewehrung und ggf. Zwischenlagen eingebaut, um Schäden an den Tübbings zu vermeiden.

Um Biegemomente in den Pressen und eine ausmittige Kräfteinleitung am Tübbing zu vermeiden, sollte der Radius, auf dem die Pressen in der Maschine angeordnet sind, mit dem Achsradius der Kraftübertragungsfläche der Ringfuge übereinstimmen. Jeder zweite Tübbingring sollte zum vorhergehenden Ring um die Hälfte oder ein Drittel der Tübbingabwicklungslänge versetzt eingebaut werden. Dies verhindert über mehrere Tübbingringe durchgehende Längsfugen (Kreuzfugen), die nachteilig für die Trag- und Dichtwirkung des Tübbingausbaus sind.

3.1.4 Prinzip des Ringbaus

Beim Ringbau müssen die Tübbings des neu zu bauenden Rings frei schwebend an den zuletzt gebauten Ring angesetzt werden. Es ist darauf zu achten, dass der Tübbing mit seiner Ringfugenfläche vollflächig anliegt (Verkippen vermeiden) und mit den jeweiligen Vortriebspressen die Dichtung vollständig zusammengepresst wird. Beim Ansetzen der jeweils nächsten Tübbings ist darauf zu achten, dass die Längsfugendichtungen durch das Tübbingversetzgerät (Erektor) und die Verschraubung ebenfalls vollständig zusammen-

gedrückt werden. Jede Art von Führungsleisten (Shiftleisten) oder sonstige Einbauten im Schildschwanz sind zu vermeiden.

Insbesondere im Hartgestein wird häufig ein Pressendruckring eingesetzt. Bei diesem Konzept muss der Tübbingring im Schildschwanz auf fest eingebaute Leisten abgesetzt werden, bevor der vollständig gebaute Ring an den zuletzt gebauten Ring angeschlossen wird.

3.2 Fugenkonstruktion

Die Vorgaben gelten für einschalige, gedichtete Tübbingsysteme. Für zweischalige Systeme gelten die Vorgaben sinngemäß.

3.2.1 Fugenarten

Für alle Fugen gilt:

- Konzentration der lastübertragenden Kontaktflächen auf die Bereiche, die mittels konstruktiver Bewehrung gesichert sind, d. h., die Flächen (Ecken und Kanten), die mittels konstruktiver Bewehrung nicht gesichert werden können, müssen durch entsprechende geometrische Formgebung (Rücksprünge, Abfasungen) entlastet werden.
- Vermeidung von Kerben und Kerbwirkungen im lastübertragenden Fugenbereich,
- ausreichende Randabstände bei der Anordnung der Dichtungsrahmen zur sicheren Aufnahme der Vorspannkräfte,
- Wird eine lokale Erhöhung der Betondruckfestigkeit entsprechend dem Konzept der Teilflächenpressungen in Ansatz gebracht, sind auftretende Spaltzugkräfte durch konventionelle Bewehrung oder Stahlfaserbewehrung abzudecken.
- Auswirkungen der Herstellungs- und Einbautoleranzen.

a) Längsfugen

Über die Längsfugen werden im Wesentlichen die Ringschnittkräfte infolge der äußeren und inneren Einwirkungen übertragen. Außerdem müssen hier die Vorspannkräfte, die für

die Komprimierung der Dichtungsrahmen erforderlich sind, aufgebracht und gehalten werden.

b) Ringfugen

In den Ringfugen werden die Vortriebslängskräfte zwischen den Ringen und die Koppelkräfte übertragen. Die ungleichmäßige Lasteintragung durch Steuerkräfte bei Richtungskorrekturen der Vortriebsmaschine ist mit in die Bemessung einzubeziehen. Bei der konstruktiven Durchbildung von Ringfugen ist Folgendes besonders zu beachten:

- Berücksichtigung von Fugenzwischenlagen und deren Zusammendrückbarkeit bei der Ringgeometrie.
- Falls die Vortriebspresen im Bereich der Längsfuge zu liegen kommen, muss sichergestellt werden, dass die Pressenschuhe nicht unmittelbar im Längsfugenbereich auf die Fugen einwirken.

3.2.2 Fugenformen

a) Längsfugen

Vier Fugenformen stehen zur Verfügung:

- ebene Fuge,
- Nut-/Feder-Fuge,
- konvex-konvexe Fuge,
- konkav-konvexe Fuge.

Beim einschaligen Tübbingring hat sich die ebene Fuge durchgesetzt. Beim Ringbau kann durch eine Nut-Feder-Konstruktion keine entscheidende Vereinfachung erreicht werden. Eine Bewehrung der Nut-Feder-Elemente ist aufgrund der erforderlichen Betondeckung kaum möglich. Damit ist eine sichere Aufnahme der Koppelkräfte in der Nut-Feder-Konstruktion nicht zu gewährleisten. Es besteht die Gefahr, dass bei Montageungenauigkeiten die Federflanken auf den Nutflanken zu liegen kommen und dass beim Komprimieren des Ringes im Schildschwanz oder beim Verpressen des Ringspalts die Federflanke abreißt. Beim Einsatz von „Guiding Rods“ (in die Längsfuge axial eingelegte Rundstäbe aus Kunststoff) besteht die Gefahr in der Regel nicht, da die Stäbe

bei stärkeren Verschiebungen aufgrund ihrer geringen Festigkeit abscheren.

Bei den ausgerundeten Fugenkonstruktionen können zwar höhere Druckspannungen aufgenommen werden, es kann jedoch nur ein geringes Biegemoment über die Fugen übertragen werden, sodass der Ring insgesamt stärker verformt werden kann. Bei konvex-konvexen Fugen wird der Ringbau zudem erheblich erschwert.

In den Längsfugen werden keine Zwischenlagen vorgesehen.

b) Ringfugen

Folgende Fugenformen stehen zur Verfügung:

- ebene Fuge,
- Nut-/Feder-Fuge,
- ebene Fuge mit zusätzlichen Zentrier- bzw. Koppellelementen wie Topf-Nocke, Dübel oder Zentrierkonus.

Beim einschaligen Ring hat sich für die Ringfugen die ebene Fuge durchgesetzt. Zusätzliche Zentrier- und Koppellelemente können vorgesehen werden. Dies können Dübel, Zentrierkonen, bewehrte oder unbewehrte Topf-Nocke-Verzahnungen sein.

In Topf-Nocke-Koppelstellen können Streifen aus bituminösem Material (z. B. Kaubitstreifen) eingelegt werden, um ein definiertes Kraft-Verformungsverhalten für die Kopplung der Tübbingringe in radialer Richtung zu erzielen. Für eine Übertragung von großen Koppelkräften müssen die Topf-Nocke-Verbindungen bewehrt ausgeführt werden. Um die Wasserdichtigkeit der Konstruktion nicht zu gefährden, ist sicherzustellen, dass bei Überschreitung der Tragfähigkeit der Verbindung die Nocke abscheret, bevor der Topfrand beschädigt wird. Ebenfalls bewährt haben sich dübel- oder kugelartige Koppellelemente aus Kunststoff.

Die Nut-Feder-Ausbildung in der Ringfuge stellt erhöhte Anforderungen an den Ringbau, da sich beim Vorschub im Falle leicht versetzt gebauter Ringe häufig Abplatzungen einstellen. Sie kommt im Wesentlichen nur bei sehr schlechten Untergrundverhältnissen zum Einsatz.

In den Ringfugen sollten zum Ausgleich von Unebenheiten Zwischenlagen aus Hartfasermaterial oder Sperrholz eingebaut werden. Plastisch verformbare Zwischenlagen (z. B. Plättchen aus bituminösem Material) sollten zu diesem Zweck nicht verwendet werden, da sie unter Lasteinwirkung plastisch stark verformt werden und den vorgesehenen Abstand nicht halten können. Es ist auch möglich, auf Zwischenlagen zu verzichten. In diesem Fall ist jedoch auf eine erhöhte Genauigkeit bei der Herstellung der Tübbings zu achten.

Bei planmäßiger Kraftübertragung der Längskräfte ohne Zwischenlagen gelten erhöhte Anforderungen an die Ringfugenebenheit. Bereiche, in denen keine Kraft übertragen werden soll, müssen durch Abfasungen geschützt werden.

3.2.3 Verbindungsmittel

Die Verbindungsmittel in den Fugen werden in der Regel nur während des Ringbaus, insbesondere für die Vorspannung der Kompressionsfugenbänder, und beim Vorschub der Vortriebsmaschine benötigt. Nach Abbinden des Ringspaltmörtels bzw. nach dem Einbau von ca. zehn Ringen wird diese Funktion meist nicht mehr benötigt und die Schrauben können entfernt werden. Bei Verkehrstunnelbauwerken müssen die Schrauben im Bereich über dem Fahrweg entfernt werden, um ein Herausfallen von Schrauben im späteren Betrieb zu verhindern.

Permanent verbleibende Schrauben, zum Beispiel im Bereich der Übergänge zu Ortbetonkonstruktionen und bei Anschlüssen an den Tunnel, müssen gegen Lösen gesichert und gegen Korrosion geschützt sein.

Als temporäre Verbindungsmittel haben sich schräggeführte Schrauben mit Kunststoffdübeln besonders bewährt. Sie lassen sich leicht montieren, stellen eine elastische Verbindung dar und können problemlos wieder ausgebaut werden.

Steckdübelverbindungen in den Ringfugen verkürzen bei exaktem Ringbau die Montagezeiten und vereinfachen die Bewehrungs-

führung, lassen sich jedoch nur schwierig wieder rückbauen. Der Einsatz von Zentrierkonen kann sinnvoll sein.

Bei einigen Projekten (z. B. Nord-Süd-Linie Amsterdam, Metrobus Brescia, Metro C, Rom) wurde auf Verschraubungen verzichtet und die Rückstellkraft für die Dichtrahmen durch zugfeste Dübelverbindungen sichergestellt.

In den Längsfugen können eingesetzte Längsstäbe/Führungstangen („Guiding Rods“) ein gegenseitiges Verrutschen der Tübbings beim Ringbau verhindern.

3.3 Befestigungen im Tübbingring

Beim zweischaligen Tunnelausbau werden eventuell erforderliche Befestigungen (z. B. für die Oberleitung oder Signale) in der Ortbetoninnenschale eingebaut. Für den Tübbingring sind keine besonderen Einbauteile erforderlich.

Beim einschaligen Ausbau müssen spätere Befestigungsmöglichkeiten bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden.

Grundsätzlich stehen folgende Befestigungsmöglichkeiten zur Verfügung:

- Einbau von Ankerschienen (Einlegen in die Tübbingschalung),
- Einbau von Befestigungsplatten aus Stahl (Einlegen in die Tübbingschalung),
- nachträgliches Andübeln der Befestigungen.

Beim Einbau von Ankerschienen oder Befestigungsplatten ist darauf zu achten, dass die vorgesehene Position im Tunnel sichergestellt wird. Insbesondere bei keilförmigen, verdrehbar einzubauenenden Ringen muss die Verankerung rundum eingebaut oder beim Ringbau eine vorher festgelegte Ringposition vorgesehen werden. Auf die erforderlichen Randabstände (zu den Ring- und Längsfugen) ist Rücksicht zu nehmen.

Bei der Planung ist darauf zu achten, dass die Befestigungen in einem auf die Ringbreite abgestimmten Abstand erfolgen. Bei Änderungen der zu befestigenden Bauteile nach Einbau der be-

treffenden Tübbingringe muss auf die vorhandenen Einbauteile Rücksicht genommen werden. Die Lage der Ankerschienen oder Befestigungsplatten beeinflusst in der Regel auch die Geometrie der Saugplatte des Erektors.

Beim späteren Andübeln der Befestigungen kann flexibler auf die Belange der Ausrüster bezüglich der erforderlichen Einbauteile eingegangen werden. Um zu verhindern, dass beim Bohren der Dübel die Tübbingbewehrung getroffen und durchtrennt wird, sind Dübelgassen festzulegen und auf die Bewehrung abzustimmen. Dübelgassen müssen auf der Tübbinginnenoberfläche gekennzeichnet oder die Dübel mit Hilfe von Bohrschablonen gebohrt werden.

Zu berücksichtigen ist bei allen Befestigungen die spätere Prüfbarkeit bei Bauwerksprüfungen. Bei Straßentunneln stellt die Chloridbelastung ein großes Problem dar, die diesbezüglichen Materialvorgaben sind zu beachten. Bei großen Lasten, z. B. Lüftern, kann auch eine Befestigung direkt im Gebirge in Betracht gezogen werden, der Tübbingausbau wird in diesem Fall perforiert („Knopfloch“). Allerdings ist diese Art der Ausführung nur bei relativ gutmütigen hydrogeologischen Verhältnissen möglich.

3.4 Herstelltoleranzen

3.4.1 Grundsatzüberlegungen

Bei den Konstruktionstoleranzen handelt es sich um Herstelltoleranzen des Einzeltübbings und des Tübbingringes. Auffahrtoleranzen der Vortriebsmaschine, Einbautoleranzen des Tübbingringes in der Vortriebsmaschine sowie Verformungen des Tübbingringes beim Vortrieb und danach müssen gesondert betrachtet werden.

Toleranzvorgaben dienen der Begrenzung von Maßabweichungen gegenüber der planmäßigen Tübbinggeometrie. Abweichungen können nur in einem solchen Ausmaß zugelassen werden, in dem Schäden durch Spannungsspitzen im Tübbing und Undichtigkeiten aufgrund zu geringer Kompression der Dichtprofile hinreichend unwahrscheinlich sind.

In diesem Sinne ist die zulässige Größe der Maßabweichungen tatsächlich von verschiedenen Faktoren abhängig:

- Beanspruchungsniveau bei planmäßiger Geometrie,
- Ausnutzungsgrad und Verformungscharakteristik des Dichtprofils,
- Tübbinghauptabmessungen (Länge, Breite, Dicke, Radius).

Die vertraglich vorzugebenden Toleranzen spezifizieren die zulässigen Abweichungen der hergestellten Tübbings von der Sollgeometrie.

Abweichungen von der Sollgeometrie können nur akzeptiert werden, wenn dadurch keine Schäden aufgrund nicht berücksichtigter Einwirkungen auftreten und die Wasserdichtigkeit des Ringes nicht eingeschränkt ist.

Gründe für die strengen Toleranzanforderungen sind:

- geometrische Empfindlichkeit gegenüber Ungenauigkeiten und Verdrehungen einzelner Tübbings,
- hohe Lasteinwirkungen aus Erd-, Wasser- und Verpressdruck auf den Tübbingring,
- Pressenkräfte während des Vortriebs,
- Lastübertragung nur in begrenzten Flächen (Teilflächenbelastung).
- Beschädigungen nicht immer erkennbar (z. B. an Ringaußenseite).
- kostspielige und zeitaufwändige Sanierung von beschädigten Tübbings.

3.4.2 Messungen zur Feststellung der Toleranzeinhaltung

Zur Feststellung der Einhaltung der Herstelltoleranzen sind zusätzlich zu den notwendigen Messungen am Einzeltübbing auch Messungen am kompletten Tübbingring sinnvoll. Die Messhäufigkeit und die Art der Messungen müssen im Bauvertrag festgelegt werden. Die Messergebnisse sind an den Auftraggeber zu übergeben. Im Bauvertrag sollte der Messort (z. B. überdachte Halle mit Temperaturen zwischen 15 und 20 °C) vorgegeben werden.

Wenn bei einer Messung Herstelltoleranzen überschritten sind, müssen alle nach der letzten Messung (mit eingehaltenen Toleranzen) produzierten Tübbings rückschreitend nachgemessen werden. Alle Tübbings innerhalb der Toleranzen sind zu akzeptieren, alle Tübbings mit Toleranzüberschreitung müssen gesondert betrachtet werden.

Bei der Erstabnahme der Schalungen werden aus allen Formen Tübbings produziert und dreidimensional vermessen. Die Pass-

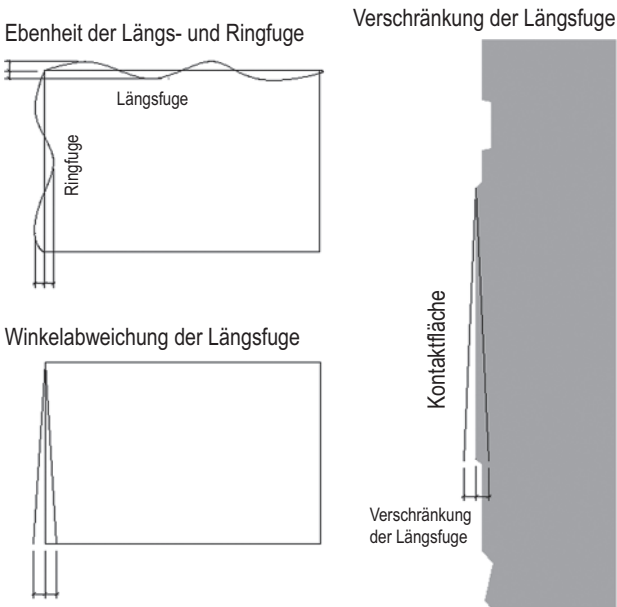


Bild 2. Herstelltoleranzen am gefertigten Tübbing einschaliger Konstruktionen

form der Ringfuge kann durch den Aufbau zweier Ringe (ohne eingebauten Dichtungsrahmen) übereinander geprüft werden.

Eine Ringdurchmesser- und -umfangsmessung am oberen Ring ist nicht sinnvoll, weil der obere Ring nur relativ ungenau aufgebaut werden kann.

Nach Produktionsstart sollte der 50. produzierte Ring aus jeder Schalungsform nachgemessen werden. Die nächsten Messungen sollten nach jeweils 100 Belegungen durchgeführt werden, soweit im Bauvertrag nichts anderes geregelt ist.

3.4.3 Toleranzforderungen

Die Herstelltoleranzen (Bild 2) werden für Ringinnendurchmesser $\leq 8,0$ m und $\geq 11,0$ m vorgegeben. Für die Durchmesser zwischen 8,0 und 11,0 m können die Toleranzwerte linear interpoliert und auf volle 1/10 mm aufgerundet werden (Tabelle 1).

Beim Einbau der Tübbings in der Vortriebsmaschine und im Zuge des Vortriebs der ersten ca. zehn Ringe treten häufig Abweichungen von der Solllage des Tübbingringes auf. Zu beachten ist dabei unter anderem die Ovalisierung des Ringes, das Aufschwimmen der Sohlsegmente und das Entstehen von Versätzen zwischen den Einzelsegmenten.

Die Einbautoleranzen hängen von der späteren Verwendung des Tunnels (erforderliches Lichtraumprofil) und vom Tübbingdesign ab und müssen vom Planer in Abstimmung mit dem Auftraggeber für jedes Projekt individuell vorgegeben werden.

Für den Fugenversatz sollten maximal 10 mm zugelassen werden. Die zulässige Ovalisierung des Ringes hängt stark vom Durchmesser und der Anzahl der Einzelsegmente pro Ring ab, sollte aber in jedem Fall kleiner als 0,5 % des Innendurchmessers sein.

Sämtliche Toleranzmasse, einschließlich der Auffahrtoleranz, muss in Summe so begrenzt werden, dass das geforderte Lichtraumprofil immer eingehalten wird.

3.4.4 Überschreitung der Herstelltoleranzen

Ist die Beanspruchung planmäßig gering, kann eine Zusatzbeanspruchung infolge von Maßabweichungen grundsätzlich eher schadlos aufgenommen werden als bei einem sowieso schon hohen Ausnutzungsgrad des Tübbings. Gleiches gilt hinsichtlich der Dichtigkeit: Ein planmäßig stärker als erforderlich zusammengedrücktes Dichtprofil ist gegebenenfalls auch noch dann gegenüber dem anstehenden Wasserdruck dicht, wenn es infolge von Maßabweichungen weniger komprimiert wird.

Sind bereits Tübbings außerhalb der Toleranzforderungen produziert, können diese eingesetzt werden, wenn die Verträglichkeit nachgewiesen werden kann. Mögliche Maßnahmen bei Überschreitung der zulässigen Toleranzen werden im Folgenden beschrieben.

Bei Überschreitung der Tübbingbreitentoleranz

Falls die Ringspiegelfläche aufgrund einer Überschreitung der Tübbingbreitentoleranz keine korrekte Ebene ergibt, können die Tübbings u. U. in Bereichen mit voraussichtlich geringen Vortriebskräften verwendet werden. Hierfür muss ein statischer Nachweis geführt werden.

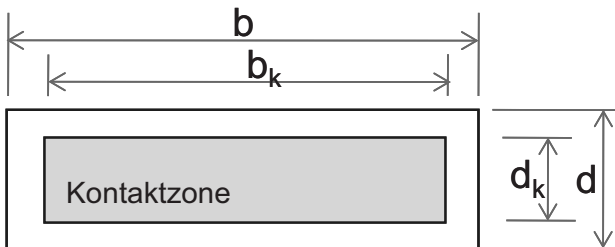


Bild 3. Planmäßige Kontaktzone in der Längsfuge

44 Tabelle 1. Toleranzen am Einzeltübbing und am gesamten Tübbingring

Nr.	Herstelltoleranz	Ringgröße (Innendurchmesser)	
		≤ 8,0m	≥ 11,0 m
1. Längsfugentoleranz bezogen auf die Kraftübertragungsfläche:			
1.1	Längsfugenverschränkung	± 0,3 mm	± 0,5 mm
1.2	Winkelabweichung der Längsfuge	± 0,5 mm	± 0,7 mm
1.3	Additionsregel für 1.1 und 1.2:	± 0,6 mm	± 0,9 mm
2. Abweichungen Gesamttübbing (bezogen auf die Mittelebene)			
2.1	Tübbingbreite	± 0,5 mm	± 0,7 mm
2.2	Tübbingdicke	± 3,0 mm	± 4,0 mm
2.3	Tübbingbogenlänge	± 0,6 mm	± 0,7 mm
2.4	Innenradius jedes Tüblings	± 1,5 mm	± 2,5 mm
2.5	Differenz der Diagonalenlänge eines Tüblings zur Solllänge	± 1,0 mm	± 2,0 mm
2.6	Vertikaler Abstand der vierten Tübbingecke von der Ebene, die von den drei anderen Ecken gebildet wird	± 5 mm	± 8 mm
3. Dichtungsnut			
3.1	Dichtungsnutbreite	± 0,2 mm	± 0,2 mm

Tabelle 1. (Fortsetzung)

Nr.	Herstelltoleranz	Ringgröße (Innendurchmesser)	
		≤ 8,0m	≥ 11,0 m
3.2	Dichtungnuttiefe	± 0,2 mm	± 0,2 mm
3.3	Lage der Dichtungsnutachse	± 1,0 mm	± 1,0 mm
4.	Ebeneheit der Kontaktzonen		
4.1	Längs- und Ringfuge	± 0,3 mm	± 0,5 mm
5.	Toleranzen am gesamten Tübbingring		
5.1	Außendurchmesser	± 10 mm	± 15 mm
5.2	Innendurchmesser	± 10 mm	± 15 mm
5.3	Außenumfang (in drei Höhen gemessen)	± 30 mm	± 45 mm
6.	Lage der Einbauteile		
6.1	Erektorkonen	± 2 mm	± 2 mm
6.2	Schraubentaschen und -durchführungen	± 1 mm	± 1 mm

*Bei Überschreitung des Winkels der Längsfugenkonizität/
Längsfugenverschränkung*

Bei Öffnung der Kraftübertragungsflächen in der Längsfuge durch Toleranzmaßüberschreitung des Längsfugenverschränkungswinkels wird durch die vorhandene Ringnormalkraft die Kraftübertragungsfläche überdrückt, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Die Ringnormalkraft wird dann über einen kleineren Bereich übertragen, der dementsprechend höher belastet wird. Auch hier bietet es sich an, die nicht korrekten Tübbings in Bereichen mit geringerer Belastung einzubauen. Die Spaltzugbewehrung muss auf die höhere Spannung bemessen werden.

Berechnung der Kontaktzonenverformung unter äußerer Belastung

Die Kontaktzone benachbarter Tübbings kann durch Berechnung der Verformungen nachgewiesen werden (Bild 3).

Verformungen in teilweise überdrückten Längsfugen:

- b Tübbingbreite
- b_k Breite der Kontaktfläche
- d Tübbingdicke
- d_k Dicke der Kontaktfläche
- l Tübbinglänge
- α Öffnungswinkel der nicht korrekten Längsfuge vor Aufbringung der Belastung
- N Ringnormalkraft
- E Beton-E-Modul (tatsächlich gemessener E-Modul nach ≥ 28 Tagen)
- x Breite der verformten Längsfuge

Mögliche Gelenkverdrehungen nach dem Einbau und der Lastwirkung sind realitätsnah abzuschätzen und in der Berechnung zu berücksichtigen.

Anstelle eines linearen Spannungsverlaufs in beiden Richtungen x und d kann von einem nichtlinearen Spannungsblock ausgegangen werden. Die Resultierende des Blocks muss in beiden Richtungen mit der Resultierenden der Spannungsdreiecke übereinstimmen. Nachweisführung (Bild 4):

Vor Lastaufbringung

Nach Lastaufbringung

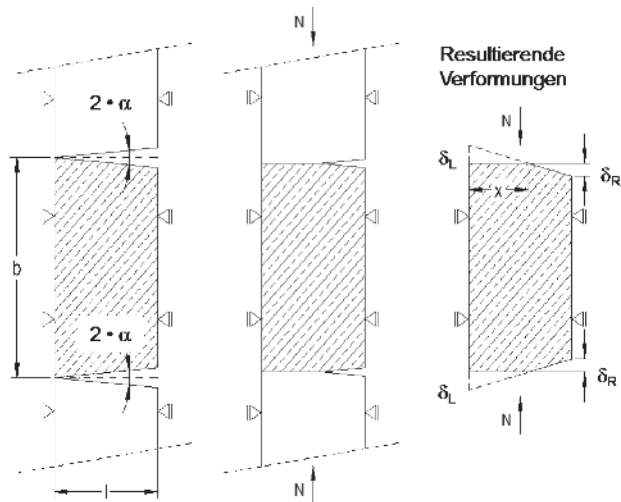


Bild 4. Überdrückte Längsfugen

- 1) $\delta_L = \tan \alpha \cdot x$; $x = \delta_L / \tan \alpha$
- 2) $\delta_L = N \cdot l / (E \cdot x \cdot d)$
- 3) $\delta_L = [N \cdot l \cdot \tan \alpha / (E \cdot d)]^{1/2}$ (1) in (2)
- 4) $\sigma_L = 2 \cdot N / (x \cdot d)$
- 5) $\sigma_{LK} = \sigma_L \cdot d / d_K \cdot b / b_K$
- 6) $\sigma_{LK} \cdot \gamma_F < \sigma_{Rdu}$ (s. Kapitel 5.6.1)

Nachbarschaftsbeziehungen

Eine Möglichkeit, Toleranzmaßüberschreitungen auszugleichen, besteht darin, die Tübbings so zu sortieren, dass sich Toleranzmaßüberschreitungen benachbarter Tübbings jeweils ausgleichen.

Hierfür ist ein erheblicher Aufwand für das Sortieren der Tübbings im Tübbinglager und für den Transport in die Vortriebsmaschine

erforderlich. Diese Möglichkeit schränkt die Kombinierbarkeit verschiedener Tübbings stark ein und muss deshalb vom Bauherrn genehmigt werden.

Wenn die ausführende Firma eine sichere Logistikkette nachweisen kann, ist diese Kombinationsmöglichkeit jedoch möglich. Ein Datenerfassungssystem für die gelagerten Tübbings ist hierfür unbedingt erforderlich.

3.5 Hinweise für die Bemessung

3.5.1 Betondeckung

An den Oberflächen ist eine Mindestbetondeckung $c_{\min} = 40$ mm einzuhalten, an den Stirnflächen und in lokalen Bereichen (z. B. Schraubenkanäle) ist die Mindestbetondeckung $c_{\min, \text{red}} = 20$ mm.

Das Vorhaltemaß der Betondeckung Δc ist abhängig von den Herstellungsbedingungen und der Qualitätsüberwachung festzulegen. Als Richtwert ist $\Delta c = 5$ mm anzunehmen.

Eine Erhöhung der Betondeckung kann aus Gründen der Dauerhaftigkeit erforderlich werden (Expositionsklassen gemäß DIN EN 1992-1-2 [7]). Eine erhöhte Betondeckung sollte vom Entwurfsverfasser aufgrund der damit verbundenen konstruktiven Nachteile (u. A.: geringere statische Nutzhöhe, schlechtere Einfassung der Spaltzugkräfte) sorgfältig abgewogen und alternative Maßnahmen überprüft werden.

3.5.2 Bewehrungsabstand

Übliche Bewehrungsraster liegen in der Größenordnung zwischen 100 und 150 mm. Größere Stababstände sind möglich, wirken sich aber negativ auf die rechnerische Rissweite aus. Nach dem Einheben des Bewehrungskorbes in die Schalung muss es möglich sein, örtlich durch die oberen Stahllagen durchgreifen zu können, um Einbauteile in der Schalung zu fixieren. Dazu sind lichte Öffnungen im Bewehrungskorb von mindestens 90 mm · 120 mm vorzusehen.

3.5.3 Mindestbewehrung

Als Mindestbewehrung für die Tübbings wird im Allgemeinen eine Netzbewehrung $d = 10 \text{ mm}$, $a = 150 \text{ mm}$ empfohlen.

Die ZTV-ING für Straßentunnel [3] fordert im Teil 5 darüber hinausgehend eine Mindestbewehrung von $d = 10 \text{ mm}$, $a = 100 \text{ mm}$ an allen Oberflächen der Tübbings.

In der Ril 853.4005 [1] wird für Bahntunnel eine Oberflächenbewehrung von mindestens 0,15 % je Richtung auf allen Oberflächen gefordert. Für Tübbingdicken von 35 cm entspricht dies der im ersten Absatz genannten Forderung.

4 Abdichtung der Tübbingfugen

4.1 Grundlagen

Nachstehende Ausführungen gelten für den einschaligen Ausbau, bei dem die Dichtfunktion allein der Tübbingschale zugewiesen wird. Bei einem zweischaligen Ausbau wird die Dichtfunktion ganz von der Innenschale oder von einer Kunststoffdichtungsbahn übernommen, woraus sich andere bzw. gar keine Anforderungen an die Dichtigkeit der Außenschale ergeben.

Die Dichtigkeit der aus Stahlbetonfertigteilen zusammengesetzten Tunnelauskleidung wird nahezu ausschließlich durch die Dichtigkeit der Fugen bestimmt. Regellösung zur Abdichtung der Tübbingfugen sind umlaufend auf den Stirnflächen angeordnete Dichtungsprofile aus EPDM. Bei der Montage der Tübbings werden die Dichtungsprofile benachbarter Tübbings paarweise gegeneinander und zugleich auf ihre Kontaktflächen mit dem Beton gedrückt. Durch eine geeignete Formgebung der Tübbingstirnflächen in Verbindung mit einem für die jeweilige Aufgabe konzipierten Dichtungsprofil soll erreicht werden, dass nach der Fertigstellung der Tübbingschale alle Fugen lückenlos verschlossen sind. Die Lückenlosigkeit ist selbstverständliche Voraussetzung jeder Dichtungsmaßnahme. Da die Dichtwirkung der nicht mit dem Beton verbundenen und auch nicht miteinander verschweißten

EPDM-Profile allein auf Kontaktdruck beruht, muss ein solcher in der für den aufzunehmenden Wasserdruck erforderlichen Größe unbedingt durchgängig überall am Tübbingumfang vorhanden sein. Dies gilt sowohl für die beiden Betonnuten als auch für die Fuge zwischen den Dichtungsprofilen.

Alle maßgebenden Komponenten des Abdichtungsdesigns müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass die gestellte Dichtungsaufgabe bei Einhaltung der definierten Einbautoleranzen erfüllt wird.

4.2 Wahl des Dichtungsprofils

Wo immer möglich, wird man auf bereits bewährte Dichtungsprofile der verschiedenen Hersteller zurückgreifen. Auf diese Weise lassen sich die Kosten für Entwicklung, Prüfung und Zulassung sparen, und zugleich besteht von Anfang an Kosten- und Planungssicherheit.

Die Entwicklung von Dichtungsprofilen liegt im Aufgabenbereich der Hersteller. Hierbei wird aber im Regelfall ein mehrfacher Iterationsprozess unter Einbeziehung der übrigen Projektbeteiligten Baufirma, Planer, Bauherr mit seinen Sachverständigen, Prüfingenieur, Prüfinstitute und Materialprüfanstalten durchlaufen.

Formgebung und Vulkanisation der Dichtungsprofile aus EPDM-Kunstkautschuk finden beim Extrudieren statt. Die geradlinig hergestellten Profile werden zugeschnitten und in einem weiteren Vulkanisationsvorgang unter Hinzufügung von Eckformteilen zum Dichtungsrahmen zusammengesetzt. Die Zulassung des Dichtungsprofils für das betreffende Projekt erfolgt nach erfolgreicher Durchführung der verlangten Prüfungen.

Dichtungsprofile sollten nach dem planmäßigen Komprimieren noch einen verbleibenden Hohlraumanteil, auch in den Rahmenecken, von ca. 10 % aufweisen. Dieser Anteil ist auf zahlreiche langgestreckte, voneinander getrennte Kammern verteilt, die bei der Profilextrusion angelegt wurden. Die elastischen Eigenschaften der Dichtungsprofile beruhen überwiegend auf der Verformung der zwischen den Hohlräumen verbliebenen Rippen

unter gleichzeitiger Verringerung des Hohlraumvolumens. Sobald die Hohlräume vollständig zusammengedrückt sind, steigt die Steifigkeit des Profils sprunghaft an und es entstehen hohe Spreizkräfte. Dieser Zustand liegt außerhalb des regulären Anwendungsbereichs und darf am Bauwerk wegen der damit einhergehenden Tübbingschäden nicht auftreten.

Dichtungsprofile, die bereits in die Schalung eingelegt und mit Fußankern in den Tübbing einbetoniert werden, wurden bereits bei einzelnen Projekten eingesetzt, müssen sich baupraktisch aber noch bewähren. Möglicherweise ist dies ein Weg zur Vereinfachung der Dichtungsbandbefestigung und verbesserten Abdichtung.

4.3 Wirkungsweise der Tübbingdichtung

An der fertigen Tübbingröhre gibt es im System der Fugendichtung folgende mögliche Undichtigkeiten:

- Kontaktfläche zwischen Dichtungsnut und Dichtprofil,
- Kontaktfläche zwischen einander gegenüberliegenden Dichtprofilen,
- Stoß zwischen verschiedenen Dichtrahmen an Tübbingecken.

Durch das Zusammendrücken der Dichtungsprofile beim Ringbau muss sowohl die Kontinuität der Dichtung hergestellt als auch eine Kontaktspannung an allen potenziellen Wasserwegigkeiten erreicht werden, die sicherstellt, dass der prognostizierte Wasserdruck gehalten werden kann. Dieses Ziel gilt nicht nur für den Idealfall der absolut korrekten Qualität und Geometrie, sondern auch für alle in der Produktion der Bauteile und bei der Montage zu erwartenden Abweichungen. Dies sind vor allem:

- Maßtoleranzen der Tübbings einschließlich Dichtungsnut,
- Nutgrund: Rissefreiheit, Lunker- und Porenfreiheit, keine Betonester,
- Ringbautoleranzen und Ringverformungen,
- Maßtoleranzen des Dichtungsprofils und -rahmens,
- Gewichts- bzw. Steifigkeitstoleranzen des Dichtungsprofils,
- abweichendes mechanisches Verhalten der Rahmenecken,

- Höhengsprung infolge Längsversatz benachbarter Dichtungsrahmenecken,
- unplanmäßige Dehnungen und Stauchungen sowie Loslösung aus der Dichtungsnut beim Ringbau,
- exzentrischer Kontakt der Dichtungsprofile (Querversatz),
- unvollständiges Zusammendrücken der Dichtungsprofile.

Von diesen möglichen Abweichungen werden bei der Dichtigkeitsprüfung gemäß STUVA-Empfehlung [62] bzw. TL/TP-DP [42] nur die beiden letztgenannten systematisch nachgebildet. Ansonsten wird von der Einhaltung der Toleranzen ausgegangen. Der mögliche Einfluss aller verbleibenden Abweichungen und der Einfluss der Relaxation des Dichtungsprofils wird letztlich pauschal dadurch abgedeckt, dass der Prüfdruck höher angesetzt wird als der tatsächlich aufzunehmende Wasserdruck.

4.4 Übliche Prüfungen an Dichtungsprofilen

Bezüglich der Anforderungen an den Dichtungsrahmen bzw. das Dichtungsprofil verweist die für Straßentunnel geltende ZTV-ING, Teil 5 [3], im Abschnitt 3 unter 8.2.2 auf die TL/TP DP der BASt [42]. Die für Eisenbahntunnel geltende Ril 853 [1] schließt sich im Modul 4005 unter (13) dieser Vorschrift an. Mithin sind alle Angaben zu Anforderungen und Prüfungen einheitlich der TL/TP DP zu entnehmen. Bezüglich der Details wird hierauf verwiesen.

Nachstehend wird auf einige besondere Aspekte der wichtigsten Prüfungen eingegangen:

Als minimaler Nutgrundabstand wird der Abstand zwischen den tiefsten Stellen zweier einander gegenüberliegender Dichtungsnuten bezeichnet, wenn die zugehörigen Tübbings kraftschlüssig bis zum Betonkontakt bzw. bis zur maximalen Kompression der Zwischenlage gegeneinander gedrückt sind. In dieser Position werden die stärkste Kompression und damit auch die größte Rückstellkraft des Dichtungsprofils erreicht.

Das Kraft-Weg-Verhalten eines Dichtungsprofils wird an zwei 200 mm langen Stücken in ebenso langen stählernen Nutformen

entsprechend der Betonnut des Tübbings geprüft. Der Versuch reicht von der ersten Verformung bis zum minimalen Nutgrundabstand des realen Tübbings, ggfs. auch bis zum Stahlflächenkontakt der Nutform. Die Versuche werden in der Regel in einer Materialprüfungsanstalt durchgeführt, völlig unabhängig von den Dichtigkeitsversuchen. Die unterschiedlichen Apparaturen und die als Bezug verwendeten Nutgrundabstände sind bei der Ergebnisauswertung zu beachten.

Dichtigkeitsversuche können an Stahl- oder Betonprüfkörpern durchgeführt werden. Dabei ist die Arbeit mit Betonprüfkörpern aufwändig und störanfällig, sodass praktisch nur noch Versuche an Stahlprüfkörpern vorgenommen werden. Geometrisch wird im Labor die Situation an einem T-Stoß nachgebildet, wobei wie an der Ringfuge ein gerades Stück Dichtungsprofil gegen das Ende einer Längsfuge gepresst wird.

In mehreren Versuchsreihen mit jeweils einem bestimmten Versatzmaß wird die Dichtigkeit für verschiedene Nutgrundabstände mit stufenweise ansteigendem Wasserdruck geprüft. Maßgebend ist schließlich das Ergebnis der den gestellten Forderungen entsprechenden Versuchskonstellation. Diese Anforderungen sind nicht verbindlich geregelt, sondern können projektbezogen definiert werden.

Eine hinreichende Dichtigkeit wird am ehesten erreicht, wenn die Dichtungsprofile ohne Versatz auf den kleinsten möglichen Nutgrundabstand zusammengedrückt werden. Dieser Fall ist aber praxisfremd und wird daher im Regelfall nicht untersucht.

4.5 Verschraubung

Beim Einsatz von Kompressionsfugenbändern ist im Regelfall eine temporäre Verschraubung oder Verdübelung der Ring- und Längsfugen, von der Montage der Tübbings bis zum Aushärten des Ringspaltmörtels, erforderlich (s. 3.2.3). Die Verschraubung/Verdübelung muss benachbarte Tübbings gegen die Rückstellkraft des Dichtungsprofils gegenseitig verspannen.

4.6 Betonabplatzungen neben der Dichtungsnut

Bei der Tübbingkonstruktion ist darauf zu achten, dass ein ausreichender Abstand vom äußeren Rand der Dichtungsnut zur Tübbingaußenkante eingeplant wird (je nach Rückstellkraft 40 bis 50 mm).

Beim rechnerischen Nachweis der Sicherheit gegen Abplatzungen des Betons neben der Dichtungsnut wird üblicherweise die beim minimalen Nutgrundabstand entstehende Spannung im Dichtungsprofil als Belastung der Nutflanke angesetzt. Hierbei ergibt sich im Regelfall eine ausreichende Sicherheit.

Ein in der TL/TP DP geforderter Laborversuch an Betonprüfkörpern führt dagegen regelmäßig zum Versagen. Das liegt teils an der Prüfapparatur, teils an extrem ungünstigen Prüfbedingungen. Zur Abdeckung der Summe verschiedener möglicher Toleranzmaßüberschreitungen wird das Dichtungsprofil noch stärker komprimiert als bei der Prüfung des Kraft-Weg-Verhaltens. Solche Versuche sind unrealistisch und sollten bei der Eignungsprüfung des Dichtungsprofils unberücksichtigt bleiben.

Die DB hat in der Ril 853 beim Bezug auf die TL/TP DP den Abplatzversuch bereits ausdrücklich ausgenommen.

4.7 Maß- und Gewichtstoleranzen des Dichtungsprofils

Die Einhaltung der für die Geometrie der extrudierten Profile üblichen Herstellungstoleranzen reicht häufig nicht aus, um konstantes Bauteilverhalten zu gewährleisten. Entscheidend sind Schwankungen des Füllungsgrades bzw. Hohlraumanteils, die sich in deutlichen Unterschieden des Verformungsverhaltens und damit der Rückstellkräfte auswirken. Als wirkungsvolle Kontrollmöglichkeit hat sich das Wiegen des Dichtungsprofils herausgestellt. Dieses ist sowohl bei der Produktion im Rahmen regelmäßiger Qualitätskontrollen als auch bei der Durchführung von Dichtigkeits- und Kraft-Weg-Versuchen vorzunehmen.

4.8 Langzeitverhalten des Dichtungsprofils

Zur langfristigen Sicherstellung der beim Bau erreichten Dichtigkeit müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

- Materialbeständigkeit des Dichtungsprofils und
- Erhaltung der mindestens erforderlichen Kompression.

Die durchzuführenden Versuche sind in der TL/TP DP aufgeführt. Allerdings fehlen hier Erläuterungen zum Stellenwert der einzelnen Tests bei der Langzeitprognose. Letztlich müssen die Versuche eine Extrapolation auf das Ende der vorgesehenen Nutzungsdauer von zum Beispiel 100 Jahren ermöglichen. Hier besteht noch Forschungs- und Regelungsbedarf. Als gängige Praxis hat sich etabliert, die Dichtigkeit im Kurzzeitversuch für einen mit dem Faktor 2,0 erhöhten Wasserdruck nachzuweisen.

4.9 Rahmenecken

Rahmenecken stellen in der montierten Tübbingschale immer die kritische Stelle dar. Sowohl das Risiko von Undichtigkeiten als auch das von Abplatzungen ist hier im Vergleich zu einer beliebigen Stelle zwischen den Ecken größer. Die Schwierigkeit bei der Ausschaltung dieser Risiken ist, dass die geeigneten Maßnahmen einander zuwiderlaufen. Gegen Undichtigkeit hilft in der Tendenz eine besonders starke, gegen Abplatzungen eine möglichst geringe Kompression. Bei der Gestaltung der Rahmenecken ist zu berücksichtigen, dass durch den Vulkanisierungsvorgang beim Einfügen der Eckstücke leicht Material in die Hohlräume des extrudierten Profils gelangen kann, wodurch dieses lokal unplanmäßig steifer wird. Hinzu kommt, dass es an den Tübbingecken montagebedingt meistens einen gewissen Materialüberschuss gibt, der ebenfalls die erzeugte Rückstellkraft erhöht. In der TL/TP DP wird das Kraft-Weg-Verhalten der Rahmenecke gesondert abgefragt, mit dem Zusatz „Verhärtung“. Allerdings werden keine Anforderungen genannt. Sollen die Rückstellkräfte diejenigen des Dichtungsprofils nicht übersteigen, muss das Eckstück anders gestaltet sein als das Normalprofil. Es kann sogar kammförmig ausgebildet oder mit Öffnungen versehen sein.

4.10 Dichtigkeitsanforderungen

Ein vollständig dichter Tunnel ist beim einschaligen Tübbingring nicht erreichbar. Auch wenn vom Bauherrn in der Regel ein dichter Tunnel gefordert wird und der Auftragnehmer im Falle von Undichtigkeiten zur Nachbesserung verpflichtet ist, muss mit geringfügigen Restwassermengen gerechnet werden. Ohne hiermit den grundsätzlichen Anspruch auf Dichtigkeit aufzugeben, sollten für diesen Fall Regelungen im Bauvertrag formuliert werden. Hierbei ist zwischen Einzelzutritten und dem Gesamtwasseranfall über größere Tunnelstrecken, aber auch nach dem Ort des Wasseraustritts zu unterscheiden. Zu regeln sind sowohl die zulässigen Restwassermengen als auch die Maßnahmen zur Nachdichtung und zur Abführung.

Rinnende oder tropfende Wasserzutritte sind in Verkehrstunneln im Regelfall nicht zugelassen. In Tunneln des Schienenverkehrs muss ein Abtropfen auf stromführende Einbauten unbedingt verhindert werden.

Der Planer hat bei der Konstruktion davon auszugehen, dass ein weitestgehend dichter Tunnel hergestellt wird. Trotzdem sind konstruktive Möglichkeiten vorzusehen, um Tropfwasser ggf. problemlos ableiten zu können. Hierzu dient zum Beispiel eine schwalbenschwanzförmige Nachdichtungsnut auf der Ringinnenseite.

Über den Zutritt von Restwassermengen hinaus wird zudem bei befahrenen Tunneln Schleppwasser eingetragen und im Brandfall Löschwasser abzuführen sein. Bei längeren Tunneln kann es im Sommer zu erheblicher Tauwasserbildung kommen. Eine Entwässerungsleitung mit Revisionsschächten sollte zumindest bei Verkehrstunnelbauwerken immer vorgesehen werden.

5 Tragwerksplanung

5.1 Baugrundeigenschaften (Geologie, Hydrologie)

Die geotechnischen Untersuchungen sind generell auf Basis der DIN 4020 [23] durchzuführen. Die Festlegung charakteristischer

Tabelle 2. Erforderliche geotechnische Kenngrößen für die statischen Berechnungen

Stabzugberechnung		Scheibenberechnung (Mohr-Coulomb)		Scheibenberechnung (Hardening-Soil)	
Stiefemodul	E_s	Elastizitätsmodul	E	Referenzstiefemodul	$E_{s,ref}$
Wichte	g/g'	Querdehnzahl	n	Referenztriaxialmodul	$E_{50,ref}$
Seitendruckbeiwert	k_0	Wichte	g/g'	Ent-/ Wiederbelastungsmodul	E_{ur}
Wasserdruck	p_w	Reibungswinkel	w	Referenzspannung	s_{ref}
		Kohäsion	c	Stiefigkeitsexponent	m
		Dilatanzwinkel	c	Querdehnzahl	n
		Zugfestigkeit	f_t	Wichte	g/g'
		Wasserdruck	p_w	Reibungswinkel	w
		Seitendruckbeiwert	k_0	Kohäsion	c
				Dilatanzwinkel	c
		Erforderlichenfalls:		Zugfestigkeit	f_t
		felsmech. Parameter		Wasserdruck	p_w
				Seitendruckbeiwert	k_0
				Bruchfaktor	R_f

Werte, die Darstellung und die Bewertung der geotechnischen Untersuchungsergebnisse sowie die Folgerungen, Empfehlungen und Hinweise sollten bereits im frühen Planungsstadium auf das (voraussichtliche) spätere Tübbingsystem abgestimmt werden.

Da der Tübbingring kurz nach dem Einbau bereits seine endgültige Steifigkeit besitzt, sind Gebirgsverformungen weitgehend auf den Bereich der Ortsbrust und der Vortriebsmaschine beschränkt. Lastumlagerungen in das Gebirge um den Tunnel sind beim Tübbingausbau, anders als bei der Spritzbetonbauweise, höchstens im geringen Umfang ansetzbar. Für Tunnel im Festgestein mit hoher Gebirgsauflast und für Systeme mit Perlkiesverblasung als Ersatz für die Ringspaltvermörtelung müssen für jeden Einzelfall spezielle Ansätze getroffen werden.

Beim maschinellen Vortrieb mit Tübbingausbau ist eine umfangreiche Baugrunderkundung vor Beginn der Ausführungsplanung von großer Wichtigkeit, da beim späteren Vortrieb die Tübbingdicke nicht mehr an veränderte Einwirkungen angepasst werden kann.

In Tabelle 2 sind einige wesentliche, für die Berechnungen erforderliche geotechnische Kenngrößen zusammengestellt. Sie sind für alle zu erwartenden Baugrundarten zu bestimmen und ggf. projektspezifisch zu ergänzen.

Die zu erwartenden Baugrundverhältnisse werden zweckmäßigerweise in einem geotechnischen Längsschnitt dargestellt und entsprechenden Vortriebs-/Auskleidungsklassen zugeordnet.

Werden die Ringe mit Verpressmörtel hinterpresst, wird der Tübbingring sofort durch den Ringspaltmörtel unter dem angesetzten Verpressdruck gegen das Gebirge vorgespannt. Auch auf den Endzustand wirkt die Ringspaltverpressung positiv und kann ggf. in Form einer verbesserten Ringbettung berücksichtigt werden.

Beim Einsatz von kompressiblen Ringspaltverfüllungen können die Gebirgsauflasten entsprechend der Verformbarkeit des Ringes bzw. des Verfüllgutes abgemindert werden.

5.2 Einfluss der Ringspaltverfüllung auf die Berechnungen

Wird der Tübbingring mit Einkornkies (Perlkies) hinterfüllt bzw. hinterblasen, muss mit Nachsetzen des Verfüllgutes und schlechter Bettung des Ringes oberhalb der Ulme gerechnet werden, was häufig zu unerwünschten Tübbingringverformungen führt. Beim einschaligen Tübbingausbau sollte grundsätzlich ein Verpressmörtel eingesetzt werden. Falls die Steifigkeit des Ringspaltmaterials deutlich geringer ist als die des Gebirges, ist der radiale Bettungsmodul für Stabzugberechnungen entsprechend abzumindern.

Die Festigkeit des Verpressmörtels sollte nur wenig höher als die des umgebenden Bodens sein, um zu verhindern, dass im Endzustand wesentliche Normalkraftanteile vom Ringspaltmörtel abgetragen werden. Dies würde bedeuten, dass im Tübbingring die rechnerisch ermittelte und in die Bemessung eingehende Normalkraft nicht erreicht wird.

Die günstige Wirkung des Seitendruckes aus der Ringspaltverpressung ist zwar grundsätzlich vorhanden, wird aber in der Regel rechnerisch nicht angesetzt.

5.3 Einwirkungen und Einwirkungskombinationen – Bemessungskonzept

Die in diesem Kapitel zitierten europäischen Normen DIN EN 1990 [4], DIN EN 1991 [6], DIN EN 1992 [8] und DIN EN 1997 [11] gelten immer in Verbindung mit den zugehörigen nationalen Anhängen [5], [7], [9] und [12].

Der Bemessung des Tübbingausbaus sollte als übergeordnete Norm die DIN EN 1997-1 in Verbindung mit der DIN 1054 [17] zugrunde gelegt werden. Das nachfolgend im Einzelnen dargestellte Bemessungskonzept entspricht im Wesentlichen der Vorgehensweise in der Richtlinie 853 für Eisenbahntunnel.

5.3.1 Ständige Einwirkungen

- Einwirkungen aus dem Gebirge
- Wasserdruck
- Eigengewichte des Tübbingausbaus und aller übrigen eingebrachten Bauteile
- Einwirkungen aus Tunneleinbauten
- Einwirkungen aus Vorspannmaßnahmen
- dauernd wirkende Lasten auf der Geländeoberfläche und Einflüsse aus benachbarten Hohlräumen
- Einwirkungen aus möglichen Subrosions- und Suffosionserscheinungen (z. B. Karst, Erdfälle)
- die im Regelvortrieb auf den Ausbau wirkenden Pressenkräfte von Tunnelvortriebsmaschinen (TVM)
- Einwirkungen aus Schwinden und Kriechen (vgl. DIN EN 1991-1-6 und 1992-1-1) können beim Tübbingring vernachlässigt werden (Tübbings sind vor Einbau weitgehend ausgehärtet)

5.3.2 Regelmäßig auftretende veränderliche Einwirkungen

- charakteristische Einwirkungen nach DIN-EN 1991-2 für Verkehr im Tunnel und Verkehrswege über dem Tunnel
- Temperaturänderungen gehören zwar grundsätzlich zu den regelmäßig auftretenden veränderlichen Einwirkungen, sie sind jedoch als Sonderfall zu betrachten, da sie lediglich Zwangsschnittgrößen erzeugen.
- Durch den Verkehr im Tunnel verursachte aerodynamische Einwirkungen können bei einem Ausbau mit Stahlbetontübbings im Regelfall vernachlässigt werden, für Tunneleinbauten sind sie jedoch zu berücksichtigen.

5.3.3 Seltene Einwirkungen

Selten auftretende Verkehrslasten und vorübergehende Einwirkungen während der Bauzeit:

- Zu den selten auftretenden Verkehrslasten gehören zum Beispiel Einflüsse aus Fahrzeugen an der Geländeoberfläche außerhalb von Verkehrswegen.

Zu den vorübergehenden Einwirkungen während der Bauzeit sind zu rechnen:

- zeitweilig wirkende Lasten aus Vortriebsmaschinen (z. B. maximal für den Vortrieb installierte Pressendrucke auf den Ausbau), Baugeräten, Rüstungen, Baustoffen und Bauwerksteilen,
- Einpressdruck bei Einpressungen (Ringspaltverpressung),
- Einwirkungen aus Druckluft, soweit diese ungünstig wirken.

Vorübergehend wirkende Einwirkungen aus Veränderungen an der Geländeoberfläche (z. B. Abgrabungen oder Aufschüttungen) und aus benachbarten Hohlräumen (z. B. später durchgeführter Tunnelvortrieb) können in der Regel ebenfalls zu den seltenen Einwirkungen gerechnet werden, soweit diese aufgrund der Dauer und Häufigkeit der Zustände nicht als ständige Einwirkungen einzustufen sind.

5.3.4 Außergewöhnliche Einwirkungen

- Temperatureinwirkungen im Brandfall
- Erdbebeneinwirkungen
- außergewöhnliche Einwirkungen aus Tunnelleinbauten (z. B. Bruch der Oberleitung bei Eisenbahntunneln)
- Flutung des Tunnels im Überschwemmungsfall über die Portale
- Anpralllasten (gilt im Allgemeinen nur für Bauteile, die quer zur Fahrtrichtung liegen)

5.3.5 Allgemeines zu den Tragfähigkeitsnachweisen

Für den Tübbingausbau sind die Nachweise in den Grenzzuständen UPL, STR und GEO-2 nach DIN 1054 [17] zu führen. Nachweise im Grenzzustand GEO-3 (Böschungs- bzw. Geländebruch) sind, abgesehen von Sonderfällen (z. B. Lehnentunnel in rutschgefährdeten Hängen), für Tunnel nicht relevant. Für die Nachweise im Grenzzustand STR und GEO-2 kann hinsichtlich der Einwirkungen aus Verkehr und Temperatur zusätzlich die DIN EN 1990 herangezogen werden (s. u.). Für die Widerstände

gelten dabei die in der DIN EN 1992-1-1 angegebenen Materialkenngrößen und Teilsicherheitsbeiwerte. Der Tübbingausbau wird für die Bemessungssituationen BS-P, BS-T und BS-A nach DIN 1054 bemessen.

Nachweise in den Grenzzuständen UPL nach DIN 1054

Für Tunnel ist in erster Linie der Nachweis einer ausreichenden Auftriebssicherheit (Grenzzustand UPL) von Interesse.

Hierbei ist A_k die hydrostatische Auftriebskraft, $\gamma_{G,dst}$ der Teilsicherheitsbeiwert für ungünstige ständige Einwirkungen im GZ 1A, Q_k der charakteristische Wert möglicher ungünstiger veränderlicher, lotrecht aufwärtsgerichteter Einwirkungen, $\gamma_{G,dst}$ der Teilsicherheitsbeiwert für ungünstige veränderliche Einwirkungen im GZ 1A, $G_{k,stb}$ der untere charakteristische Wert günstiger ständiger Einwirkungen und $\gamma_{G,stb}$ der Teilsicherheitsbeiwert für günstige ständige Einwirkungen im GZ 1A.

Für den Nachweis der Auftriebssicherheit sollte für den Endzustand bei nicht vollständig im Grundwasser liegenden Tunnelröhren der höchste, während der Lebensdauer des Tunnels zu erwartende Wasserdruck und für den Bauzustand der höchste, während der Bauzeit zu erwartende Wasserdruck angesetzt werden. Für einen späteren Austausch der Fahrbahn von Verkehrstunneln dürfen für den Nachweis „ohne Fahrbahn“ die Teilsicherheitsbeiwerte der Bemessungssituation BS-A verwendet werden.

Nachweise in den Grenzzuständen STR und GEO-2 nach DIN 1054

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass eine Berücksichtigung der Temperaturänderungen innerhalb des Konzepts der DIN 1054 problematisch ist. Beim Nachweis in den Grenzzuständen STR und GEO-2 wäre für die Bemessungssituation BS-P nach DIN 1054 ein Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_G = 1,5$ anzusetzen, was gegenüber dem bisherigen Globalsicherheitskonzept zu erheblich ungünstigeren Ergebnissen führen würde. Für die Beiwerte der Temperaturänderungen werden daher im Rahmen der nachfolgend angegebenen Einwirkungskombination (s. u.) besondere Festlegungen empfohlen.

Außerdem wird vorgeschlagen, die Beiwerte für die Einwirkungen aus Verkehr nicht gemäß der DIN 1054, sondern gemäß DIN-EN 1990 zu berücksichtigen.

Für die Bemessungssituationen BS-P und BS-T nach DIN 1054 (entspricht der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation nach DIN EN 1990) sollte daher die folgende Einwirkungskombination zugrunde gelegt werden:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

- 1) ständige Einwirkungen G_k nach DIN 1054
- 2) dominierende veränderliche Einwirkung (Leiteinwirkung): Für Verkehr gelten die Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 1990. Für Temperatur gilt:

$\gamma_Q = 1,5$ wenn die Schnittgrößen mit den Steifigkeiten (EI) im Zustand II ermittelt werden, näherungsweise darf dabei $EI_{II} = 0,6 EI_I$ angenommen werden;

$\gamma_Q = 1,0$ wenn die Schnittgrößen mit den Steifigkeiten im Zustand I ermittelt werden.

Für sonstige geotechnische veränderliche Einwirkungen gelten die Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 1054.

- 3) begleitende veränderliche Einwirkungen (Begleiteinwirkungen): Für Verkehr gelten die Kombinationsbeiwerte nach DIN EN 1990. Für Temperatur gilt $\psi_0 = 0,8$ (Teilsicherheitsbeiwerte wie bei 2)). Für sonstige geotechnische veränderliche Einwirkungen gelten die Beiwerte nach DIN 1054.

Entsprechend wird für die Bemessungssituation BS-A nach DIN 1054 (entspricht der außergewöhnlichen Bemessungssituation nach DIN EN 1990) folgende Einwirkungskombination empfohlen:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + A_d + \gamma_{Q,1} + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_i \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

- 1) ständige Einwirkungen nach DIN 1054
 - 2) Bemessungswert einer außergewöhnlichen Einwirkung (z. B. Brand, Anprall)
 - 3) dominierende veränderliche Einwirkung (Leiteinwirkung): Für Verkehr und Temperatur gilt $\gamma_Q = 1,0$. Für Verkehr gelten die Kombinationsbeiwerte nach DIN EN 1990. Für Temperatur gilt $\psi_1 = 0,6$. Für sonstige geotechnische veränderliche Einwirkungen gelten die Beiwerte nach DIN 1054.
 - 4) begleitende veränderliche Einwirkungen (Begleiteinwirkungen): Für Verkehr und Temperatur gilt $\gamma_Q = 1,0$. Für Verkehr gelten die Kombinationsbeiwerte nach DIN EN 1990. Für Temperatur gilt $\psi_2 = 0,5$. Für sonstige geotechnische veränderliche Einwirkungen gelten die Beiwerte nach DIN 1054.
- Für den Brandfall gelten besondere Lastkombinationen.

5.3.6 Gebrauchstauglichkeitsnachweise

Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) beziehen sich nach DIN 1054 im Regelfall auf einzuhaltende Verformungen bzw. Verschiebungen. Zusätzlich wird in der Norm darauf hingewiesen, dass im Einzelfall auch andere Kriterien maßgebend sein können.

Im Zusammenhang mit der Bemessung eines Tübbingausbaus aus Stahlbeton ist insbesondere der Rissbreitennachweis von Bedeutung. Hierzu werden die nachfolgenden Anforderungen auf der Grundlage von DIN EN 1990 und DIN EN 1992-2 vorgeschlagen.

Für den Rissbreitennachweis sind die Schnittgrößen mit den Steifigkeiten der Stabelemente im Zustand I zu ermitteln. Für die Einwirkungskombinationen gilt folgende Gleichung (vgl. DIN EN 1990, häufige Kombination):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,j} \cdot Q_{k,i} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

1) 2) 3)

- 1) ständige Einwirkungen nach DIN 1054
- 2) dominierende veränderliche Einwirkung (Leiteinwirkung): Für Verkehr gelten die Kombinationsbeiwerte nach DIN EN 1990. Für Temperatur gilt $\psi_1 = 0,6$.
- 3) begleitende veränderliche Einwirkungen (Begleiteinwirkungen): Für Verkehr gelten die Kombinationsbeiwerte nach DIN EN 1990. Für Temperatur gilt $\psi_2 = 0,5$. Für sonstige geotechnische veränderliche Einwirkungen gelten die Kombinationsbeiwerte nach DIN 1054.

Die zulässigen rechnerischen Rissbreiten ergeben sich entsprechend den Expositionsklassen nach DIN EN 1992-2 in Verbindung mit dem zugehörigen nationalen Anhang. In der Regel sind die Rissbreiten auf $w_k \leq 0,2$ mm zu begrenzen.

Für Verkehrsbauwerke gelten die Vorgaben der ZTV-ING [3] bzw. Ril 853 [1].

Die Schnittgrößenermittlung kann auch mit nichtlinearem Materialverhalten durchgeführt werden. Dies gilt auch für die Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise.

5.4 Ermittlung der Schnittgrößen – Berechnungsverfahren

Das Tragverhalten der Tunnelauskleidung auf Biegung wird maßgeblich durch die stützende Wirkung des umgebenden Bodens bestimmt. Nur in Sonderfällen mit außergewöhnlichen Belastungen oder in extrem wenig tragfähigen Böden muss die aus einzelnen Tübbings bestehende Tunnelauskleidung als biegesteifer Ring tragen. In diesen Fällen ist die Kopplung der Ringe untereinander in der Ringfuge von entscheidender Bedeutung für den Lastabtrag.

Die Berechnung für die Tunnelauskleidung kann sowohl am Stabwerksmodell als auch am Kontinuumsmodell erfolgen.

Bei der Berechnung als gebetteter Stabzug wird die stützende Wirkung des Baugrunds in der Regel nur über normal zu den Stäben wirkende Bettungsfedern simuliert. Aus Gründen der numerischen Stabilität kann eine geringe tangential Bettung vorgesehen werden.

Für die Bettung gelten folgende Annahmen:

- Annahme einer linear elastischen radialen Bettung mit Zugausfall rund um den Querschnitt. Der Ansatz einer Zugbettung ist nicht zulässig. Bei Tunneln im Lockergestein mit geringer Überdeckung wird in der Regel im 90°-Bereich um die Firste grundsätzlich keine Bettung angesetzt [53].
- Wahl des Bettungsmoduls k_R in Abhängigkeit von der Krümmung der Systemlinie der Tübbingschale (Systemradius R_{Sys}):
 $k_R = E_S/R_{Sys}$
- Tangentiale Bettung und tangentielle Lasten werden in der Regel aufgrund der Schubweichheit des frischen Verpressmörtels nicht angesetzt. In Sonderfällen, wie zum Beispiel bei unsymmetrischer Belastung, kann es sinnvoll sein, insbesondere auch für später hinzukommende Lastfälle (z. B. einseitige Wracklast, Bebauung und Abgrabung) eine tangentielle Bettung zu berücksichtigen. Sie ist dann über die max. mögliche Reibung zu begrenzen.

Geometrische Vorverformungen, z. B. durch Einbautoleranzen, sind bei der Berechnung zu berücksichtigen bzw. ggf. auf der ungünstigen Seite liegend anzunehmen.

Bei der Berechnung mit einem 2D-Kontinuumsmodell wird die Tunnelauskleidung ebenfalls als Stabwerk abgebildet, bei einem 3D-Kontinuumsmodell entsprechend als Schale. Das Verhalten des Baugrunds kann über ein Kontinuumsmodell und entsprechende Stoffgesetze genauer erfasst werden. Hierzu ist es erforderlich, alle Strukturelemente (Tunnelschale, Zusammenwirken der Tübbings, Ringspaltverpressung, Boden) realistisch abzubilden, um die aus ihnen und ihrem Zusammenwirken resultierenden Effekte realitätsnah erfassen zu können.

5.4.1 Stabwerksmodell

Bei einer Berechnung am Stabwerksmodell wird die Tunnelauskleidung als gebetteter Stabzug abgebildet.

Zur Berücksichtigung der Verdrehsteifigkeit in der Längsfuge und zur Erfassung der daraus resultierenden Momentenübertragung

werden im Rechenmodell an diesen Stellen nichtlineare Drehfedern angeordnet. Die zugehörigen nichtlinearen Federkennlinien bilden das Moment in der Längsfuge in Abhängigkeit von der vorhandenen Verdrehung und der wirksamen Ringnormalkraft ab. Die Bestimmung dieser Federkennlinien erfolgt in der Regel nach dem Rechenmodell von *Leonhardt/Reimann* [31]. Dieses ursprünglich für Betongelenke von Brücken entwickelte Rechenmodell hat sich auch für Tübbings bewährt, wie in entsprechenden Versuchen gezeigt werden konnte.

Je nach angesetztem Tragverhalten und Ausbildung der Ringfuge wird die statisch wirksame Kopplung hintereinander liegender Ringe in der Ringfuge über nichtlineare Koppellemente abgebildet. Die Federkennlinien für diese Koppellemente sollten den Schlupf

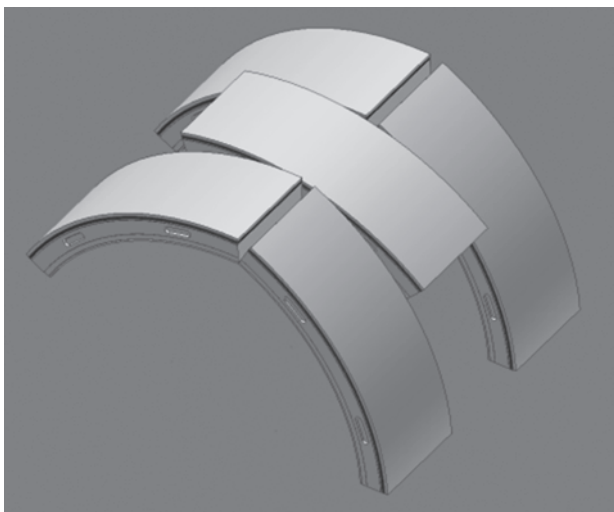


Bild 5. Unterschiedliche Verformung einzelner Tübbings (stark überhöht)

in der Fuge und die Nachgiebigkeit der vorhandenen Fugeneinlage berücksichtigen. Sie werden mit Hilfe von Versuchen bestimmt. Je nach Bauzustand sind neben der Kopplung aus der Verzahnung benachbarter Ringe auch Kopplungswirkungen aus Reibung infolge der Vortriebspresenkräfte zu berücksichtigen (Bild 5).

Bei der Betrachtung benachbarter Ringe unter Annahme der o. g. Kopplungen in den Ringfugen gleichen sich die Verformungsbilder der einzelnen Ringe an, wobei die Überbrückung der Betongelenke durch die Nachbartübbings zu einer Versteifung des Systems und einer damit einhergehenden Erhöhung der Biegemomente führt.

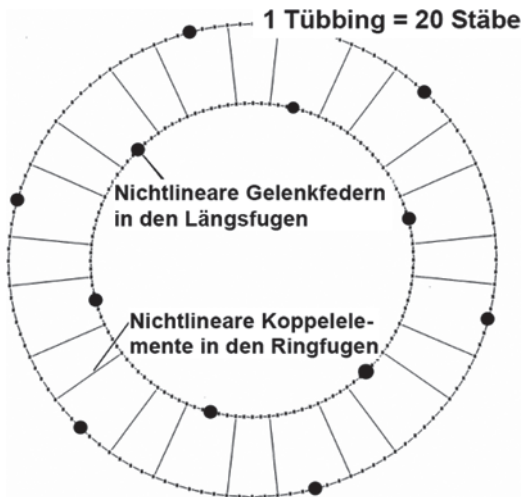


Bild 6. Abbildung der Tübbingauskleidung durch zwei Stabwerksringe (unterschiedliche Durchmesser nur zur Darstellung aufgeweitet)

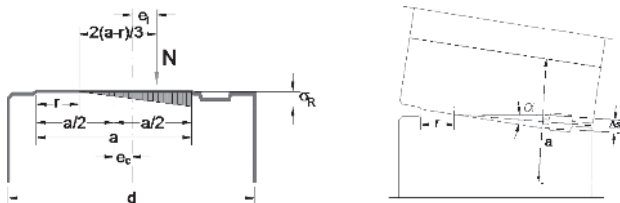


Bild 7. Ansätze und Bezeichnungen zur Abschätzung des Drehwiderstandes von Betongelenken

Trotz der Kopplung ist (aufgrund des Schlupfes in den Kopperelementen bzw. der Nut und Feder) eine gewisse Beweglichkeit in der Ringfuge als radiale Scherverformung gegeben, die auch eine Verdrehung in der Längsfuge zulässt.

Ein mögliches statisches Modell für eine Modellierung von zwei gekoppelten Tübbingringen ist in Bild 6 dargestellt. Für die Berechnung können die Ringe je nach Programmsystem räumlich als hintereinander liegende Ringe oder einfacher als Ringe in einer Ebene mit nahezu gleichem Durchmesser abgebildet werden.

Im Folgenden werden zur Bestimmung der Verdrehsteifigkeit in den Längsfugen die Bezeichnungen und Formelzusammenhänge aus DIN EN 1992-1-1 [8] verwendet (Bild 7).

Der Drehwiderstand eines Gelenkes wird durch ein Rückstellmoment ausgedrückt, das im Gelenk eine Ausmitte e erzeugt.

Folgende Zusammenhänge liegen den Formeln zugrunde:

a Breite des Gelenkhalses

r klaffende Fuge an der Zugseite $r = a - 2 \cdot N / \sigma_R$

e gesamte Ausmitte; $e = e_L + e_c$

e_L Ausmitte der Normalkraft, $e_L = M/N$

e_c Ausmitte des Gelenkhalses

s Länge des an der Verformung beteiligten Bereichs in Umfangsrichtung (die Länge entspricht näherungsweise der Breite des Gelenkhalses a) $s = a$

Δs Längenänderung des Verformungsbereichs am Rand mit maximaler Randspannung σ_R

N Normalkraft

M Moment

E Elastizitätsmodul Beton (da die Lasten sofort wirken, kann der E-Modul in der Regel nicht aufgrund von Kriecherscheinungen abgemindert werden)

α Drehwinkel

$$\sigma_R \text{ Randspannung } \sigma_R = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot \left(\frac{M}{N} - \frac{h_c}{2} \right)}$$

m $M/(N \cdot h_c)$, bezogenes Rückstellmoment

Nach [39], [53] folgt daraus:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{h_c - a} = \frac{\sigma_R \cdot h_c}{E \cdot (h_c - a)} \quad \alpha = \frac{8 \cdot N}{9 \cdot (1 - 2m)^2 \cdot h_c \cdot E}$$

Mit diesen Formeln kann das Rückstellmoment in Abhängigkeit vom Drehwinkel α angegeben werden. Für die praktische Berechnung ist es sinnvoll, die nichtlineare Kurve durch ein Polygon anzunähern (Bild 8).

Die Steifigkeit der nichtlinearen Koppелеlemente in der Ringfuge benachbarter Ringe richtet sich nach der geometrischen Ausbildung der Koppелеlemente und den verwendeten Einlagen bzw. Materialien der Koppелеlemente. Als Beispiel ist in Bild 9 für eine Topf-/Nocke-Kopplung mit eingelegten Kaubitstreifen dargestellt.

Reibungskopplung

Bevor eine mechanische Kopplung (über mechanische Kopplungselemente wie Nocke-/Topf- oder Dübelverbindungen) in den Ringfugen wirkt, wird, zumindest im Bereich hinter der Vortriebsmaschine, eine Reibungskopplung zwischen den Tübbingringen wirksam. Die Reibungskopplung muss unter Berücksichtigung der Geometrie und Steifigkeit der Zwischenlagen sowie deren Reibungsbeiwert bzw. Scherwiderstand unter Ansatz der effektiven Pressenkräfte zur Ermittlung der maximalen Biegemomente angesetzt werden.

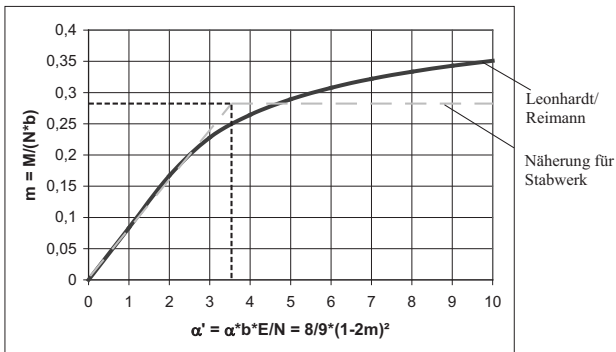


Bild 8. m - α' Beziehung (nach [34] bzw. [61]) sowie eine bilineare Annäherung)

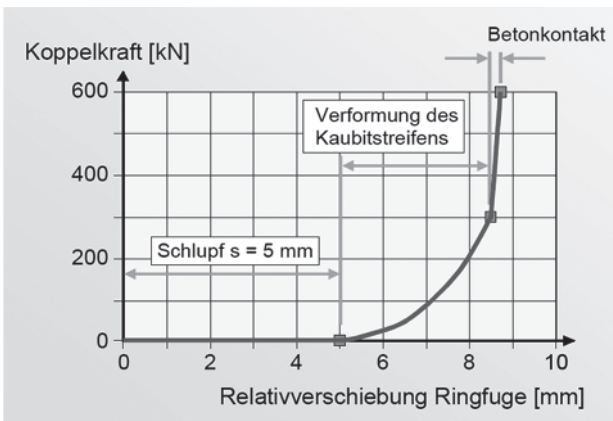


Bild 9. Nichtlineare Kopplung in der Ringfuge; Koppelkraft als Funktion der Relativverformung

Durch Temperaturänderungen, Kriechverformungen und plastische Verformungen in den Ring-Zwischenlagen wird die Reibungskopplung meist langsam wieder abgebaut, sodass für den Endzustand auch mit einem vollständigen Ausfall der Reibungskopplung gerechnet werden muss.

5.4.2 Kontinuumsberechnung

Bei einer Kontinuumsberechnung wird die Interaktion der Tunnelchale mit dem Boden nicht wie bei den Stabwerksmodellen über die Bettung und die Vorgabe schlaffer Belastungen, sondern über die Diskretisierung des Bodens selbst erfasst. Dies beinhaltet auch die grundsätzliche Möglichkeit der besseren Abbildung des nichtlinearen Spannungs-Verformungsverhaltens des Bodens.

Bei der Abbildung der Tunnelauskleidung als Stabzug, Schale oder als Kontinuum ist es erforderlich, die bei der Stabwerksmodellierung ausführlich erläuterten Tragmechanismen des Zusammenwirkens der einzelnen Tübbings ebenfalls abzubilden. Soweit ein gekoppeltes Ringsystem abgebildet werden soll, wird ein räumliches Kontinuumsmodell mit Schalenelementen zur Simulation des Tübbingausbaus empfohlen.

Die Kontinuumsberechnungen sollten zu Kontrollzwecken immer durch einfache analytische Berechnungen auf Plausibilität überprüft werden. Für die Tübbingbemessung sind sie nur begrenzt einsetzbar.

Zur Ermittlung der Einwirkungen aus Gebirgsdruck sowie zur Berechnung der Ringverformungen bei besonderen Einwirkungen kann eine Kontinuumsberechnung wirklichkeitsnahe Ergebnisse liefern.

Sie ist unter anderem bei folgenden Situationen besonders vorteilhaft:

- Berücksichtigung von Spannungszuständen im Untergrund, bei denen die Hauptspannungsrichtungen deutlich von den kartesischen Koordinatenrichtungen abweichen, wie z. B. bei

- hohen Einzellasten aus Bebauung oder Verkehrslasten, Abgrabungen, Unterfahrung von Dämmen oder Hängen,
- Vorbeifahren an Bauteilen im Untergrund, wie z. B. Schlitz-, Bohrpfahl- und Spundwänden, Ankerungen, empfindlichen Fundamenten oder Leitungen,
 - konsolidiertem Untergrund,
 - Inhomogenitäten im Untergrund, insbesondere bei Vorhandensein von Bodenschichten geringer Steifigkeit und/oder Festigkeit im Bereich des Tunnels,
 - Berücksichtigung von Überkonsolidierung im Untergrund, aushubentlastungsbedingten Hebungen in der Sohle oder spannungs- oder dehnungsabhängigem Materialverhalten,
 - erhöhten Horizontalspannungen im Untergrund,
 - stark geklüftetem Fels,
 - Querschläge mit lastabtragenden Koppелеlementen, teilweisem Bettungsentzug durch Abgrabung, Vereisungslasten. Dies setzt die dreidimensionale Modellierung von Untergrund und Tübbingausbau voraus.
 - Bestimmen von Setzungen und stabilisierenden bzw. setzungsmindernden Maßnahmen.

5.5 Ermittlung der Schnittgrößen und Spannungen aus dem Bauprozess

5.5.1 Spaltzugbeanspruchung infolge von Pressenkräften

Während des Vortriebs stützt sich die TVM mit der Vortriebskraft über die Pressen auf die Ringfugen der bereits gebauten Tübbingringe ab. In Abhängigkeit von der Geometrie der Ringfuge entstehen dabei unter den Pressenschuhen hohe Teilflächenpressungen. Die Teilflächenpressungen und die daraus resultierenden Spaltzugkräfte in radialer und in Umfangsrichtung sind entsprechend den Vorgaben in der DIN EN 1992 nachzuweisen und abzudecken. Bei den Nachweisen kann zwischen Regelwerten der Pressenkräfte und außergewöhnlichen Pressenkräften für selten auftretende größere Steuerbewegungen unterschieden werden. Die Nachweise können für die verschiedenen

Bemessungssituationen mit den jeweiligen Sicherheiten geführt werden.

5.5.2 Scheibenbeanspruchung aufgrund von Versatz oder Toleranzüberschreitung in der Ringfuge

Im Rahmen des Ringbaues kann es durch Toleranzen, vor allem aber aufgrund von Montageungenauigkeiten, zu Versätzen benachbarter Tübbings kommen, sodass der Ringspiegel nicht mehr eben ist. Je nach Größe des Versatzes und der Art der Fugeneinlagen (Sperrholz oder Hartfaserplatten) sind die Einlagen ggf. nicht in der Lage, den Versatz zu überbrücken und es kann aufgrund der damit verbundenen Scheibenzugspannung zu Schäden in den Tübbings kommen (s. Bild 10).

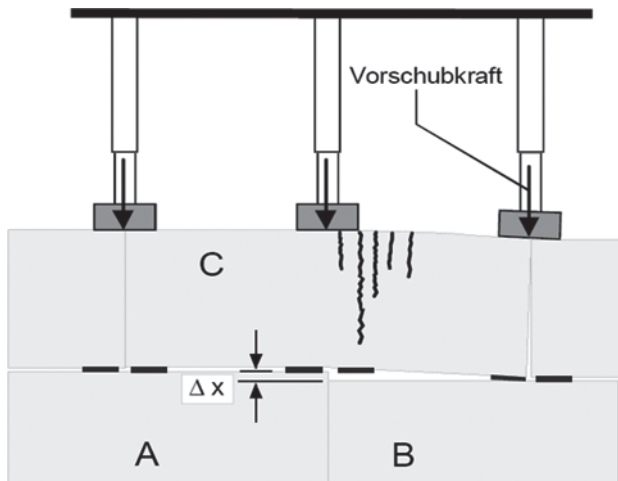


Bild 10. Schäden aus Versatz in der Ringfuge

Für die Bemessung ist es schwer, realistische Werte für einen möglichen Versatz vorzugeben, da dieser stark vom Ringbau abhängt und große Werte zu sehr großen erforderlichen Bewehrungsquerschnitten führen. Hier ist es sinnvoll, projektspezifisch Grenzwerte festzulegen, die Tübbings dafür zu dimensionieren und größere Werte durch Einlage von Zwischenlagen oder andere Maßnahmen beim Ringbau auszugleichen. Die Ringfugenebene des zuletzt gebauten Ringes sollte bei der Ausführung regelmäßig, ca. jedem 10. Ring, aufgemessen und Abweichungen von der Ebene ermittelt werden. Weicht der Ring an einem Punkt weiter als ca. 2 bis 3 mm von der idealen Ebene ab, muss wieder eine ideale Ebene der Ringfuge erzeugt werden.

5.5.3 Beanspruchung aus Transport, Lagerung und Einbauprozessen

Lagerung

In der Regel werden Tübbings eines Ringes in einem Stapel übereinander gelagert. Bei der Lagerung der Tübbings ist darauf zu achten, dass die Lagerböcke und Zwischenlagen zwischen den aufeinander gestapelten Tübbings Berührungen untereinander oder zur Lagerfläche sicher verhindern. Die Lagerleisten müssen exakt ausgerichtet werden (Ebenheit, Lagesicherung durch Anschläge) und die Tübbings genau in der vorgesehenen Position abgelegt werden. Bei schräg liegenden Leisten/Lagerböcken besteht die Gefahr, dass der Tübbing durch Kriechen eine innere Verdrehung erfährt und nicht mehr lagegenau eingebaut werden kann.

Die Lagerungsbeanspruchung (Tübbingstapel) ist statisch nachzuweisen bzw. aufgrund statischer Berechnung vorzugeben.

Transport

Beim Transport sind alle Gefährdungen durch ungewollte Berührungen zu verhindern. Werden nach dem Antransport in der TVM Beschädigungen der Tübbings festgestellt, so ist nachzuprüfen, wo diese Beschädigungen entstanden sind, und Abhilfe zu schaffen. Jede Transportbeschädigung ist zu dokumentieren.

Vor Einbau der Tübbings ist mit der Bauüberwachung abzuklären, ob die schadhaften Tübbings eingebaut werden können oder ausgetauscht werden müssen.

Beanspruchungen aus Einbauprozessen

Bereits bei der Planung der Tübbingringe sind die Beanspruchungen durch die Einbauprozesse zu berücksichtigen. Bei der Verwendung von mittigen Erektoraufnahmen muss der Tübbing auf die daraus resultierenden Biegemomente bemessen werden.

5.5.4 Spaltzug aus der Rückstellkraft in der Dichtungsnut

Der sich unter der Nutgrundfläche infolge der Rückstellkraft des Dichtungsprofils einstellende Spaltzug im Beton kann vereinfachend wie im Folgenden bestimmt werden (Bild 11).

Kompressionskraft des Dichtungsprofils:

P Rückstellkraft Dichtprofil [kN/m]

$$d_S \cong 2 \cdot d_R + d_D$$

Resultierende Spaltzugkraft gemäß [51]:

$$Z_S = 0,25 \cdot P \cdot (1 - d_D/d_S)$$

Die vorhandene Bewehrung kann aufgrund ihrer Lage (Betondeckung zur Außenkante Tübbing und zu den Fugen) nicht wirklich

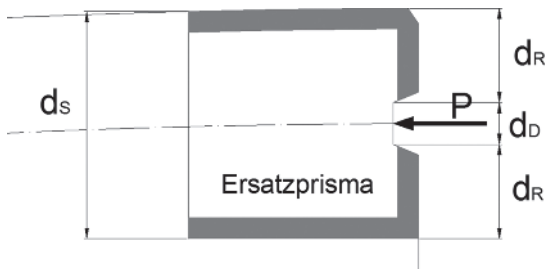


Bild 11. Ausschnitt aus Fuge mit Ersatzprisma für Nachweis Dichtungsnut

zur Aufnahme von Spaltzugkräften genutzt werden. Deswegen muss nachgewiesen werden, dass der Spaltzug auch ohne Bewehrung vom Beton aufgenommen werden kann. Gemäß [51] Bild 3.6 gilt:

$\sigma_0 = P/(b \cdot d_s) \rightarrow$ aus Bild 3.6 ergibt sich das Spannungsverhältnis σ_y/σ_0 und daraus σ_y .

5.6 Einzelnachweise der Tübbingfugen

5.6.1 Zulässige Betondruckspannung bei Teilflächenpressung

Aufgrund der üblichen Fugenausbildungen werden die Einwirkungen sowohl in der Ring- als auch in der Längsfuge als Teilflächenbelastungen aufgebracht. Die Betondruckspannungen und die daraus resultierenden Spaltzugspannungen müssen nachgewiesen werden.

Nach DIN EN 1992-1-1 gilt für die Bemessung bei Teilflächenbelastung:

$$\sigma_{Rd} = f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 \cdot f_{cd}; \quad f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

A_{c0} Belastungsfläche (Gelenkhalsfläche, Lastübertragungsfläche in der Ringfuge)

A_{c1} rechnerische Verteilungsfläche

$\alpha_{cc} = 0,85$

$\gamma_c = \gamma_{c, red.} = 1,35$ (für Fertigteile mit werksmäßiger Herstellung und ständiger Überwachung)

Für Tübbingfugen mit Teilflächenpressungen wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt. Beispielsweise seien die Versuche für die 4. Elbtunnelröhre genannt (s. [55], [56], [57]). Alle Versuche zeigen sehr hohe Beanspruchbarkeiten. Im Einzelfall kann es daher sinnvoll sein, gesonderte Versuche durchzuführen, um höhere Tragfähigkeiten nachweisen zu können.

Solange keine systematischen experimentellen Untersuchungen vorliegen, kann als Näherung zur sicheren Seite für Tübbingfugen die Teilflächenbelastung nach DIN EN 1992-1-1/NA [10] angewendet werden, wobei die Grundbedingungen von Belastungsfläche, Verteilungsfläche und Ausbreitungsgeometrie einzuhalten sind. Eine umschnürende Bewehrung in Tübbingdicke und -breite ist grundsätzlich vorzusehen. Die Bewehrung in Tübbingbreite ist über die Höhe der Lastausbreitung zu verteilen.

Eine weitere Möglichkeit ist es, alternativ zum vorherigen Absatz, an den Längsfugen über das Verhältnis $\sqrt{A_{c1}/A_{c0}} \cdot f_{cd}$ hinausgehende Teilflächenpressungen bis max. $3 \cdot f_{cd}$ anzusetzen, wenn die beiden Querdehnungen im Lasteinleitungsbereich nach Bild 12 auf max. $0,1 \text{ ‰}/\gamma_c$ begrenzt bleiben (Tabelle 3). Dabei ist rechnerisch ein gleichmäßiges, linear-elastisches Materialverhalten und eine Querdehnzahl $\nu = 0,2$ für Beton anzusetzen [64].

Es ist nachzuweisen:

$$\varepsilon_q = \frac{N_{Ed}}{E_c \cdot A_{c1}} \cdot \nu \leq \frac{0,1 \text{ ‰}}{\gamma_c}$$

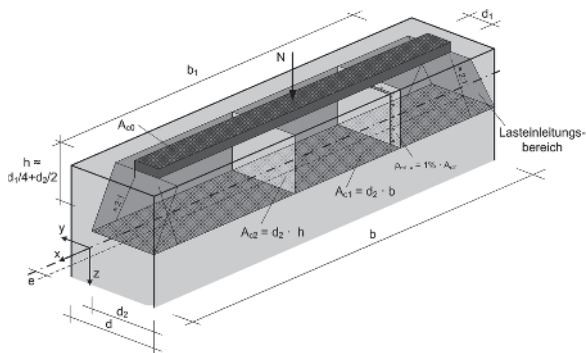


Bild 12. Prinzipskizze Lastausbreitung über die Tübbingdicke bei erhöhter Teilflächenpressung mit Definition der rechnerischen Verteilflächen

Tabelle 3. Tragwiderstände für Teilflächenpressung in den Tübbingfugen

Betondruckfestigkeitsklasse		C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
Zylinderdruckfestigkeit	f_{ck} [N/mm ²]	35,0	40,0	45,0	50,0
Betondruckfestigkeit für die Bemessung	f_{cd} [N/mm ²]	22,0	25,2	28,3	31,5
Maximale Teilflächenpressung (3,0 · f_{cd})	σ_{Rd} [N/mm ²]	66	76	85	95

mit

$$\gamma_c = 1,35$$

N_{ed} Gesamtfugenkraft

$A_{c1} = d_2 \cdot b$ Verteilungsfläche am unteren Ausbreitungsrand

E_c Elastizitätsmodul

Spaltzugwirkungen sind grundsätzlich durch Bewehrungen aufzunehmen. Der Lasteinleitungsbereich entlang den Längsfugen ist mit mindestens 1 % der Betonfläche $A_{c2} = d_2 \cdot h$ zu bewehren.

Bemessung der Teilflächenbeanspruchung in der Längsfuge

Als maßgebende Druckübertragungsfläche wird die Gelenkhalsbreite d_k um die zweifache Exzentrizität reduziert (s. Bild 13).

Nachweis der Betonspannung:

$$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{b_1 \cdot d_1} < \sigma_{Rd} \quad (\sigma_{Rd} \text{ gem. Kapitel 5.6.1})$$

Nachweis der Spaltzugbewehrung in der Längsfuge

Neben der Aufnahme der Betondruckkräfte ist in den Längsfugen die Spaltzugbeanspruchung nachzuweisen. Dazu wird die Spaltzugbewehrung für die maximale Beanspruchung aus Normalkräften

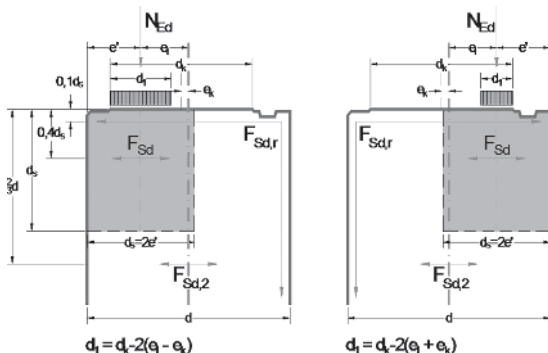


Bild 13. Tübbingfuge mit Lastexzentrizität und Spaltzugkräften

ten und zugehörigen Momenten ermittelt. Grundlage hierfür kann [34] sein.

Der Nachweis kann unter Ansatz der Kraftübertragung mittels Spannungsblock erfolgen.

Für eine exzentrisch angreifende Last ($e > d/6$) treten zusätzlich zu den Spaltzugkräften F_{Sd} noch Randzugkräfte $F_{Sd,R}$ und sekundäre Spaltzugkräfte $F_{Sd,2}$ auf.

Für die Spaltzugkraft gilt:

$$F_{Sd} = 0,25 \cdot N_{Ed} \cdot (1 - d_1/d_s)$$

Die Spaltzugkräfte werden für die maximale Normalkraft N_{max} und zugehörige Ausmitte e und für die maximale Ausmitte e_{max} und zugehörige Normalkraft N aus der Berechnung mit den nichtlinearen Momenten-Verdrehungsbeziehungen in den Längsfugen bestimmt.

Erforderliche Spaltzugbewehrung:

$$\text{erf. } a_s = F_{Sd}/(f_{yk} \cdot \gamma_s) \text{ [cm}^2\text{/m]}$$

$$F_{Sd,R} = N_{Ed} \cdot (e/d - 1/6)$$

$$F_{Sd,2} \approx 0,3 \cdot F_{Sd,R}$$

Konstruktiv mögliche Gelenkverdrehung in der Längsfuge

Zusätzlich zu den statischen Nachweisen der Längsfugen ist noch die mögliche Gelenkverdrehung zu überprüfen.

Mit Hilfe der berechneten Gelenkverdrehung (z. B. aus einer Stabzugberechnung) kann die konstruktive Verträglichkeit der Verdrehung mit der Fugengeometrie, bei Öffnen der Fuge auf der Außenseite die ausreichende Dichtwirkung, und bei Öffnen auf der Innenseite die Erhöhung der Rückstellkräfte im Dichtungsprofil und damit Betonpressung, Spaltzug und Schubspannung, nachgewiesen werden.

Querkraft im Gelenk

Da es sich bei den Tübbinggelenken nicht um Ortbetongelenke handelt, kann das Verhältnis von Q zu N über ein Reibungsmodell bewertet werden.

Nach DIN EN 1992-1-1 ist der Reibungsbeiwert zwischen Beton und Beton selbst bei sehr glatten Fugen mindestens mit $\mu = 0,5$ anzusetzen. Hieraus ergibt sich für das maximale Verhältnis von Q zu N die minimale Sicherheit gegen Gleiten von:

$$\text{min. } \eta \geq 0,5/(Q/N)$$

Erforderliche Sicherheit η :

Lastfall „Normalzustand“: $\eta \geq 2$

Lastfall „Außergewöhnliche Beanspruchung“: $\eta \geq 1,5$

(z. B. vollgelaufener Tunnel mit minimaler Ringnormalkraft)

Nachweis der Teilflächenpressung in der Ringfuge

Die Ringfugen sind infolge der Pressenkräfte aus dem TVM-Vortrieb nachzuweisen. Für den Nachweis der Teilflächenpressung und die Ermittlung des Spaltzugs ist eine Exzentrizität e des Pressenschuhs zu berücksichtigen.

Teilflächenpressung nach DIN EN 1992-1-1:

$$\sigma_d = \frac{N}{A_{c0}} < \sigma_{Rd} \quad (\sigma_{Rd} \text{ gem. Abschnitt 5.6.1})$$

Der Spaltzugnachweis erfolgt nach DIN EN 1992-1-1 (s. 5.6.1.2).

Lastabtrag der Koppelkräfte

Werden Koppelkräfte in der Ringfuge über eine Nut-/Federkonstruktion, Nocke-/Topf- oder Dübelverbindungen erzeugt, so sind diese nachzuweisen. Ein Ansatz für den Nachweis wird in [53] gegeben.

Gegebenenfalls können die aufnehmbaren Koppelkräfte auch aus Versuchen ermittelt werden.

5.6.2 Nachweis der Verbindungsmittel

Im Montagezustand während des Ringbaus erfüllt die temporäre Verschraubung in den Längsfugen die Funktion, den Rückstellkräften des Dichtprofils entgegenzuwirken, bis der umgebende Boden bzw. die Ringspaltverpressung eine Fugenöffnung verhindern.

Die Komprimierung der Dichtungsprofile in der Ringfuge erfolgt primär durch die Vortriebspresen, deren Vorspannkraft die der Schrauben um ein Vielfaches übersteigt. Die Schrauben sollen hier ein Öffnen der Fugen beim Ringbau während des Abziehens einzelner Pressen verhindern.

Sowohl die Schrauben in den Längs- als auch den Ringfugen werden nach dem Einbau weiterer Ringe nicht mehr benötigt. Sie werden entfernt und können wiederverwendet werden [s. Kapitel 4.5].

Eine permanente Verschraubung wird nur im Start- und Zielbereich sowie ggf. im Bereich von Querschlägen eingebaut, um die Rückstellkräfte aus dem Dichtprofil dauerhaft aufzunehmen.

Das Dichtungsprofil umschließt einen Tübbing entlang seines Umfangs. Die Rückstellkraft pro Fuge P_i lässt sich angeben mit

$$P_i = p \cdot L_{\text{Fuge}}$$

Die Tragfähigkeit der Schrauben und Dübel sollte auf die 2,0-fache Rückstellkraft P_i des Dichtungsrahmens bemessen werden. Dabei darf nur der in Richtung der Dichtung wirkende Schraubenkraftanteil angesetzt werden.

Außerdem ist zu beachten, dass die Vorspannkraft F_v der Schrauben über der Rückstellkraft P_i für das Profil und unterhalb der Schraubenstreckgrenze F_s liegt, damit die Schrauben nicht plastizieren.

5.6.3 Nachweis der Längsfuge am Schlussstein

Die Längsfugen der Standardtübblings werden radial ausgebildet. Damit ist gewährleistet, dass die Ringnormalkraft immer senkrecht auf die Längsfugen wirkt und keine Abtriebskomponenten aufzunehmen sind. So ist es möglich, die Fugen eben ohne Verzahnung oder Verdübelung auszubilden. In den Schlusssteinlängsfugen führt eine radiale Ausbildung aufgrund der größeren Umfangslänge auf der Außenseite und der Montage zu einer Vergrößerung des erforderlichen Einbauweges in Vortriebsrichtung. Als Abhilfe wird die Fuge in der Regel etwas steiler, in Richtung der Parallelen zur Tübbingachse, ausgeführt. Eine senkrechte Fuge (Längsfugen parallel zur Tübbingachse) sollte immer vermieden werden, da durch äußere Einwirkungen der Schlussstein nach innen gedrückt wird und eine parallele Fugenanordnung das nach-innen-Rutschen nicht verhindern kann.

Mit der abweichend von der radialen Richtung geneigten Ausbildung wirkt in den Längsfugen des Schlusssteines planmäßig eine Abtriebskomponente. Dies kann dazu führen, dass die Fuge nicht in der Lage ist, den von außen auf den Stein wirkenden Gebirgs- und Wasserdruck sicher abzutragen. Die Längsfuge des Schlusssteines kann deshalb mit einer Nut-und-Feder-Verzahnung oder mit einer Führungsstange (guiding rod) ausgeführt werden. Der Lastabtrag der Verzahnung ist analog zur Ringfuge nachzuweisen.

5.7 Besonderheiten bei der Verwendung von Stahlfasern

5.7.1 Allgemeines

Beton besitzt bekanntermaßen eine hohe Druckfestigkeit, während die Zugfestigkeit wesentlich geringer ist und aufgrund ihrer

großen Streuung, auf der sicheren Seite liegend, rechnerisch im Rahmen von Standsicherheitsuntersuchungen nicht in Ansatz gebracht wird.

Durch die Zugabe von Stahlfasern zu einem Ausgangsbeton entsteht ein Baustoff mit bestimmten Materialeigenschaften, insbesondere im Zugbereich: der Stahlfaserbeton. Die Fasern sind im Idealfall gleichmäßig im Raum verteilt und in alle Raumrichtungen, d. h. ohne Bevorzugung einer speziellen Richtung, orientiert.

Stahlfasern können dem Ausgangsbeton eine größere Duktilität verleihen und das Nachrissverhalten entscheidend verbessern. Tübbings aus Stahlfaserbeton sind, insbesondere was Eck- und Kantenabplatzungen aus Fertigungs- und Montagezuständen anbelangt, robuster als konventionell bewehrte Tübbings. Die Fasern sind bis in den Randbereich hinein verteilt und verstärken konstruktiv auch die Randzonen im Gegensatz zu einem konventionell bewehrten Tübbing, bei dem die Randzone (Betonüberdeckung) grundsätzlich unbewehrt bleibt.

Je nach Biegebeanspruchung der Röhre können Tübbings als reine Stahlfaserbetontübbings oder auch in Kombination mit konventioneller Bewehrung konzipiert und produziert werden (s. Bild 14).

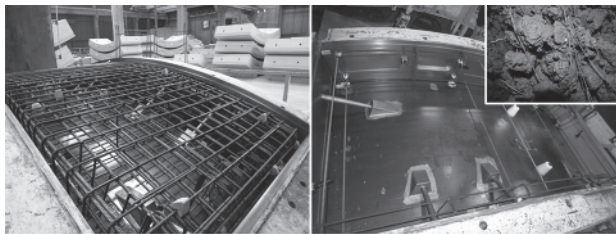


Bild 14. Konventionelle Tübbingbewehrung (links); Tübbing mit Stahlfasern (rechts)

Die Fasern besitzen bei der Anwendung für Tübbings als sogenannte Makrofaser typischerweise Längen von etwa 40 bis 60 mm. Als Schlankheit bezeichnet man das Verhältnis von Faserlänge L zu Faserdurchmesser D (Ersatzdurchmesser bei rechteckigem Faserquerschnitt). Je größer die Faserschlankheit ist, umso mehr einzelne Fasern sind, bei gleichem Fasergehalt, im Beton verteilt und umso besser ist die Wirksamkeit der Fasern im Nachrissbereich. Mit steigender Faserschlankheit nehmen jedoch die Entmischungsgefahr und das Risiko einer sog. „Igelbildung“ zu. Bei der Anwendung für Tübbings sollte daher eine Schlankheit L/D von etwa 50 bis 80 eingehalten werden.

Um das Auszugverhalten der Fasern aus der Betonmatrix zu verbessern, werden diese typischerweise mit Endverankerungselementen in Form von Haken, Aufbiegungen oder aufgestauchten Köpfchen versehen. Ebenfalls können Strukturierungen der Faseroberfläche das Auszugverhalten günstig beeinflussen.

Die Fasereigenschaften sind auf den Ausgangsbeton mit dem Ziel abzustimmen, im Nachrissbereich ein möglichst duktiler Verhalten zu erreichen. Hierzu ist einerseits ein ausreichender Auszugwiderstand notwendig; andererseits ist ein Durchreißen der Fasern durch entsprechende Zugfestigkeit des Drahtes zu vermeiden.

Um überhaupt einen Effekt der Fasern im Beton zu erreichen, sollte ein Fasergehalt von mindestens 25 kg/m^3 eingehalten werden. In der Praxis haben sich Fasergehalte von 30 bis 50 kg/m^3 durchgesetzt. Höhere Fasergehalte (80 kg/m^3 oder mehr) sind mit entsprechender Betontechnologie und bei sorgfältiger Verarbeitung möglich, werden aber hier als Sonderfall nicht weiter betrachtet.

Zur Verbesserung des Brandschutzverhaltens können Stahlfasern in Kombination mit Polypropylen-(PP-)Fasern eingesetzt werden.

Da bei der Verwendung von Stahlfasern die Betondeckungen nicht eingehalten sind, die Stahlfasern kommen auch nahe der Oberfläche zu liegen, ist ein Einsatz bei ungünstigen Expositions-

bedingungen (z. B. Straßentunnel mit Salzstreuung) üblicherweise nicht möglich bzw. problematisch.

5.7.2 Wirkungsweise der Fasern

Bei den zuvor genannten Fasergehalten von ca. 30 bis 50 kg/m³ wird das Verhalten des Betons unter Druckbeanspruchung (Druckbereich) nur wenig verändert. Die Steifigkeit (E-Modul) und die Druckfestigkeit bleiben nahezu unverändert; im Nachbruchbereich (Druck) ergibt sich ein erhöhtes Arbeitsvermögen.

Bei Zugbeanspruchungen muss zwischen dem Zustand vor und nach Risseintritt unterschieden werden. Mit beginnender Zugbeanspruchung verhält sich der Stahlfaserbeton mit Makrofasern zunächst wie ein Beton ohne Fasern und die Zugfestigkeit wird durch die Zugabe der Fasern vor erstem Risseintritt praktisch nicht beeinflusst. Während ein unbewehrter Beton nur ein sehr geringes Arbeitsvermögen im Nachrissbereich besitzt – die entsprechende Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung (s-w-Beziehung) zeigt im Versuch einen vergleichsweise kurzen, steil abfallenden Ast –, kann durch die Zugabe von Stahlfasern hier eine entscheidende Verbesserung erreicht werden: Durch Wahl der Art und der Dosierung der Fasern kann ein wesentlich erhöhtes Arbeitsvermögen im Nachrissbereich mit entsprechenden Nachrisszugfestigkeiten eingestellt werden.

Weitere Eigenschaften werden durch die Zugabe von Stahlfasern verbessert, u. a. der Widerstand gegen Stoßbeanspruchungen (Transport und Einbaubedingungen des Tübbings) sowie gegen mechanischen Verschleiß; letzterer kann bei der Auslegung von Wassertunneln mit entsprechendem Feststofftransport von Bedeutung sein.

Die Fasern sollen idealerweise gleichmäßig in der Betonmatrix verteilt sein. Die Fasern sind damit i. A. soweit vereinzelt, dass ein durchgehender elektrischer Kontakt der Fasern untereinander nicht gegeben ist. Der elektrische Widerstand ändert sich damit gegenüber einem unbewehrten Beton kaum merklich.

5.7.3 Erfahrungen mit Tübbings aus Stahlfaserbeton

In der Zwischenzeit wurden verschiedene Tunnelprojekte mit Tübbings aus Stahlfaserbeton hergestellt. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien hier genannt:

- Channel Tunnel Rail Link (CTRL), London, Großbritannien,
- Heathrow Baggage Tunnel, London, Großbritannien,
- Fernwärmehöhle, Kopenhagen, Dänemark,
- Jubilee Line, London, Großbritannien,
- Docklands Light Rail, Großbritannien,
- U-Bahn Los 34, Essen, Deutschland,
- Metro M9, Barcelona, Spanien (Bemessung und Ausführung mit Stabstahl, Forderung AG: Zugabe von 30 kg Stahlfasern pro m³ Beton (konstruktiv)),
- Metro Linie 4 und 5, Sao Paulo, Brasilien,
- Hofoldingen Stollen (Trinkwasserstollen) bei München,
- Temporäre Bahnhofstübbings, U-Bahn Wehrhahnlinie Düsseldorf.

5.7.4 Berechnungsgrundlagen

Stahlfaserbeton ist seit vielen Jahren Gegenstand intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Mit Erscheinen der DAfStB-Richtlinie Stahlfaserbeton [32] wurde die Lücke zur DIN 1045-1 bzw. EN 1992-1-1 geschlossen und es steht ein in sich konsistentes Regelwerk für die Bemessung von Stahlfaserbeton und Stahlfaserbeton in Kombination mit Stahlbeton (d. h. konventionell bewehrtem Beton) zur Verfügung. Die auf die Anforderungen der EN 1992-1-1 angepasste Richtlinienversion wird voraussichtlich Anfang 2014 in Deutschland bauaufsichtlich eingeführt [32].

Die Richtlinie verfolgt einen vom Stoffverhalten bestimmten Ansatz: Das Materialverhalten von Stahlfaserbeton im Nachrissbereich wird anhand von kleinmaßstäblichen Versuchen ermittelt und daraus werden charakteristische Werte und Grundkennwerte bestimmt. Über die Grundwerte sind die sogenannten Leistungsklassen L1 und L2 definiert. Aus den Grundwerten werden

außerdem die Rechen- und Bemessungskennwerte für definierte Spannungs-Dehnungslinien ermittelt. Diese Spannungs-Dehnungslinien für den Stahlfaserbeton finden Eingang in die übliche Berechnung und Bemessung von Stahlbetonkonstruktionen nach DIN 1045-1 bzw. EN 1992-1-1 im Sinne von Verbesserung der Biege-, Querkraft- und Durchstanz-Tragfähigkeiten oder Rissbreitenbeschränkung.

Der entwerfende Ingenieur legt als Ergebnis seiner statischen Berechnung die erforderlichen Baustoffeigenschaften durch Angabe der Leistungsklassen L mit L1 (Nachrissbiegezugfestigkeit bei kleinen Verformungen) und L2 (Nachrissbiegezugfestigkeit bei größeren Verformungen) bzw. in Kombination mit konventioneller Bewehrung des Stahlfaserbetons fest.

Die Richtlinie Stahlfaserbeton ist primär auf die Belange des üblichen Hoch- und Industriebaus ausgerichtet. Die Bemessung des Vollquerschnitts des Tübbings für Längskraft mit Biegung/Schub sollte anhand der Richtlinie für Stahlfaserbeton durchgeführt werden. Sie stellen den aktuellen Stand der Technik in Deutschland dar.

Für tübbingspezifische Fragestellungen können auch Sonderuntersuchungen (Zustimmungen im Einzelfall) notwendig sein.

5.7.5 Ermittlung der Betoneigenschaften im Versuch

Die Einstufung eines Stahlfaserbetons in die Leistungsklassen L1 und L2 erfolgt anhand der Ergebnisse eines 4-Punkt-Biegeversuchs an balkenförmigen Prüfkörpern nach [37] Teil 2, Anhang O – Prüfung zur Ermittlung der Leistungsklassen. Die Festlegung der Betonzusammensetzung einschließlich Faserart und Menge liegt im Verantwortungsbereich des Herstellers des Stahlfaserbetons.

Es sind Stahlfasern nach DIN EN 14889-1 Fasern für Beton – Teil 1: Stahlfasern [22] zu verwenden. Üblicherweise kommen bei der Tübbingherstellung Stahlfasern aus kaltgezogenem Draht zum Einsatz.

5.7.6 Berechnungshinweise

Tübbings aus Stahlfaserbeton eignen sich am besten für Tunnel mit geringer Beanspruchung, insbesondere geringer Biegebeanspruchung, und größere Dicke der Tübbings. Die Bemessung erfolgt für Längskraft mit Biegung und Schub nach der Richtlinie Stahlfaserbeton. Zur Schnittgrößenermittlung sind i. d. R. nicht-lineare Verfahren oder Verfahren der Plastizitätstheorie nötig, um Umlagerungen im System zu aktivieren.

Als maßgebend, neben dem Nachweis der Längsfugen im Endzustand, erweist sich häufig die Beanspruchung durch Vortriebspresenlasten, die hohe Spaltzugbeanspruchungen in Dickenrichtung der Tübbings und Scheibenbeanspruchungen (vgl. Kapitel 5.5.1) bewirken. Hier erfolgt häufig eine zusätzliche Eingabe von konventioneller Bewehrung (Kombinationsbewehrung).

Um die Biege- und Scheibenbeanspruchung der einzelnen Tübbings zu begrenzen, sollte das Verhältnis der Abwicklungslänge in Umfangsrichtung zur Tübbingbreite nicht zu groß gewählt werden. Scheibenbeanspruchungen aus Vortriebspresenlasten wirken nur kurzzeitig und stellen damit eine vorübergehende Einwirkung während der Bauzeit dar. Die hierbei ggfs. auftretenden Risse werden im Allgemeinen durch die Ringnormalkraft infolge des Ringspaltverpressdrucks und/oder Wasserdrucks im Endzustand vollständig überdrückt. Um ein möglichst weitgehendes Schließen dieser Risse aus Scheibenbeanspruchungen zu ermöglichen, ist die rechnerisch ermittelte Rissbreite zu begrenzen. Die Begrenzung der Rissweite kann dabei mit Hilfe der Richtlinie Stahlfaserbeton nachgewiesen werden.

Wesentliche Vorteile der Faserbewehrung liegen in der rechnerischen Begrenzung von Rissbreiten und dem erhöhten Umlagerungspotential des Rings durch Ausbildung rechnerischer, plastischer Gelenke.

6 Baulicher Brandschutz

6.1 Einführung

Erfordernis, Art und Umfang des baulichen Brandschutzes für eine Tunnelauskleidung ist stets im Zusammenhang mit den betrieblichen Schutzmaßnahmen (z. B. Verkehrsführung und -steuerung, Einfahrmöglichkeiten in Sicherheits-/Evakuierungszonen, Fluchtwegekonzeption, Branderkennung, Entrauchung, Lüftung, Zusammenwirkung mit Rettungskräften) gemäß den einschlägigen Regelwerken zu betrachten und entsprechend festzulegen.

Als zentrale Schutzziele des baulichen Brandschutzes im Tunnelbau werden in den einschlägigen Regelwerken die Sicherstellung einer ausreichenden Standsicherheit und ggf. auch der Gebrauchstauglichkeit (Dichtigkeit, Beschränkung bleibender Verformungen) während und nach einem Brandereignis genannt.

6.2 Einwirkungen

Messungen bei Brandversuchen in Tunnelanlagen sowie die nachträgliche Auswertung von realen Tunnelbränden zeigen, dass Tunnelbrände sich zum einen durch die Höhe der maximal erreichten Temperaturen und zum anderen durch den extrem schnellen Temperaturanstieg zu Beginn des Vollbrandes von Bränden im Hochbau unterscheiden.

Für die Beschreibung der thermischen Einwirkungen werden üblicherweise Temperatur-Zeit-Kurven für das Brandgasgemisch definiert. Bild 15 zeigt Temperatur-Zeit-Kurven einschlägiger Regelwerke.

6.3 Möglichkeiten zur Gewährleistung des baulichen Brandschutzes

Die verschiedenen Möglichkeiten zur Gewährleistung des baulichen Brandschutzes nach dem aktuellen Stand der Technik werden in [1], [58] und [59] ausführlich erläutert. Nachfolgend werden

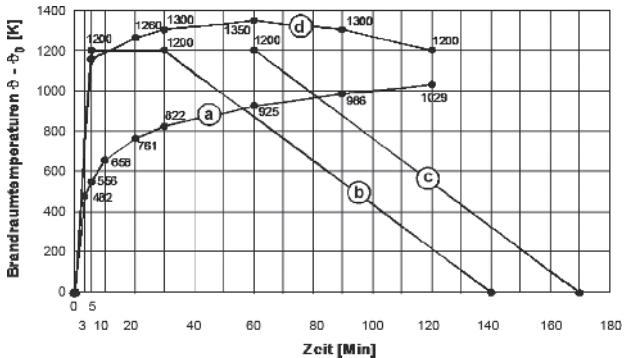


Bild 15. Temperatur-Zeit-Kurven einschlägiger Regelwerke; a: ETK, b: ZTV-ING, c: EBA, d: RWS

die wichtigsten Punkte daraus zusammenfassend dargestellt. Im Einzelnen geht es dabei um folgende Maßnahmen:

- Durch Bekleidungen mit Brandschutzplatten oder Brandschutzputzen, die wie eine zusätzliche Wärmeisolationsschicht wirken, kann verhindert werden, dass die innere Bewehrungslage wesentlich über 300 °C erwärmt wird. Bei Einhaltung dieses Kriteriums wird die Standsicherheit der Tunnelkonstruktion während des Brandes sichergestellt und es werden große bleibende Verformungen nach dem Brand vermieden.
- Durch Verwendung von Betonen mit hohem Brandwiderstand (z. B. durch Zugabe von PP-Fasern) kann bei entsprechend kleinen Abplatzungen die Betondeckung wie eine thermische Isolierung für die Bewehrung wirken. Der Nachweis ist durch großmaßstäbliche Brandversuche an einem repräsentativen Ausschnitt des Tunnelausbaus, durch rechnerische Standsicherheitsnachweise unter Berücksichtigung der im Brandfall zu erwartenden Abplatzungen oder einer Kombination der beiden Möglichkeiten nachzuweisen.

6.4 Brandschutzbekleidungen und Brandversuche

6.4.1 Brandschutzputze

Brandschutzputze sind aufgrund ihres Fasergehaltes relativ weich und elastisch und wirken bedingt rissüberbrückend. Schädliche Risse im Beton können daher nicht auf sie übertragen und bei den regelmäßig durchzuführenden Bauwerksinspektionen nicht erkannt werden. Befestigungselemente für Beschilderungen, Tunnelleitsysteme etc. durchdringen die Putzbekleidung. In diesen Bereichen sind Sonderkonstruktionen zum Brandschutz und zur Lastabtragung notwendig.

Um die Schutzwirkung von Brandschutzputzen zu gewährleisten, muss eine ausreichende Haftung am Bauteil durch Spritzputz, Haftvermittler oder Putzträger sichergestellt werden.

Putzbekleidungen besitzen eine Standzeit von 25 bis maximal 35 Jahren. Bei einer angenommenen Nutzungsdauer des Tunnels von 100 Jahren muss die Putzbekleidung zwei- bis dreimal erneuert werden.

6.4.2 Brandschutzplatten

Bei einer Plattenbekleidung ist die Befestigung Teil des Schutzsystems, da sie während des Brandes ihre Funktionsfähigkeit nicht verlieren darf, um ein Abfallen der Platten zu verhindern. Für den Nachweis der isolierenden Wirkung der Plattenbekleidung und der Tragfähigkeit der Befestigung sind Brandprüfungen erforderlich. Im Bereich von Tunneleinbauten müssen speziell angepasste Plattenbekleidungen vorgesehen werden.

Ähnlich wie bei den Brandschutzputzen beträgt die Standzeit von Plattenbekleidungen 25 bis maximal 35 Jahre, sodass innerhalb der Nutzungsdauer des Tunnels die Bekleidung zwei- bis dreimal erneuert werden muss. Besonderes Augenmerk ist auf die Befestigung der Brandschutzplatten unter dem Gesichtspunkt der Korrosionsbeständigkeit zu legen. Brandschutzplatten entziehen die darunter liegenden Betonflächen der Inspektion bzw. Bauwerksprüfung. Ihre Anwendung ist daher durchaus kritisch zu sehen.

6.4.3 Beton mit hohem Brandwiderstand

In letzter Zeit wurde ein ausreichender baulicher Brandschutz bei verschiedenen Verkehrstunneln durch vorlaufende Brandversuche an repräsentativen Ausschnitten der Tunnelschale nachgewiesen. Im Allgemeinen wurde dabei der Beton durch Zugabe von Polypropylenfasern (PP-Fasern) in brandschutztechnischer Hinsicht ertüchtigt, um die Abplatzungen im Brandfall zu minimieren. Dabei sollten mono- oder multifilamentale PP-Fasern mit rundem Querschnitt und glatter Oberfläche verwendet werden. Die Faserlänge sollte in einem Bereich von 2 bis 12 mm und der Durchmesser in einem Bereich von 12 bis 35 μm liegen.

Mit Stand 30.03.2012 wird in den Hinweisen zu den ZTV-ING, Teil 5 Abschnitt 1 und 2 (geschlossene und offene Bauweise) festgelegt, dass für einen erhöhten baulichen Brandschutz bei neuen Straßentunneln eine Ausführung der Innenschale mit Polypropylen-Faserbeton (PP-Faserbeton) grundsätzlich vorzusehen ist. Dabei sollen 2 kg PP-Fasern je m^3 Beton zugegeben werden. Die Fasern sollen eine Länge von 6 mm und einen Durchmesser von 0,016 bis 0,020 mm besitzen. Da in ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 3 (Maschinelle Schildvortriebsverfahren) im Kapitel „Baulicher Brandschutz“ auf den Abschnitt 1 verwiesen wird, sollten auch die vorgenannten Hinweise berücksichtigt werden.

Die Prüfkörper werden in der Brandkammer mit dem anzusetzenden Temperatur-Zeitverlauf (vgl. Kap. 6.2) beaufschlagt. Nach heutigem Kenntnisstand werden als Prüfkörper Tübbings mit den Abmessungen und der Betonzusammensetzung wie im späteren Tunnel verwendet. Außerdem wird der prognostizierte Spannungszustand im Tübbing näherungsweise mit Hilfe von Horizontal- und Radialpressen eingestellt. Bei kleinen Prüfkörpern und solchen ohne Belastung können im Versuch deutlich geringere Abplatzungen auftreten, als sie in Wirklichkeit zu erwarten sind.

Wenn die Abplatzungen im Versuch unter den oben genannten realen Bedingungen klein bleiben und die Bewehrung sich nicht

unzulässig erwärmt, kann dies im Regelfall als Kriterium für einen ausreichenden baulichen Brandschutz angesehen werden.

Ansonsten werden die Versuche in Anlehnung an DIN EN 1363 Teil 1 und Teil 2 [20], [1] und [58] durchgeführt.

Eine Bauwerksinspektion bzw. Bauwerksprüfung ist bei dieser Ausführungsart uneingeschränkt möglich.

6.4.4 Fazit

Brandschutzbekleidungen sind zwar grundsätzlich zur Gewährleistung des baulichen Brandschutzes geeignet, sie weisen aber – wie oben erläutert – eine Reihe von Nachteilen auf. Hervorzuheben sind dabei die sehr stark eingeschränkte Inspizierbarkeit der Tunnelkonstruktion und die im Vergleich zum Tunnel selbst deutlich geringere Nutzungsdauer.

In besonderen Fällen muss auch die Dichtigkeit des Tunnels im Brandfall gewährleistet werden, wenn andernfalls große Schäden auftreten können und die Wiederherstellung der Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks mit erheblichem Kosten- und Zeitaufwand verbunden ist (z. B. bei Untertunneltunneln). Bei der Verwendung von Brandschutzbekleidungen bleibt die Dichtigkeit – bei den im Verkehrswegebau üblichen Tübbingdicken (≥ 30 cm) – in jedem Fall erhalten. Aber auch mit Brandversuchen oder rechnerischen Verfahren kann der Erhalt der Dichtigkeit nachgewiesen werden. Abplatzungen sind dann durch eine geeignete Betonzusammensetzung so zu begrenzen, dass die maximale Temperatur im Bereich der Bewehrung unschädlich ist. Vorgaben sind in diesem Fall projektspezifisch festzulegen. Aufgrund der engen Fugenspalte ist der Temperaturanstieg für die außenliegenden Dichtungsprofile in der Regel unkritisch.

6.5 Rechnerische Untersuchungen

Die Tübbings können nach DIN EN-1992-1-2 nachgewiesen werden. Ein weiteres Verfahren zum Nachweis der Tübbingringe beim und nach dem Brand ist in Ril 853 aufgezeigt.

Bereits bei der Konstruktion und der Betonrezeptur sollte darauf geachtet werden, dass im Brandfall möglichst geringe Abplatzungen auftreten.

7 Dauerhaftigkeit

7.1 Anforderungen

Die Dauerhaftigkeit des Tunnelbauwerks setzt seine planmäßige Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit – unter angemessenem Instandsetzungsaufwand – über die gesamte Nutzungsdauer voraus. Nutzungsdauern von 100 Jahren und mehr sind dabei üblich. Kontroll- und Instandsetzungsmöglichkeiten sind i. d. R. nur in geringem Maße gegeben. Das gilt insbesondere für die nach Einbau nicht mehr zugänglichen erdberührten Flächen, Dichtungen und Seitenflächen. Dauerhaft zu erfüllen sind:

- Tragfähigkeit des Rings und seiner Einzelbauteile,
- Dichtigkeit gegen drückendes Wasser,
- Vermeidung von Abplatzungen, welche die Gebrauchstauglichkeit (z. B. Verkehrssicherheit) einschränken, aber auch tragfähigkeitsrelevant sein können,
- Vermeidung von übermäßigen Degradationen wie Korrosions- und Alterungsschädigungen in den Materialien Beton, Betonstahl (Profilstahl oder Fasermaterialien) bzw. Dichtungs- und Einbaubauteilen.

Die nachfolgenden zwei Abschnitte beschränken sich dabei auf den klassischen Tübbingausbau mit Tübbings als Stahlbeton-Fertigteile oder als Fertigteile aus stahlfaserbewehrtem Stahlbeton. Bezüglich der besonderen Eigenschaften von Profilstahl-Tübbings in Einbau, Korrosionsschutz, Übergängen usw. sei auf weiterführende Literatur verwiesen [2], [21], [43]. Die Dauerhaftigkeit der Fugenabdichtungen ist im Kap. 4 behandelt.

7.2 Alterungsmechanismen

Stahlbetontübbings sind einer fortwährenden Alterung aus beton- und stahlangreifenden Vorgängen ausgesetzt (vgl. [60], [61]). Die

Einzelmechanismen treten dabei meist in Kombination auf und können einander verstärken. Dazu gehören:

- Karbonatisierung der erdberührten Außenseiten bzw. luftseitigen Flächen,
- Sulfatangriff infolge sulfathaltigen Wassers bzw. sulfathaltigen Baugrunds mit lösender bzw. treibender Wirkung,
- Chloridangriff aus Tausalzen (z. B. in Portalnähe), salzhaltigem Umgebungswasser, ggf. Brandeinwirkungen und dadurch ausgelöst Korrosion der Bewehrungsstähle,
- mechanisch abrasive Verschleißbeanspruchungen der inneren Oberflächen und Kanten, auch unplanmäßiger Natur (z. B. auch durch Tunnelreinigungen),
- Degradationen aus thermischer Beanspruchung im klimatischen Wechsel wie Frost-Tau-Wechsel in Portalnähe,
- Kontaktkorrosion von Bewehrungsstahl mit Edelstahlbauteilen einer dauerhaften Längsverschraubung ist i. d. R. nicht von Bedeutung.

Unplanmäßige Rissbildungen und Abplatzungen aus Zwangswirkungen oder mechanischer Einwirkung wirken sich ungünstig auf die Alterungsvorgänge aus und sollten zugunsten eines geschlossenen Betongefüges mit geringer Porosität vermieden werden. Solche Fehlstellen können an Ecken, Kanten, den Ringfugenverzahnungen (Topf/Nocke, Nut/Feder) oder den Längsfugen auftreten.

Bei den für Tübbings üblichen Betonfestigkeiten bleibt die Depassivierungsfront der Karbonatisierung (pH-Werte von < 9) über die Nutzungsdauer meist innerhalb der üblichen Betondeckungswerte. Hingegen können bei ungünstigen Bedingungen Eindringtiefen von chloridhaltigem Wasser mit für die Bewehrungskorrosion relevanter Chloridionenkonzentration auch merklich oberhalb klassischer Betondeckungswerte liegen, was im Tübbing-Design zu berücksichtigen ist.

7.3 Empfehlungen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit

Folgende Randbedingungen sind im Sinne einer verbesserten Dauerhaftigkeit für Tübbings aus Stahlbeton bzw. stahlfaserverstärktem Stahlbeton empfehlenswert:

- Verwendung eines normalfesten Betons an der oberen Grenze des Festigkeitsspektrums (üblich: C40/50). Dieser muss als untere Schranke ausreichende Festigkeitseigenschaften gegenüber den planmäßigen Beanspruchungen bieten, gleichzeitig aber als obere Schranke genügend Verformungs- oder Arbeitsvermögen besitzen. Hochfeste Betone neigen bei unplanmäßigen Randpressungen in Einbau oder Transport stärker zu spröden Kanten- und Eckabplatzungen. Nachträglich ausgebesserte Schadstellen von Abplatzungen oder zu breite Risse sind häufig Schwachstellen in Bezug auf die Dauerhaftigkeit.
- Ein dichtes Betongefüge mit geringer Porosität ist gerade in den Betondeckungsbereichen anzustreben. Dies ist sicherzustellen durch:
 - die Betontechnologie (geringe w/z-Werte, abgestufte Sieblinien, usw.),
 - eine geeignete Herstellung im Werk, i. d. R. mit geschlossenen Stahlschalungen (Verdichtung, ausreichende Nachbehandlung, geschützte Lagerung). Der Nachbehandlung der Tübbingaußenseite kommt dabei besondere Bedeutung zu, da sich hier durch den Betonierprozess und von oben schließende Schalklappen Lufteinschlüsse sammeln können (saugende Schalsysteme an den Oberseiten bzw. manuelle Nachbehandlung und Entfernen von entmischtem Oberflächenbeton),
 - Einhalten von Ausschalfristen,
 - schädigungsvermeidenden Transport, Lagerung und Einbau (Vermeiden von Rissbildungen und nachträglichen Instandsetzungen).
- Betondeckungen sollten im Regelbereich an Außen- und Innenseiten $\min c = 40$ mm nicht unterschreiten. Ein auf die Fertigteilproduktion mit erhöhten Qualitätssicherungsstandards ausgerichtetes Vorhaltemaß von 5 mm ist zu berücksichtigen.

gen, was gerade für die im Produktionsbetrieb oben liegende Außenschale einzuhalten ist. Bei starkem Chlorid- bzw. Sulfatangriff sind z. T. erhöhte Betondeckungen nötig [60]. An den Stirnflächen (Ring- und Längsfugen) sind lokal reduzierte Betondeckungswerte bis min. $c = 20$ mm akzeptabel, wenn Beanspruchungen oberflächennah aufzunehmen sind, sodass Rissbildungen und Abplatzungen an den Dichtungen unterbleiben.

- Verwendung eines lagesichereren Bewehrungskorbs – mit Drahtgeflecht bzw. durch lokales Punktschweißen fixiert – unter Einhaltung der Abstandsvorgaben der Betondeckung und zu Einbauteilen. Industrialisierte Vorfertigungen mit Teilelementen aus Listenmatten und computerunterstützter Fertigung bieten sich an. Vermeidung unnötiger Transportwege.
- Vermeidung unplanmäßiger mechanischer Einwirkungen (Überlastungen, lokale Schädigungen) und unplanmäßige Expositionen (z. B. chlorid- oder sulfathaltiges Stau- oder Leckagewasser) durch fortlaufende Bauwerksüberprüfung und Instandhaltung im Betrieb.
- Begrenzung rechnerischer Rissbreiten (ZTV-ING Teil 5 ABs. 3 Nr. 8.2.1 (5)): Bei Tübbings grundsätzlich 0,2 mm, bei drückendem Grundwasser auf der benetzten Seite 0,15 mm.
- Einbezug nachträglicher Einbauteile und Verankerungsanschlüsse (Verankerung von Leitungen, Einbauten, Elektrifizierung usw.) in die Planungen zur Dauerhaftigkeit.

7.4 Besonderheiten bei der Verwendung von Stahlfasern

Die Stahlfasern können bei entsprechend aggressiver Umgebung korrodieren, die Korrosion ist allerdings auf den oberflächennahen Bereich begrenzt. Aufgrund der geringen Faserdurchmesser führen die Korrosionsprodukte nicht zu Absprengungen der Betonmatrix und die Korrosion schreitet nicht weit in die Tiefe vor.

Die Korrosion der Stahlfasern an der Betonoberfläche kann ggfs. ein ästhetisches Problem sein, ist aber ansonsten unbedenklich.

Entsprechend den Anwendungsgrenzen der Richtlinie Stahlfaserbeton ist bei aggressiver Umgebung (Expositionsklassen XS2, XD2, XS3 und XD3) eine ingenieurmäßige Dauerhaftigkeitsbemessung für die Nutzungsdauer des Tübbings zu erstellen.

Bei Straßentunneln ergibt sich jedoch durch die gemessenen großen Eindringtiefen des Chlorids ein erhebliches Dauerhaftigkeitsproblem.

8 Besonderheiten bei zweischaliger Auskleidung

In Deutschland werden nur noch selten Innenschalen als nachfolgende Auskleidung eingesetzt. Der Tübbingring muss auch beim zweischaligen Ausbau sämtliche Einwirkungen aufnehmen können. Lediglich der Nachweis auf Wasserdruck kann bei möglicher Drainagewirkung im Bauzustand (z. B. bei Tübbings ohne Abdichtung) entfallen.

Vorteile des zweischaligen Ausbaus:

- Beim Einsatz einer Folienabdichtung (KDB) wird ein vollständig wasserdichter Tunnel hergestellt.
- Der Tübbingring kann als vereinfachter Spartübbing vorgesehen werden (z. B. keine Bemessung auf nachträgliche Abgrabung und Bebauung), der häufig auch nicht wasserdicht sein muss.
- Die Befestigungen im Tunnel (Ankerschienen, Dübel, Stahlplatten) können kostengünstiger ausgeführt werden. Die Planung der genauen Befestigungspunkte kann später (unmittelbar vor Einbau der Innenschale) erfolgen.
- Der Brandschutz wird durch die Innenschale gesichert. Nach einem Brandereignis kann die Innenschale erneuert werden.
- Die Querschläge, Lüftungs- und Rettungstollen und -schächte und der Übergang an den Portalen kann einfacher hergestellt werden.

Nachteile des zweischaligen Ausbaus:

- Die Innenschale kann üblicherweise erst nach Vortriebsende der jeweiligen Röhre hergestellt werden. Dies erfordert eine längere Bauzeit und bedingt zusätzliche Kosten.

- Wenn die Tübbingschale über längere Zeit die Einwirkungen aus Gebirgs- und Wasserdruck alleine aufnehmen muss, erhält die Innenschale nach dem Einbau nur die Einwirkungen aus Eigengewicht und Einbauten. Da meist nur eine geringe Normalkraft in der Schale vorhanden ist, können größere Schwindrisse auftreten.
- Bei nachträglich auftretenden Einwirkungen, z. B. durch Abgrabungen oder Bebauung, ist die Verteilung der Einwirkungen auf Außen- und Innenschale nicht eindeutig festzulegen.
- Die genaue Lage von Leckagen ist nach Einbau der Innenschale schwer festzustellen.
- Der Nachweis, ob zwischen Außen- und Innenschale ein Schubverbund besteht oder auch der Nachweis, dass kein Schubverbund besteht, ist schwierig zu führen. Falls ein Schubverbund zwischen Innen- und Außenschale rechnerisch benötigt wird, ist bisher keine befriedigende konstruktive Lösung zur Sicherstellung des Schubverbunds bekannt.

9 Sonderkonstruktionen (Querschläge, Stahltübbings, Übergang offene Bauweise)

9.1 Querschläge

9.1.1 Einführung

Querschläge bei Tunnelröhren mit Betontübbingausbau dienen als Fluchttunnel zwischen zwei Röhren oder zu Notausstiegen, als Verbindung zu Treppenaufgängen oder als Betriebsräume. Die Querschläge werden meist in Spritzbetonbauweise, seltener als Rohrdurchpressung ausgeführt. Die Ausbildung der Querschläge selbst weist wenige Besonderheiten auf. Problematisch sind dagegen die Übergänge zwischen Tübbingausbau und Querschlag in konstruktiver und statischer Hinsicht, worauf im Folgenden ausschließlich eingegangen wird. Eine ähnliche Problematik tritt oft auch bei Schachtanschlüssen, Nischen, Nothalte- und Pannbuchten sowie Pumpensäumpfen auf.

9.1.2 Anordnung der Querschlagsöffnung

Die optimale Ausbildung einer Querschlagöffnung hängt stark von den gegebenen Randbedingungen ab (Querschnitt von Haupttunnel und Querschlag, Geometrie des Tübbingausbaus und Lage von Längsfugen, Herstellung und Ausbau des Querschlags, erforderliche Durchgangsöffnung, Leitungsführungen, Gebirgsart, Wasserdruck, Abdichtungskonzept für den Querschlag, Zahl der Querschläge, Bauablauf, Vorgaben für Korrosions- und Brandschutz u. a.). Die Ober- und Unterkanten der Querschläge bzw. deren Übergänge sollten nach Möglichkeit innerhalb der des Tübbingtunnels liegen. Günstig ist, wenn die Höhenlage der Querschlagsachse in etwa mit der Höhenlage der Tunnelachse des Tübbingtunnels zusammenfällt.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Sondertübbingringe mit Stahltübbings im Querschlagsbereich vorzusehen oder Normaltübbingringe (eventuell mit verstärkter Bewehrung und zusätzlichen Verschraubungen/Verdübelungen) einzubauen, aus denen die Querschlagöffnung entnommen oder herausgesägt wird.

Werden Sondertübbingringe vorgesehen, ist es vorteilhaft, die Anordnung von Querschlägen im Bereich von Parallelringen mit einheitlicher Breite vorzusehen. Bei keilförmigen Ringen sind die Lage und Reihenfolge der Ringe vorab festzulegen bzw. einzuschränken. Der Schlussstein sollte auf der Gegenseite der Querschlagöffnung liegen. Um die Zahl von Sondertübbings zu reduzieren, ist eine spiegelbildliche Anordnung der Tübbings im Querschlagsbereich in beiden Tunnelröhren anzustreben. Es ist zu beachten, dass dadurch in beiden Röhren im Bereich der Sondertübbings die Möglichkeit der Richtungskorrektur für die TBM entfällt bzw. eingeschränkt ist.

Soll aus dem Tübbingtunnel heraus eine Bodenvereisung erfolgen, so sind die Anordnung und Lage der Vereisungsplanzen bei der Ausbildung des Querschlags und der Tübbings sowie etwaige auf den Tübbingtunnel wirkende Vereisungsdrücke in den statischen Nachweisen zu berücksichtigen.

9.1.3 Abfangung der Tübbings

Die Tübbingringe werden im Bereich der Querschlagöffnung bleibend unterbrochen. Die Normalkräfte werden im Endzustand in der Regel über einen Ortbetonrahmen oder einen Rahmen aus Stahl- oder Gusstübbings abgetragen. Da ein Ortbetonrahmen erst nach Ausbruch der Querschlagöffnung hergestellt werden kann, erfordert diese Lösung zusätzlich eine temporäre Abfangung der Tübbings im Bauzustand. Diese kann durch Stahlringe, Profilträgerböcke oder Rahmen quer zur Tunnelachse („Igel“) erfolgen. Möglich ist auch, eine Verschraubung oder Verdübelung der Tübbings in den Ringfugen mit Hilfe von speziellen Verbindungsstrukturen in den Betontübbings vorzusehen.

Werden Tübbingrahmen oder eine Verdübelung bzw. Verschraubung im Bau- und Endzustand als Abfangung verwendet, so ist in allen Bauphasen die Bettung der lastaufnehmenden Ringe in der Ulme zu gewährleisten.

Wird der gesamte Kreuzungsbereich vereist oder mit DSV bzw. Injektionen verfestigt, so kann durch diese Bodenverfestigung evtl. die provisorische Abfangung ersetzt oder die abzufangende Last kann auf das Eigengewicht der Tübbings und einen Auflockerungsdruck reduziert werden.

In der Berechnung ist darauf Rücksicht zu nehmen, dass im Bereich der Öffnung, und möglicherweise darüber hinaus, die Lasteinwirkung und Bettung nicht mehr vorhanden sind, wodurch das Tragsystem des Tübbingrings gestört ist.

9.1.4 Stahlübbingrahmen

Sondertübbings aus Stahl müssen die Ringbreite der Standardtübbings haben, ggf. sind kleinere Tübbings durch zusätzliche Sonderelemente zur vollen Ringbreite zu ergänzen. Die Verschraubung der Ring- und Längsfuge muss mit den Betontübbings korrespondieren. Auch die Längsfugen sind auf die Betontübbings abzustimmen. In Verlängerung der TBM-Pressen sind die Stahlübbings entsprechend auszusteifen. Der Außendurchmes-

ser der Sondertübbings muss wegen der Schildschwanzdichtung den Standardringen entsprechen, der Innendurchmesser kann gleich oder größer ausgeführt werden.

Bei der Wahl des Innendurchmessers ist vorab zu klären, welche Anforderungen an Korrosions- und Brandschutz gestellt werden. Für den Korrosionsschutz sind Beschichtungen, ein Dickenzuschlag bei der Blechdicke oder eine Betonummantelung gebräuchlich. Für den Brandschutz kommen Spezialputze, Brandschutzplatten oder eine Betonummantelung in Frage. Um das Lichtraumprofil nicht einzuschränken, wird bei einer Ausführung mit Betonummantelung und Brandschutzplatten meist der Innendurchmesser der Sondertübbings vergrößert.

Üblicherweise haben auch Sondertübbings umlaufende Elastomerprofile als Dichtung. Daher ist eine Dichtungsnut entsprechend den Betontübbings auszubilden. Einspringende Ecken sind nicht möglich. Außerdem ist wichtig, dass das Dichtungsprofil beim Ausbau der Fülltübbings nicht beschädigt wird.

Die Stahlübbingrahmen werden im Bauzustand auch zur Abfangung der Tübbingröhre eingesetzt. Dazu ist eine ausreichende seitliche Bettung der Ringe erforderlich. Die erforderliche Bettungsbreite ist von der Auflast, dem Querschnitt des Haupttunnels, der Breite des Übergangsrähmens und der anstehenden Geologie abhängig.

Spätestens vor dem Ausbau der Fülltübbings in der späteren Querschlagsöffnung werden die einzelnen Stahlübbings durch HV-Schraubverbindungen zu einem biegesteifen Rahmen verbunden. Dazu sind entsprechende Montageöffnungen erforderlich.

9.1.5 Verschraubung oder Verdübelung in den Ringfugen

Bei Anordnung von Sondertübbings lassen sich die Tübbings ober- und unterhalb der Querschlagöffnung in den Ringfugen kraftschlüssig verschrauben oder verdübeln. Durch die Kopplung können die Normalkräfte der unterbrochenen Tübbingringe auf die benachbarten Ringe übertragen werden.

Derartige Konstruktionen können sowohl nur für den Bauzustand als auch für den Endzustand ausgelegt werden. Dienen sie lediglich zur Lastabtragung im Bauzustand, so müssen die Ringkräfte der Tübbings im Endzustand durch einen Ortbetonkragen innerhalb der Öffnung (Konsole) aufgenommen werden. Werden die Verbindungen für den Endzustand angesetzt, so sind besondere Anforderungen an den Brandschutz und Korrosionsschutz zu stellen.

Da die Lastübertragung in den Ringfugen zwischen den benachbarten Ringen eine hohe lokale Beanspruchung ergibt, sind für die Lasteinleitung in die Betontübbings üblicherweise besondere Vorkehrungen zu treffen und die Bewehrung entsprechend auszubilden. Die Belastung dieser Sondertübbings bedingt in der Regel hohe Bewehrungsgehalte.

In Abhängigkeit der geotechnischen und geometrischen Randbedingungen treten an den Kopplungsstellen in den Ringfugen neben den Kräften in tangentialer Richtung (Normalkräfte in Ringrichtung) auch Kräfte in radialer Richtung (Querkräfte in Richtung der Tübbingdicke) auf. Letztere bestimmen häufig die Größe der Tragfähigkeit und somit die Einsatzmöglichkeit einer solchen Konstruktion.

9.1.6 Stahlkonstruktionen

Stahlrahmen um Öffnung

Stahlrahmen um eine Querschlagöffnung werden entweder innerhalb des Haupttunnelquerschnitts oder in der Mittelfläche der Tübbingschale angeordnet.

Die Anordnung innerhalb des Querschnitts bedingt die Krafteinleitung über Konsolen o. ä. vom Tübbingausbau in die Abfangkonstruktion. Außerdem muss die Konstruktion kraftschlüssig eingebaut werden (evtl. Vorspannen der Stiele), die Durchbiegung der Riegel berücksichtigt werden und bei gekrümmten Stielen die Betung gewährleistet sein. Besteht die Hauptröhre aus keilförmigen Ringen, so beschreibt der Tunnel eine Raumkurve. Dies ist bei der Ausbildung des Rahmens und der Konsolen zu berücksichtigen (Bild 16).

Stahlringe

Stahlringe innerhalb des Lichtraumprofils des Tübbingtunnels zur provisorischen Abfangung einer Tübbingröhre sind nur für kleine Lasten geeignet, da sie sehr weich sind und eine ausreichende Bettung benötigen. Konstruktiv müssen die Ringe kraftschlüssig an die Tübbings angeschlossen werden (Mörtelkissen, Keile o. ä.).

Profilträgerböcke

Tragfähiger als Stahlringe sind Profilträgerböcke. Die Anordnung der Stiele ist auf den Baubetrieb abzustimmen (Durchfahrtsöffnung, Fahrweg). Die Einhaltung einer bestimmten Fahrbahnhöhe ist vor allem bei Gleisbetrieb wichtig. Bei der Ausbildung von Stahlkonstruktionen hängen der Montagevorgang und das mögliche Gewicht der Einzelteile von den verfügbaren Geräten ab. Sicherheitsrelevante Stützen neben Fahrwegen müssen im Allgemeinen gegen Fahrzeuganprall gesichert werden.

Statisch ist die konzentrierte Lasteinleitung in den Rahmenecken oft problematisch. Möglich ist auch eine Kombination von Stahlringen und Profilträgerböcken.



Bild 16. Stahlübbings um eine Querschlagöffnung

Igelkonstruktionen

Werden die Stahlringe als steife, rechteckige Unterstütsungsrahmen mit Ringsumauflagern für Längsträger ausgebildet, spricht man von Igelkonstruktionen. Ein bis zwei Igel werden meist seitlich der Querschlagöffnung angeordnet und die Tübbingschale im Bereich des Querschlags mit längslaufenden Profilträgern abgestützt. Die Längsträger lagern auf den Unterstütsungsrahmen auf und können oftmals mit hydraulischen Pressen gegen diese vorgespannt werden. Durch die individuelle Möglichkeit der Vorspannung und Nachregulierung handelt es sich um eine sehr komfortable Lösung. Sie war in der Anfangszeit des Tübbingausbaus eine Standardausführung. Aus Kostengründen wird sie heute nur noch selten angewandt.

9.1.7 Ortbetonrahmen

Ortbetonrahmen am Übergang zwischen Tübbingtunnel und Querschlag werden häufig als endgültige Abfangung der Tübbingröhre verwendet. Maßgebend für die konstruktive Ausbildung sind die Höhenlage und Tübbingteilung der Hauptröhre sowie die Höhenlage des Querschlags. Zusätzlich zur lichten Durchgangshöhe muss über und unter der Öffnung eine ausreichende Konsolhöhe zur Abfangung der Tübbingringe vorhanden sein. Probleme machen teilweise erforderliche Kabelleer- oder Entwässerungsrohre in der Sohle, die die untere Konsole schwächen.

Für StahlTübbingrahmen dient der Ortbetonrahmen zusammen mit der Innenschale des Querschlags als unnachgiebige Bettung.

Beim zweischaligen Ausbau dient meist die vorab hergestellte Ortbetoninnenschale mit Öffnungen als bauzeitliche und endgültige Abfangung der Tübbingröhre im Querschlagsbereich.

9.1.8 Querschlagöffnung herstellen

Füllelemente verschließen die spätere Querschlagöffnung während des Vortriebs und werden anschließend entfernt. Die Öffnung wird meist mit StahlTübbings verschlossen. Möglich sind jedoch

auch Betonelemente. Bei der Planung einer Querschlagöffnung ist bereits der Ausbau der Füllelemente zu berücksichtigen.

Es ist auch möglich, die Öffnung in normalen Stahlbetontübbings mit Hilfe von tangierenden Kernbohrungen oder Sägeschnitten entlang der Öffnungskontur herzustellen.

9.1.9 Dichtungsanschlüsse

Bei der Planung des Dichtungsanschlusses zwischen Querschlag und Tübbingausbau sind die Höhe des Wasserdrucks und die Art der Abdichtung des Querschlags entscheidend. Möglich ist der Ausbau der Querschläge mit einer Innenschale aus WU-Beton (WUBK) mit oder ohne zusätzliche Abdichtung mittels Kunststoffdichtungsbahnen (KDB).

Eine technische Möglichkeit der Abdichtung ist das Ankleben der Kunststoffdichtungsbahn des Querschlags auf die entsprechend vorbereitete Außenseite der Tübbingringe außerhalb der Querschlagöffnung und eine zusätzliche Befestigung mittels einer Los-Festflanschkonstruktion. Diese Lösung hat bei Betontübbings den Nachteil, dass die Tübbingaußenseite meist rau und in einer Richtung gewölbt ist und die Klemmkonstruktion mehrmals Tübbingfugen kreuzt. Diese Fugen müssen bis auf die Tiefe des Dichtungsprofils gereinigt und verfüllt werden, um eine Unterläufigkeit der Klemmkonstruktion zu vermeiden. Die Verfüllung mit Spezialmörtel ist nur bei geringen Wasserdrücken empfehlenswert. Auf jeden Fall sollte ein zusätzlicher Verpressschlauch angeordnet werden. Für höhere Drücke kommt eine PU-Kunstharzverfüllung in Frage. Hier ergeben sich jedoch erhebliche Probleme bei der Fugenverfüllung über Kopf. Auch haftet PU nicht auf der Elastomerdichtung.

Sind rund um die Querschlagöffnung Stahlübbings angeordnet, so kann auch auf der Tübbingaußen- oder -stirnseite nachträglich ein Losflansch mit Fugenband oder ein abstehender Stahlflansch angebracht werden.

Los-Festflanschkonstruktionen können allgemein nur für Wasserdrücke bis ca. 3,5 bar eingesetzt werden.

Zwischen Haupttunnel und Querschlag sind im Allgemeinen Setzungsunterschiede möglich. Die Dehnfuge zwischen Haupttunnel und Querschlag wird bei Ausbildung eines Stahlbetonrahmens vorteilhaft zwischen diesem und dem Regelquerschnitt des Querschlags angeordnet.

9.1.10 Sicherheitsverschlüsse

Sicherheitsverschlüsse der Querschlagöffnungen gegen Wasser einbruch während der Bauzeit werden teilweise von Bauherren gefordert und sind sehr aufwendig. Die Verschlüsse müssen auf Wasserdruck dimensioniert werden und sind daher sehr schwer. Andererseits müssen sie im Gefahrenfall schnell und leicht zu schließen sein. Die Vorspannkraft für die Dichtung wird meist durch den Wasserdruck erzeugt. Ausgeführt wurden seitlich verschiebbare Notschotte (Wesertunnel) oder oberhalb der Öffnung angeordnete Klapp- bzw. Falltore (Westerscheldetunnel).

9.2 Stahltübbings

9.2.1 Einführung

In der Vergangenheit wurden „Stahl“-Tübbings meist als Guss-tübbings aus Sphäroguss hergestellt. Trotz der stahlähnlichen Eigenschaften des Sphärogusses handelt es sich dabei nicht um Stahlbauteile. Heute werden vermehrt Stahltübbings aus gewalzten Stahlblechen, die zu einem Tübbing verschweißt werden, gefertigt. Stahltübbings werden in der Regel dort eingesetzt, wo aufgrund der Belastung oder der geologischen Verhältnisse der Tunnelausbau einer extremen Belastung ausgesetzt ist, welche durch Stahlbetontübbings nicht mehr aufgenommen werden kann.

9.2.2 Ausbildung

Aus Walzblechen verschweißte Stahltübbings bestehen in der Regel aus einem außen liegenden Mantelblech, welches die dichte Hülle des Tunnelausbaus bildet. Auf der Innenseite sind Stegble-

che in Umfangs- und in Tunnellängsrichtung angeordnet, sodass eine Art Kassettenübbing entsteht. Die in Umfangsrichtung angeordneten Stegbleche nehmen zusammen mit dem Mantelblech die Ringkräfte bestehend aus Normalkraft, Moment und Querkraft auf. Die in Tunnellängsrichtung angeordneten Stegbleche dienen zur Durchleitung der Normalkräfte in Tunnellängsrichtung, z. B. Pressenkräfte der TVM.

Sowohl in den Längs- als auch in den Ringfugen werden die Stahl-tübbings mit Hilfe von Schrauben verbunden. Je nach Anzahl und Vorspannung der Schrauben können die Verbindungen biegesteif und schubfest ausgebildet werden.

In einem Tübbingring können entweder nur einzelne Stahlbetontübbings durch Stahl-tübbings ersetzt werden (s. Kap. 9.1.4) oder der gesamte Ring kann aus Stahl-tübbings ausgebildet werden.

Die Abdichtung zwischen den Stahl-tübbings erfolgt analog zu Stahlbetontübbings mit einem Dichtungsrahmen, der sich in einer Dichtungsnut befindet.

9.2.3 Herstellung

Verfahrensbedingt ergeben sich bei der Herstellung der Stahl-tübbings Randbedingungen, die bereits bei der Planung zu berücksichtigen sind.

Die einzelnen Bleche werden zunächst geschnitten und anschließend zu Tübbings zusammengeschweißt. Durch das Schweißen ergeben sich Spannungen und Verzug in den Blechen und den gesamten Tübbings. Daher wird die endgültige Außenkontur erst nach dem Schweißen durch Fräsen ausgebildet. Die Tübbings werden dabei so ausgerichtet, dass möglichst wenig Material abgefräst wird. Auch die Löcher für die Verschraubungen werden in diesem Arbeitsschritt gebohrt. Somit ist gewährleistet, dass die Tübbings exakt zusammenpassen.

Bei der Wahl der Blechdicken muss das Maß für das Abfräsen berücksichtigt und auch eine gewisse Toleranz beachtet werden.

Es muss gewährleistet sein, dass nach dem Fräsen die statisch angesetzte Mindestdicke der Bleche erhalten bleibt.

9.2.4 Einbau

Der Einbau von Stahlübbings stellt sich gegenüber dem Einbau von Stahlbetontübbings deutlich aufwendiger dar. Dies liegt an den geringen Toleranzen für die Verschraubung, welche einen sehr exakten Ringbau erzwingen. Der Einbau der zahlreichen Verschraubungen ist sehr zeitintensiv. Alle Schrauben müssen auf ihre erforderliche Vorspannung angezogen werden. Dies senkt die Vortriebsleistung deutlich ab. Für den Einbau der Stahlübbings mit dem Erektor sind meist spezielle Adapterplatten erforderlich.

Aufgrund der Herstellung der einzelnen Tübbings können sich auf der Innenseite zwischen den benachbarten Tübbings Versätze einstellen, obwohl die Verschraubungen exakt zueinander passen und somit auch das Dichtungsprofil ideal aufeinander liegt.

9.3 Übergang zu offenen Bauweisen (Stationen, Portale)

9.3.1 Einführung

Stationen, Portale und andere Sonderbauwerke werden in der Regel als Ortbetonkonstruktion hergestellt. Um einen dichten Anschluss zwischen dem Tübbingausbau und der Ortbetonkonstruktion herzustellen, ist eine spezielle Übergangskonstruktion erforderlich. Diese wird in der Regel mit Hilfe von Dichtungsfugenbändern bewerkstelligt. Grundsätzlich ist dabei zu unterscheiden, ob die Dichtungskonstruktion von außen zugänglich und auswechselbar oder ob diese in der Ortbetonkonstruktion integriert und nicht mehr zugänglich sein soll.

9.3.2 Auswechselbare Dichtungskonstruktionen

Von außen zugängliche und auswechselbare Dichtungskonstruktionen lassen sich nur mit Hilfe einer Klemmkonstruktion

und eines Omega-Fugenbandes bewerkstelligen. Hierzu sind aufwendige Los-Festflanschkonstruktionen erforderlich. Sowohl auf Seiten des Tübbingausbaus als auch auf Seiten der Ortbetonkonstruktion sind hierzu entsprechende Festflansche anzuordnen. Mit Hilfe eines Losflansches wird daran beidseitig ein Fugenband befestigt.

Aus Korrosionsschutzgründen müssen die Flanschkonstruktionen in der Regel aus nichtrostendem Stahl ausgeführt werden.

Da solche Konstruktionen technisch sehr aufwendig und in der Regel keine Verformungen zwischen Anschlussblock und Tübbingtunnel zu erwarten sind, wird meist darauf verzichtet.

Aus brandschutztechnischen Gründen ist meistens das Fugenband mit Hilfe von geeigneten Brandschutzvorkehrungen (Brandschutzmatten) vor Brandeinwirkungen zu schützen.

9.3.3 Dauerhafte Dichtungskonstruktionen

Besser geeignet sind Konstruktionen, bei denen ein Fugenband direkt in die Ortbetonkonstruktion einbindet. Auf der Seite des Tübbingausbaus sollte die Dichtungskonstruktion auf den Dichtungsrahmen des angrenzenden Tübbingrings geflanscht werden. Das freie Ende des Fugenbandes bindet in der Regel in die Ortbetonkonstruktion aus WU-Beton ein. Alternativ kann das Fugenband auch mit einer außen liegenden Abdichtungsfolie verbunden werden.

Um eventuell auftretende Verschiebungen zwischen Ortbetonkonstruktion und Tübbingausbau aufnehmen zu können, sollte die Fuge zwischen Tübbingausbau und Ortbetonbauwerk als Dehnfuge ausgebildet werden. Entsprechende komprimierbare Materialien und Fugenbänder, welche die Bewegungen aufnehmen können, sollten hierzu verwendet werden (Bild 17).

Besondere Brandschutzvorkehrungen sind in der Regel nicht erforderlich, da das Fugenband ausreichend durch die Ortbetonkonstruktion geschützt ist.

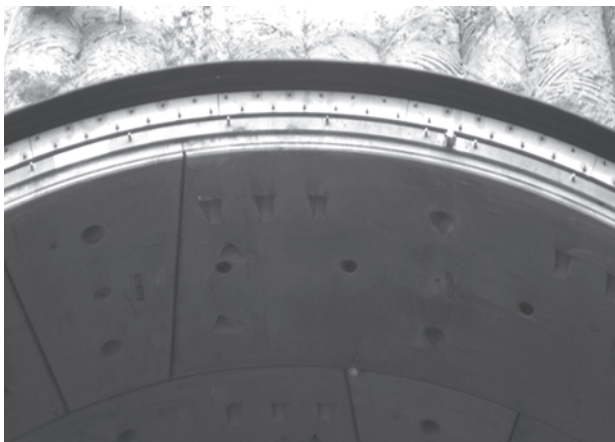


Bild 17. Flanschkonstruktion am Übergang zur Ortbetonbauweise, Bsp. Katzenbergtunnel

Für ein eventuell erforderliches nachträgliches Abdichten sollten wie bei jeder Fugenkonstruktion entsprechende Verpressschläuche angeordnet werden.

10 Regelwerke, Normen und Publikationen

10.1 Regelwerke, Normen und Richtlinien

- [1] Deutsche Bahn AG: Richtlinie Eisenbahntunnel planen, bauen und in Stand halten, Ril 853, gültig ab 01.12.2012.
- [2] Bundesministerium für Verkehr: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln (ZTV-ING) – Teil 4, Stahlbau, Stahlverbundbau, Abschnitt 3: Korrosionsschutz von Stahlbauten (2007), Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST).
- [3] Bundesministerium für Verkehr: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln (ZTV-

- ING) – Teil 5, Tunnelbau, Abschnitt 3 Maschinelle Schildvortriebsverfahren, 2007.
- [4] DIN-EN-1990 (Eurocode 0): Grundlagen der Tragwerksplanung: 2010–12.
 - [5] DIN EN 1990/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, 2010–12.
 - [6] DIN EN 1991-1-1 (Eurocode 1): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1–1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. Dezember 2010.
 - [7] DIN EN 1991-1-2 (Eurocode 1): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1–2: Allgemeine Einwirkungen Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Dezember 2010.
 - [8] DIN EN 1992-1-1 (Eurocode 2): Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1–1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Januar 2011.
 - [9] DIN EN 1992-1-2 (Eurocode 2): Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Dezember 2010.
 - [10] DIN EN 1992-1-1/NA, Nationaler Anhang Nationale festgelegte Parameter Eurocode 2, Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1–1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2013–04.
 - [11] DIN EN 1997-1 (Eurocode 7): Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, 2009–09.
 - [12] DIN EN 1997-1/NA Nationaler Anhang National festgelegte Parameter Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik Teil 1: Allgemeine Regeln, Ausgabe 2010–12.
 - [13] DIN EN 196, Prüfverfahren für Zement, Ausgabe 2005-05.
 - [14] DIN EN 206, Beton; Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung und Gütenachweis; Ausgabe 2012-03.
 - [15] DIN EN 450, Ausgabe 1994, Flugasche für Beton; Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung.
 - [16] DIN 1048, Ausgabe 6.91, Prüfverfahren für Beton.
 - [17] DIN 1054, Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.
 - [18] DIN 1084, Ausgabe 12.78, Überwachung (Güteüberwachung) im Beton- und Stahlbetonbau.
 - [19] DIN 1164, Teil 8, Ausgabe 11.78, Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Trasszement.

- [20] DIN EN 1363: Feuerwiderstandsprüfungen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren; Ausgabe 1999-10.
- [21] DIN EN ISO 12944-4, Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme, Teil 4: Arten von Oberflächen und Oberflächenvorbereitung (1998), Beuth Verlag, Berlin.
- [22] DIN EN 14889-1 Fasern für Beton – Teil 1: Stahlfasern; Ausgabe 2006-11.
- [23] DIN 4020, Ausgabe 12. 2010, Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2 (mit einem Beiblatt).
- [24] DIN 4030, Ausgabe 6.91, Beurteilung betonangreifender Wasser, Böden und Gase.
- [25] DIN 4035, Ausgabe 7.90, Stahlbetonrohre, Stahlbetondruckrohre und zugehörige Formstücke.
- [26] DIN 4226, Ausgabe 4.83, Zuschlag für Beton.
- [27] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau, September 1996.
- [28] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie für Fließbeton, Herstellung, Verarbeitung und Prüfung, August 1995
- [29] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel, August 1995.
- [30] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton, September 1989.
- [31] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: *Leonhardt, Reimann*; Betongelenke. Versuchsbericht, Vorschläge zur Bemessung und konstruktiven Ausbildung. DAfStb Heft 175, Berlin, 1965.
- [32] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStB-Richtlinie Stahlfaserbeton, 2010, Berlin und Gelbdruck 2014.
- [33] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Hilfsmittel zur Berechnung von Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken. DAfStB Heft 240, Berlin, Juli 1988.
- [34] Deutscher Beton-Verein, Betongelenke im Brückenbau. Bericht zum DBV Forschungsbericht 279, Schriftenreihe des DBV Heft 18, Juli 2010.
- [35] Deutscher Beton-Verein: Merkblatt Wasserundurchlässige Baukörper aus Beton. Juni 1996.
- [36] Deutscher Beton-Verein: Merkblatt Zugabewasser für Beton, Fassung Januar 1982, redaktionell überarbeitet 1996.

- [37] Deutscher Beton-Verein: Merkblatt Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons, Fassung August 1992, redaktionell überarbeitet 1996.
- [38] Deutscher Beton-Verein: Merkblatt Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau, Fassung September 1992, redaktionell überarbeitet 1996.
- [39] Deutscher Beton-Verein: Sachstandsbericht „Stahlbetoninnenschalen im U-Bahn-Bau“, Oktober 1994.
- [40] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton, Oktober 2001, Berlin.
- [41] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, DBV-Merkblatt Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau, 1996, Berlin.
- [42] Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST): TL/TP-DP, Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Ingenieurbauten Teil 5, Abschnitt 3, Dichtungsprofile 12/2007.
- [43] Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST): TL/TP-KOR-Stahlbauten, Technischen Lieferbedingungen und Technischen Prüfvorschriften für Beschichtungsmittel für den Korrosionsschutz von Stahlbauten (2002), Anhang E, Blatt 81 und 87, Verkehrsblatt Verlag, Dortmund.
- [44] ZTV-Riss 93, Verkehrsblatt-Verlag, 1993.
- [45] ÖVBB Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Richtlinie: Wasserundurchlässige Betonbauweise – Weiße Wannen, März 2009.
- [46] ÖVB Österreichische Bautechnik Vereinigung, Richtlinie: Innenschalenbeton; Dezember 2012.
- [47] ÖVBB-Richtlinie: Spritzbeton, Dezember 2009.
- [48] ÖVBB-Richtlinie: Tübbingsysteme aus Beton, August 2009.
- [49] ÖBV-Richtlinie: Tunnelabdichtung; Dezember 2012.
- [50] ÖVBB-Merkblatt: Schutzschichten für den erhöhten Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke; November 2006.

10.2 Publikationen

- [51] *Leonhardt, F.*: Vorlesungen über Massivbau, zweiter Teil, Sonderfälle der Bemessung im Stahlbetonbau. 3. Aufl. Berlin: Springer 1986.
- [52] *Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., Wehrmeyer, G.*: Kap. 6, Tunnelauskleidung. In: Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb. 2. Aufl. Berlin: Ernst und Sohn 2011.
- [53] *Duddeck, H.*: Empfehlung zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein (1980). Herausgegeben vom Arbeitskreis „Tunnelbau“ der Deut-

schen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. Die Bautechnik 57 (1980), H. 10, S. 349–356.

- [54] *Philipp, G.*: Schildvortrieb im Tunnel- und Stollenbau. Tunnelbau 1986, S. 309–370, 1987, S. 211–274.
- [55] *Baumann, T.*: Tunnelauskleidungen mit Stahlbetontübbing. Bautechnik 69 (1992), H. 1, S. 11–20.
- [56] *Dahl, J., Nußbaum, G.*: Neue Erkenntnisse zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit von Tübbings im Bereich der Koppelfugen. Tunnelbau 1997, S. 291–319.
- [57] *Tirpitz, E.-R.*: Zur Biegesteifigkeit von Tunnelröhren aus Stahlbetontübbing am Beispiel der 4. Röhre des Elbtunnels, Hamburg. 1. Dresdner Baustatik-Seminar, Dresden, 1997.
- [58] *Schuck, W., Städing, A.*: Bemessung von Eisenbahntunneln auf der Grundlage des Teilsicherheitskonzepts nach der RIL 853. Tunnelbau 2006, S. 93–141.
- [59] *Schuck, W., Haack, A., Richter, E., Städing, A.*: Baulicher Brandschutz bei Eisenbahntunneln mit einschaligem Tübbingausbau. Taschenbuch für den Tunnelbau 2011. Essen: VGE Verlag GmbH 2010.
- [60] *Raupach, M., Orlowsky, J.*: Schutz und Instandsetzung von Betontragwerken. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH 2008.
- [61] *Stark, J., Wicht, B.*: Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff. Basel: Birkhäuser Verlag 2001.
- [62] STUVA-Empfehlung für die Prüfung und den Einsatz von Dichtungsprofilen in Tübbingauskleidungen, Tunnel 8/2005.
- [63] *Janßen, P.*: Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbing. Bericht Nr. 83–41 aus dem Institut für Statik der Technischen Universität Braunschweig 1983.
- [64] *Mark, P., Schnütgen, B.*: Grenzen elastischen Materialverhaltens von Beton. Beton- und Stahlbetonbau 96 (2001), H. 5, S. 373–378.

11 Anhang 1

A1) Hinweise zur Herstellung von Tübbings im Fertigteilwerk

Für die Herstellung, die Lagerung und den Transport der Tübbings sollte bei jedem Tunnelprojekt ein projektbezogener QM- und Prüfplan erstellt und angewendet werden. Dieser QM-Plan enthält die Vorgaben des Auftraggebers und der ausführenden Firma für die dauerhafte, mangelfreie und geprüfte Herstellung und Lieferung der Tübbings.

Für die Produktion von Tübbings sind in der Regel folgende Voraussetzungen erforderlich:

- freigegebene Ausführungspläne (Tübbingdesign) wie Schal-, Bewehrungs- und Detailpläne,
- Vertragsprüfung zur Festlegung aller Anforderungen,
- Entscheidung über Fertigung durch Subunternehmer oder Eigenfertigung,
- Entscheidung über Fertigung in einer Feldfabrik oder in einem stationären Fertigteilwerk.

A2) Tübbingproduktion

Der QM-Plan für die Tübbingproduktion sollte auf folgende Punkte eingehen:

Standfertigung – Arbeitsschritte

- Reinigen und Ölen der Schalung
- Einlegen der Bewehrung, Schließen der Schalung und Montage der Einbauteile
- Endkontrolle der Schalung vor der Betonage
- Betonieren und Verdichten
- Öffnen und Reinigen der Konterschaltung
- Abziehen und Glätten des Tübbingrückens
- Betonnachbehandlung (bis zum Ausschalen)
- Abheben des Tübbings

Umlauffertigung – abweichende Arbeitsschritte zur Standfertigung

- Betonieren
- Vorlagerung
- Wärmetunnel

Nachbehandlung

- Frischbetontemperatur
- Temperatur der Produktionsstätte
- Temperaturverlauf

Zwischenlager/Reifelager

- Auflager und Zwischenlagerhölzer
- Lagerungszeit und notwendige Betonreife
- Umschlag und Transportgeräte

- Schutz gegen Austrocknen und Zugluft
- Toleranzkontrolle
- Fugenkontrolle
- Betoninstandsetzung

Betoninstandsetzung

- Risse
- Kleinschäden und Luftporen
- Schäden an der Tübbingaußenseite bis zur Bewehrung
- Schäden an der Tübbinginnenseite bis zur Dichtfuge mit geringen Abmessungen
- Schäden an der Tübbinginnenseite bis zur Dichtfuge mit großen Abmessungen
- Sanierungskonzept und Dokumentation

Freilager

- Gründung und Standsicherheit
- Auflager und Zwischenlagerhölzer
- Platzbedarf
- Umschlag und Transportgeräte
- Konfiguration der Tübbingstapel
- Witterungsschutz gegen Schnee und Eis
- Schutz vor Wasser und Feuchtigkeit bei Dichtungen mit Quellprofilen

Materialien

- Beton
- Mixdesign und Erstprüfung
- Materialien wie Zuschlagstoffe, Bindemittel, Zusatzstoffe, Zusatzmittel
- Kunststofffasern
- Betonversorgung und Gerätschaften
- Bewehrung
- Stabstahl
- Stahlfasern
- Betondeckung und Abstandshalter
- Einbauteile
- Dübel
- sonstige Einbauteile

- Ausrüstung
- EPDM-Dichtungsrahmen
- Fugendichtstreifen (z. B. TOK-Band oder Moosgummistreifen)
- Hartfaserplatten als Ringzwischenlage
- Führungsstangen
- sonstige Ausrüstungsmaterialien
- Kleber für Ausrüstungsmaterialien
- Trennmittel
- Nachbehandlungsmittel
- Materialien zur Betoninstandsetzung

Qualitätssicherung/Prüfung

- Prüfplan
- Werksabnahme und Qualitätsprüfung Tübbingschalungen
- Inbetriebnahme Produktionsanlage
- Eigen- und Fremdüberwachung des Betons
- Qualitätsüberwachung der Bewehrungskörbe
- Wareneingangskontrolle und Qualitätssicherung der Zulieferer
- laufende Kontrolle der Schalungen
- Tübbingvermessung
- Probering
- Dokumentation/Rückverfolgbarkeit der Tübbings
- Abgrenzung der Verantwortlichkeit

Arbeitssicherheit

- Lärmbelastung
- Betonkontakt
- Staubbelastung
- Umgang mit Gefahrstoffen
- Umgang mit Geräten

A3) Tunnelvortrieb

Die baubetrieblichen Anforderungen an die Tübbings von der Anlieferung auf der Baustelle bis zum Einbau im Tunnel werden im QM-Plan des Schildhandbuchs festgelegt.

Alle konstruktiven, statischen und baubetrieblichen Belange für den Tunnelvortrieb sind bereits bei der technischen Bearbeitung zu berücksichtigen. Dazu zählen beispielsweise:

- Zwischenlager auf der Baustelle,
- Transport zum Einbauort,
- Interaktion Tübbingausbau und Schildfahrt,
- Ringbau,
- Ringraumverfüllung,
- Instandsetzung von Beschädigungen.