



# Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen

DAUB-Arbeitskreis

## Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen

Diese aktualisierten Empfehlungen ersetzen die Empfehlungen aus dem Jahr 2014.

### Herausgeber

Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB)  
German Tunnelling Committee (ITA-AITES)  
Mathias-Brüggen-Str. 41, 50827 Köln  
Tel. +49 - 221 - 5 97 95-0  
Fax +49 - 221 - 5 97 95-50  
E-Mail: info@daub.de  
www.daub-ita.de

### Erarbeitet von dem DAUB-Arbeitskreis „Tübbing“

#### Mitglieder des Arbeitskreises:

Dipl.-Ing. Sawen Ali	IMM Maidl & Maidl, Bochum
Dipl.-Ing. Gereon Behnen	Büchting+Streit AG, München
Dipl.-Ing. Dietrich Fahlbusch	Ing. Büro Prof. Duddeck & Partner, Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer	TU München, Lehrstuhl für Massivbau
Prof. Dr. Paul Gehwolf	Dr. Spang GmbH, München, ehemals DB AG
Dipl.-Ing. Martin Geiger	Ed. Züblin AG, Tunnelbau, Stuttgart
Prof. Dipl.-Ing. Fritz Grübl (stv. Vorsitzender)	ZPP Ingenieure AG, München
Dr.-Ing. Dieter Handke	IMM Maidl & Maidl, Bochum
Dipl.-Ing. Heiko Hauck	Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Frankfurt
Dipl.-Ing. Stefan Hintz	Maidl Tunnelconsultants, Duisburg & München
Prof. Dr.-Ing. Dieter Kirschke	Beratender Ingenieur, Ettlingen
Dipl.-Ing. Andreas Lange	Strabag AG, Tunnelbau, Wien
Dr.-Ing. Peter-Michael Mayer (Vorsitzender)	Ed. Züblin AG, Stuttgart
Dipl.-Ing. Stefan Medel	Herrenknecht AG, Schwanau
Dipl.-Ing. Thorsten Müller	Implenia Construction GmbH, Mannheim
Dr.-Ing. Benno Ring	Ring - Consultancy in Tunnelling, Stockdorf
Dipl.-Ing. Carsten Schulte	Hochtief Engineering GmbH, Essen
Dr.-Ing. Ernst-Rainer Tirpitz	Implenia Construction GmbH, Mannheim
Dr.-Ing. Dieter Winselmann	Ing. Büro Prof. Duddeck & Partner, Braunschweig

#### Satz, Layout und redaktionelle Bearbeitung:

Gabriele Konopka	Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V., Köln
Prof. Dr.-Ing. Roland Leucker	Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V., Köln

**Mai 2024**

# Inhalt

<b>Präambel</b> .....	<b>5</b>	5.7 Einzelnachweise der Tübbingfugen.....	41
<b>1 Vorbemerkungen</b> .....	<b>5</b>	5.8 Nachverfestigung Tübbingbeton.....	49
1.1 Zweck der Empfehlung.....	5	5.9 Weitere Hinweise für die konstruktive Ausbildung.....	49
1.2 Veranlassung für die Überarbeitung der Empfehlung von 2014.....	5	5.10 Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG).....	50
1.3 Abkürzungsverzeichnis.....	5	5.11 Stahlfasertübbinge.....	50
1.4 Begriffsbestimmungen und Glossar.....	6	<b>6 Baulicher Brandschutz</b> .....	<b>55</b>
<b>2 Überblick über übliche Tübbingsysteme</b> .....	<b>9</b>	6.1 Einführung.....	55
<b>3 Tübbingkonstruktion</b> .....	<b>12</b>	6.2 Einwirkungen.....	55
3.1 Beschreibung des einschaligen Tübbingringes.....	12	6.3 Möglichkeiten zur Gewährleistung des baulichen Brandschutzes.....	55
3.2 Besonderheiten bei zweischaliger Auskleidung.....	14	6.4 Brandschutzbekleidungen und Brandversuche.....	56
3.3 Fugenkonstruktion.....	15	6.5 Rechnerische Untersuchungen.....	57
3.4 Befestigungen im Tübbingring.....	18	<b>7 Erdungsmaßnahmen in Tunneln</b> .....	<b>58</b>
3.5 Konstruktionstoleranzen.....	19	7.1 Bahntunnel.....	58
<b>4 Abdichtung der Tübbingfugen</b> .....	<b>21</b>	7.2 Straßentunnel.....	60
4.1 Grundlagen.....	21	<b>8 Dauerhaftigkeit</b> .....	<b>60</b>
4.2 Anforderungen an Dichtigkeit, Dichtungen und an die Wasserableitung.....	22	8.1 Anforderungen.....	60
4.3 Dichtungsrahmen.....	22	8.2 Alterungsmechanismen.....	61
4.4 Rahmenecken.....	23	8.3 Empfehlungen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit.....	61
4.5 Beeinflussung der Dichtwirkung.....	24	8.4 Besonderheiten bei der Verwendung von Stahlfasern.....	62
4.6 Betonabplatzungen an der Dichtungsnut...	24	<b>9 Nachhaltigkeit, CO<sub>2</sub>-Bilanz</b> .....	<b>62</b>
4.7 Prüfungen und Versuche.....	25	9.1 Einführung.....	62
4.8 Auswahl des Dichtungsprofils.....	26	9.2 Material.....	63
4.9 Einfluss von Verbindungsmitteln auf die Dichtigkeit.....	26	9.3 Logistik.....	63
4.10 Nachweise der Dichtigkeit.....	27	9.4 Abschließende Überlegungen.....	63
4.11 Maß- und Gewichtstoleranzen des Dichtungsprofils.....	27	<b>10 Sonderkonstruktionen – Querschläge, Stahltübbinge, Übergang offene Bauweise</b> .....	<b>64</b>
4.12 Nachdichtung.....	27	10.1 Querschläge.....	64
<b>5 Tragwerksplanung</b> .....	<b>29</b>	10.2 Stahltübbinge.....	67
5.1 Baugrundeigenschaften (Geologie, Hydrologie).....	29	10.3 Übergang zu offenen Bauweisen.....	68
5.2 Einfluss der Ringspaltverfüllung auf die Berechnungen.....	30	<b>11 Tübbingherstellung und Einbau</b> .....	<b>69</b>
5.3 Einwirkungen und Einwirkungskombinationen.....	30	11.1 Hinweise zur Herstellung von Tübbing im Fertigteilwerk.....	69
5.4 Nachweisconzepte im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ...	32	11.2 Tunnelvortrieb und Ringbau.....	75
5.5 Ermittlung der Schnittgrößen – Berechnungsverfahren.....	35	11.3 Tübbingschäden und Instandsetzung.....	77
5.6 Ermittlung der Schnittgrößen und Spannungen aus dem Bauprozess.....	40	<b>12 Regelwerke, Normen und Publikationen</b> .....	<b>79</b>
		12.1 Regelwerke, Normen und Richtlinien.....	79
		12.2 Publikationen.....	80

**Aus Gründen der Lesbarkeit wird im Folgenden auf die gleichzeitige Verwendung weiblicher, männlicher oder neutraler Sprachformen verzichtet und das generische Maskulinum verwendet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.**

## Präambel

Die vorliegenden Empfehlungen wurden auf Grundlage der Empfehlungen von 2014 vom Arbeitskreis „Tübbing“ des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB) neu aufgestellt. Sie geben einen Überblick über den Stand der Technik für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen beim maschinellen Tunnelvortrieb. Die Empfehlungen fassen die Konstruktionsgrundlagen sowie die erforderlichen Berechnungen und Nachweise bei der Bemessung eines Tübbingrings zusammen und berücksichtigen neben den gültigen Normen auch relevante Richtlinien sowie Erfahrungen von ausgeführten Projekten. Dabei werden u. a. auch die Bemessung der Auskleidung für den Brandfall und der Einsatz von Stahlfasern betrachtet. Neben dem Entwurf und der Bemessung der Tübbinge geben die Empfehlungen Hinweise für die Herstellung der Tübbingsegmente im Fertigteilwerk, ihren Einbau im Tunnel sowie den Entwurf von Anschluss- und Übergangsbauwerken.

## 1 Vorbemerkungen

### 1.1 Zweck der Empfehlung

Die Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen können für Auskleidungen aus Stahlbeton- oder Stahlfaserbetonfertigteilen (Stahlbeton- oder Stahlfaserbetontübbinge) im Verkehrstunnelbau, bei Wasserstollen (Triebwasserstollen für Wasserkraftanlagen, Trinkwasserstollen, Abwasserstollen) sowie im Infrastrukturtunnelbau angewendet werden. Sie befassen sich dabei hauptsächlich mit dem einschaligen Tübbingausbau, bei dem hohe Anforderungen an den einzelnen Tübbing und an das Ringsystem gestellt werden.

Die Empfehlungen können jedoch auch auf Tübbingsysteme ohne Abdichtung und auf eine zweischalige Bauweise sowie für Schachtbauwerke mit Tübbingauskleidung sinngemäß übertragen werden.

Die Empfehlungen sind für übliche Ringsysteme vorgesehen. In Sonderfällen können spezielle Vorgaben erforderlich werden, die von den hier dargestellten Regelfällen abweichen.

### 1.2 Veranlassung für die Überarbeitung der Empfehlung von 2014

Die Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen wurden vom Arbeitskreis „Tübbing“ des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB) im Jahr 2014 veröffentlicht. Sie gaben den Stand der Technik im Bereich der Tunnelauskleidungen mittels Betonfertigteilen zum damaligen Zeitpunkt wieder und stellten die Grundlagen für die Konstruktion und die Berechnung von Tübbingringe im Hinblick auf die Tragfähigkeit, die Gebrauchseigenschaften, die Bauausführung und die Qualitätssicherung zusammen.

Mittlerweile ist die technische Entwicklung im Tunnelbau weiter vorangeschritten. Dies gilt insbesondere für die immer häufiger eingesetzten Faserbetone, aber auch im Bereich der normativen Weiterentwicklung bei der Bemessung von Betonbauwerken.

Durch den häufigeren Einsatz von Tübbingauskleidungen im Tunnelbau ist zudem die Produktion der Tübbinge von immer größerer Bedeutung. Außerdem wird das Thema Nachhaltigkeit bei Tunnelbauwerken in Zukunft bei der Planung und Ausführung verstärkt betrachtet werden müssen.

Aus den vorgenannten Gründen wurde vom DAUB beschlossen, die Empfehlungen zu überarbeiten und auf den neuesten Stand der Technik anzupassen. Dies gilt insbesondere für die neu aufgenommenen **Kap. 7** (Erdungsmaßnahmen), **Kap. 9** (Nachhaltigkeit) und **Kap. 11** (Produktion) sowie für die komplett überarbeiteten **Kap. 4** (Abdichtung) und **Kap. 5.11** (Stahlfasertübbinge).

### 1.3 Abkürzungsverzeichnis

Abschn.	Abschnitt: Verweis auf Abschnitte in anderen Regelwerken
abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
Kap.	Kapitel: Verweis auf Kapitel in den vorliegenden Empfehlungen
RSVM	Ringspaltverfüllmaterial
SFB	Stahlfaserbeton
TBM	Tunnelbohrmaschine
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

## 1.4 Begriffsbestimmungen und Glossar

In den vorliegenden Empfehlungen werden einheitlich folgende Symbole, Bezeichnungen und Begriffe verwendet.

### 1.4.1 Terminologie

<b>Ausbau</b>	Mechanische Stützung der Hohlraumlaibung nach dem Ausbruch eines Tunnels
<b>Auskleidung</b>	Ausbausystem mittels Betonschale. Bei der einschaligen Auskleidung übernimmt eine Betonschale die Stützfunktion, während bei zweischaligen Auskleidungen eine Außenschale zur Primärsicherung sowie eine Innenschale als dauerhafte Auskleidung zum Einsatz kommen
<b>Einzelpressen</b>	Einzel angeordnete Pressen oder Pressenpaare, die der Übertragung der Vortriebskräfte auf den Tübbingring dienen
<b>Fertigteil</b>	Bauteil aus Beton, das unter kontrollierten Herstellungsbedingungen unabhängig vom Ort seines Einbaus hergestellt wird
<b>Fuge</b>	Begrenzungsfläche des Tübbings und gleichzeitig Kontaktfläche zwischen den Segmenten
<b>Hub</b>	Vortriebsabschnitt, in dem die Vortriebsmaschine durch das Ausfahren der Vortriebsspressen kontinuierlich nach vorne gedrückt wird; entspricht in der Regel der Breite des Tübbingrings in Tunnellängsrichtung
<b>Injektion</b>	Verfüllen unter Druck von Poren, Klüften oder Hohlräumen mit Injektionsgut. Im Gegensatz zum Verpressen wird der Druck bei der Injektion über eine definierte Zeitspanne konstant gehalten
<b>Innenschale</b>	Inneres, flächiges Konstruktionselement zur Erfüllung konstruktiver und/oder funktionaler Erfordernisse, welches nicht zur unmittelbaren Hohlraumsicherung dient und nachlaufend zum Vortrieb eingebaut wird
<b>Keilform (Konizität) Tübbingring</b>	Differenz in der Abwicklungsfläche zwischen der maximalen und der minimalen Tübbingbreite eines Ringes bei keilförmigen Ringen
<b>Längsfuge</b>	Parallel zur Tunnelachse verlaufende Fuge zwischen den einzelnen Tübbingrings
<b>Logistik</b>	Der Begriff „Logistik“ beinhaltet Planung, Bereitstellung und Einsatz für tunnelbautechnische Zwecke. Logistik bedeutet die Gesamtheit aller Transport-, Lager- und Umschlagsvorgänge von Material, Energie und Produkten innerhalb und zwischen Betriebsstellen einschließlich der Personentransporte auf einer Tunnelbaustelle
<b>Lunker</b>	Oberflächenunregelmäßigkeit, welche durch Lufteinschluss an der Schalungsseite entsteht („offene Pore“)
<b>Nische</b>	Seitliche Querschnittserweiterung bzw. -ausbuchtung (ohne Anschluss an weitere Bauwerke) der Tunnelröhre im Regelfall im Ulmenbereich, deren Querschnittsgestaltung vom Verwendungszweck abhängig ist (z. B. Notruf-, Brandmelde-, Rettungs- und Löscheinrichtungsnischen)
<b>Ovalisierung</b>	Aufgrund von systemimmanenten Toleranzen, Gebirgsdruck, Verpressmörteldruck, Eigengewicht des Tübbings oder durch Auftrieb entstehende Verformung eines eingebauten Tübbingrings
<b>Perlkies (Pea-Gravel, Blasversatz)</b>	Einkornkies, welcher in der Regel hinter dem Schildschwanz durch Öffnungen in den Tübbingrings in den Ringspalt gefüllt wird
<b>Probering</b>	Vollständig, meist liegend aufgebauter Tübbingring zu Test- oder Demonstrationszwecken
<b>Querschlag</b>	Verbindungsbauwerk zwischen zwei Tunnelröhren oder zwischen Tunnelröhre und einem Schachtbauwerk

<b>Ringfuge</b>	Zur Tunnelachse ungefähr senkrecht verlaufende Fuge zwischen zwei angrenzenden Tübbingringen
<b>Ringspalt</b>	Raum zwischen umgebendem Gebirge und Außenfläche der Tübbingauskleidung
<b>Rundkorn</b>	Gesteinskörnung deren Oberfläche mehr als 50% natürlich gerundet ist
<b>Schildschwanz</b>	Hinterer zum Tübbingausbau gerichteter Teil der Tunnelvortriebsmaschine, in dem der neu einzubauende Tübbingring zusammengefügt wird
<b>Schildvortrieb</b>	Vortrieb durch Vorpressen eines Schildmantels in das Gebirge, unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Löseverfahren sowie gegebenenfalls ortsbrustunterstützender Maßnahmen
<b>Tübbing</b>	Fertigteil aus bewehrtem oder unbewehrtem Beton, ggf. auch Stahlfaserbeton, Stahl oder früher auch Gusseisen für die Auskleidung von Tunneln, Stollen und Schächten
<b>Tübbingdichtung</b>	Dichtungssystem aus den einzelnen Tübbingsegmenten allseitig umschließenden Dichtungsbändern, die nach ihrer Kompression durch das Zusammenfügen der Steine eine dauerhafte Abdichtung der Tunnelröhre gegen drückendes Bergwasser sicherstellt
<b>Tübbingsystem</b>	Auskleidungssystem für Tunnel, Stollen und Schächte aus einzelnen zu Tübbingringen zusammengesetzten Tübbingelementen, welche im Zusammenwirken mit der Ringspaltverfüllung die Stützung des Hohlraums übernimmt
<b>Verbindungsmittel</b>	Auf Zug und Abscherung beanspruchbare Verbindungselemente zur temporären oder dauerhaften festen Verbindung zweier Tübbinge oder Tübbingringe in den Längs- und Ringfugen (z. B. Schrauben, Dübel)
<b>Verpressen</b>	Verfüllen unter Druck von künstlich geschaffenen Hohlräumen mit Verpressgut; im Rahmen dieser Richtlinie insbesondere das Verfüllen des Ringspalts
<b>Zentrierhilfe</b>	Einbauteil, das in eigens vorgesehene Aussparungen in den Ring- oder Längsfugen eingesetzt wird und eine Führung (Zentrierung) der Tübbingelemente beim Einbau erzwingt. Als Zentrierhilfen kommen in den Ringfugen Dübel, in den Längsfugen Rundstäbe aus Kunststoff zum Einsatz
<b>Zweischalige Auskleidung</b>	Tunnelauskleidung aus zwei oder mehreren Schalenteilen (auch zweischalige Bauweise) mit unterschiedlichen statischen und konstruktiven Anforderungen (kein Verbund), die in unabhängigen Arbeitsgängen und mit unterschiedlichen Bauverfahren hergestellt werden (z. B. Außenschale Spritzbeton- oder Tübbingausbau, Innenschale Ortbetongewölbe)

## 1.4.2 Symbole und Bezeichnungen

**Tabelle 1** Begriffe, Symbole, Bezeichnungen

Term	Beschreibung	Bemerkung
$A_{c0}$	Lasteinleitungsfläche auf der Kontaktfläche	$= d_0 \cdot l_0$ Bezeichnung analog zu EC2.
$A_{c1}$	Fläche nach Lastausbreitung im Tübbing	$= d_1 \cdot l_1$ Bezeichnung analog zu EC2.
$A_{l1}$	Fläche der Lastausbreitung entlang des Tübbings	$= t_1 \cdot d_1$ Bisher $A_{c2}$ .
$F_{z1}$	Spaltzugkraft im Tübbing	In Tiefe von $0,4 \cdot t_s$ Spaltzugkraft infolge der Lastausbreitung, bisher $F_S$ .

Term	Beschreibung	Bemerkung
<b>F<sub>Z0</sub></b>	Randzugkraft an Kontaktfläche	In Tiefe von $0,1 \cdot t_s$ Zugkraft unmittelbar unter Lasteinleitung, bisher $F_{S,r}$ .
<b>F<sub>Z2</sub></b>	Zugkraft an Kontaktfläche	In Tiefe von $2/3 \cdot h$ (Sekundäre) Spaltzugkraft tief im Tübbingsegment, bisher $F_{S,2}$ .
<b>F<sub>S</sub></b>	Zugkraft im Bewehrungsstahl	
<b>M</b>	Moment	
<b>N</b>	Normalkraft	Auch bei Anwendung auf Teilflächenbelastung der Fugen (damit „F“ in Nachweis für Teilflächenbelastung nach EC2 ersetzend).
<b>b</b>	Bogenmaß des einzelnen Tübbings	Grundsätzlich „b“ für Bogenmaße.
<b>d</b>		Bezeichnung von last- oder bemessungsabhängigen Strecken oder Größen allgemein mit „d“.
<b>d<sub>0</sub></b>	Höhe bzw. Breite der rechteckigen Ersatzspannung auf der Kontaktfläche (Lasteinleitung) in radialer Richtung	Ersetzt „b <sub>1</sub> “ im EC2.
<b>d<sub>1</sub></b>	Höhe bzw. Breite der rechteckigen Ersatzspannung auf der Kontaktfläche (Lasteinleitung) in radialer Richtung	Ersetzt „b <sub>2</sub> “ im EC2.
<b>e</b>	Ausmitte von Kräften	Grundsätzlich „e“ für Exzentrizitäten.
<b>e<sub>M</sub></b>	Ausmitte infolge berechnetem Biegemoment M	= $M/N$
<b>e<sub>vs</sub></b>	Zusatzausmitte infolge von Versatz	Versatz z. B. aus Montagetoleranz.
<b>e<sub>ov</sub></b>	Äquivalente Ausmitte infolge von Ovalisierung	Wird aus einer (Vor-)Ovalisierung bestimmt als Ersatzgröße für den Nachweis der Teilflächenbelastung bzw. Spaltzugkräfte auf den Längsfugen.
<b>e<sub>KF</sub></b>	Ausmitte der Kontaktfläche gegenüber der Segmentachse	
<b>e<sub>oF</sub></b>	Abstand der Normalkraft von der (nächstgelegenen) Segmentoberfläche	
<b>h</b>	Segmentdicke	Ist analog EC2. Grundsätzlich „h“ für geometrisch feste Maße in radialer Richtung.
<b>h<sub>KF</sub></b>	Höhe der Kontaktfläche (radial)	Geometrisch festes Maß.
<b>h<sub>oi</sub></b>	Abstand Kontaktfläche von der Tübbinginnenoberfläche	Geometrisch festes Maß.
<b>h<sub>oa</sub></b>	Abstand Kontaktfläche von der Tübbingaußenoberfläche	Geometrisch festes Maß.
<b>l</b>	Segmentlänge	In Längsrichtung des Tunnels. Grundsätzlich „l“ für Maße in Längsrichtung des Tunnels.
<b>l<sub>KF</sub></b>	Länge der Kontaktfläche	Geometrisch festes Maß.
<b>l<sub>Ra</sub></b>	Abstand Kontaktfläche von den Ecken Längs- zu Ringfuge	Geometrisch festes Maß.

Term	Beschreibung	Bemerkung
$l_0$	Länge der rechteckigen Ersatzspannung (Lasteinleitung)	Ersetzt „ $d_1$ “ im EC2.
$l_1$	Länge der rechteckigen Ersatzspannung nach Lastausbreitung im Tübbing	Ersetzt „ $d_2$ “ im EC2.
$t$	Maß für Tiefen	Grundsätzlich „ $t$ “ für Maße, die sich auf eine Tiefe beziehen.
$t_1$	Tiefe der Lastausbreitung hinter der Kontaktfläche, im Nachweis der Teilflächenpressungen gemäß <b>Kap. 5.7.2.</b>	$t_1 = d_1 - d_0$ (Neigung 2:1) Gibt den Abstand der Fläche $A_{c1}$ von der Fläche $A_{c0}$ auf der Kontaktfläche an, bisher „ $h$ “.
$t_s$	Tiefe der Lastausbreitung hinter der Kontaktfläche, im Nachweis des Spaltzugs gemäß <b>Kap. 5.7.3.</b>	$t_s = d_1$ Definition gemäß DAfStB-Heft 631 entsprechend dem Verlauf von Spaltzugspannungen.
$x$	Lokale und globale Koordinatenrichtung in Tunnellängsrichtung	Richtung längs der Längsfugen.
$y$	Lokale Koordinatenrichtung in Umfangsrichtung des Tübbinge	Richtung entlang der Ringfugen („gekrümmte“ Richtung).
$z$	Lokale Koordinatenrichtung in radialer Richtung des Tübbinge	Richtung normal zur Tübbingoberfläche.
$\alpha$	Verdrehwinkel auf den Längsfugen	
$\alpha_{ov}$	Verdrehwinkel infolge einer Ovalisierung	
$\sigma_{c0}$	Rechteckige Ersatzspannung auf der Kontaktfläche (Lasteinleitung)	
$\sigma_{c1}$	Rechteckige Ersatzspannung nach Lastausbreitung.	
$\sigma_{c, max}$	Maximale Spannung auf der Kontaktfläche (Lasteinleitung)	Diese Definition ist zunächst einmal unabhängig von der Grundlage der Bestimmung bzw. grundlegenden Annahme (linearer Verlauf, elastische Spannung, plastische Spannung).
$\sigma_{sz}$	Spaltzugspannung	
$\sigma_{sz, max}$	Maximale Spaltzugspannung	

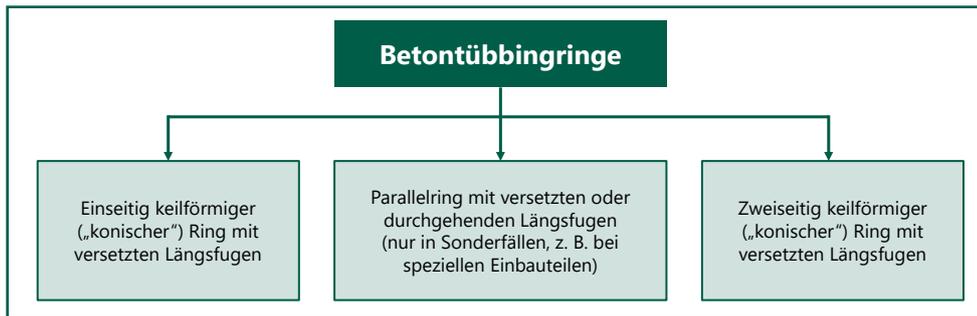
## 2 Überblick über übliche Tübbingsysteme

Bei allen Tübbingsystemen kann zwischen ein- und zweischaliger Auskleidung unterschieden werden. Die einschalige Auskleidung hat sich dabei aber, abgesehen von Sonderfällen (siehe **Kap. 3.2**), weitgehend durchgesetzt.

Beim klassischen Ringsystem, das in der Regel zur Anwendung kommt, weisen die einzelnen Tübbingringe eine auf beiden Seiten durchgehende umlaufende Ringfuge auf. Dies bedeutet, dass alle Tübbinge eines Ringes ohne einen Versatz zum benachbarten Stein

eines Ringes eingebaut werden. Beim klassischen Ringsystem mit ebenen Ringfugen kommen entweder keilförmige, umgangssprachlich auch „konische“ Ringe, oder Parallelringe mit umlaufend gleicher Breite zum Einsatz (**Abbildung 1**).

Es gibt aber auch Tübbingsysteme, bei denen die einzelnen Segmente eines Ringes in Tunnellängsrichtung zueinander versetzt angeordnet werden (Hexagonal- oder Wabentübbingringe) und somit keine durchgehende Ringfuge bilden. Auf Ringsysteme mit versetzten Ringfugen wird in diesen Empfehlungen nicht weiter eingegangen. Sie werden in Europa nur sehr selten angewendet und weisen eine Reihe von



**Abbildung 1**  
Einteilung der im Rahmen dieser Empfehlung betrachteten üblichen Betontübbingringe in Ringtypen

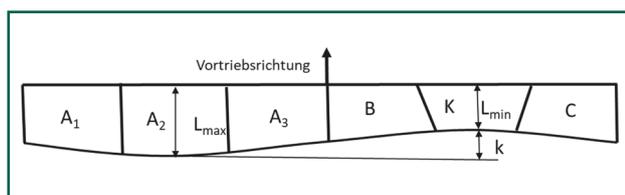
Nachteilen auf. So sind mit versetzten Ringfugen Kurvenfahrten nur schwer zu realisieren. Darüber hinaus ist eine Fugenabdichtung mit Fugenbändern bei diesen Systemen nicht praktikabel. Die Anwendung von Tübbingauskleidungen mit versetzten Ringfugen bleibt daher auf spezielle Anwendungsfälle beschränkt.

Nachfolgend werden die Merkmale der unterschiedlichen Ringtypen erläutert.

### Keilförmige Tübbingringe

Um auch bei Kurvenfahrten einen zwangungsfreien Einbau der Tübbingauskleidung zu ermöglichen, kommen keilförmig ausgebildete Tübbingringe zum Einsatz (**Abbildung 2** und **Abbildung 3**). Die Ringe werden entsprechend einer definierten Ringfolge um die Tunnellängsachse verdreht und können so einer Raumkurve in horizontaler und vertikaler Richtung folgen. Dabei muss auf der Kurvenaußenseite die Ringbreite (in Tunnellängsrichtung) etwas größer, auf der Kurveninnenseite etwas kleiner ausgeführt werden.

Keilförmige Ringe werden entweder als Universalringe (**Abbildung 2** und **Abbildung 3**) oder als rechts- und linkskeilförmige Ringe (**Abbildung 4**) ausgebildet. Bei Universalringen kann der Schlussstein in jeder möglichen Ringposition eingebaut werden, um der gewünschten Raumkurve zu folgen. Er kann damit auch in der Sohle zu liegen kommen. Bei rechts- bzw. linkskeilförmigen Ringen erfolgt der Einbau des Schlusssteins immer oberhalb der Tunnelachse im Firstbereich. Abhängig davon, ob eine Links- oder Rechtskurve beschrieben werden soll, werden die jeweiligen Ringtypen in wechselnder Reihenfolge nacheinander eingebaut.



**Abbildung 2** Universalring mit großem Schlussstein

Keilförmige Ringe können als einfach-keilförmige Ringe oder als doppel-keilförmige Ringe ausgebildet werden. Bei einfach-keilförmigen Ringen weist nur eine der Ringfugen eine Keilform auf, während die andere Ringfuge senkrecht zur Tunnelachse verläuft. Doppel-keilförmige Ringe weisen in beiden Ringfugen des Ringes eine Keilform auf (siehe hierzu auch **Abbildung 9**).

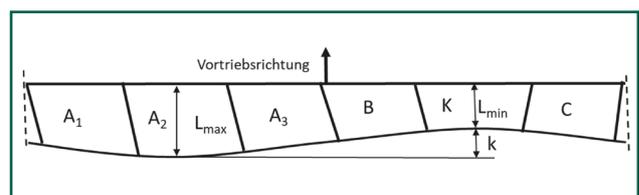
### Parallelringe

Ringe ohne eine Keilform, sogenannte Parallelringe, besitzen über Ihren gesamten Umfang eine einheitliche Breite und somit parallel zueinander liegende Ringfugen. Dies bedeutet, dass mit diesem Tübbingring keine Kurven gebaut werden können und der Ring eventuell nicht der Spur der TBM folgen kann (siehe **Abbildung 5**).

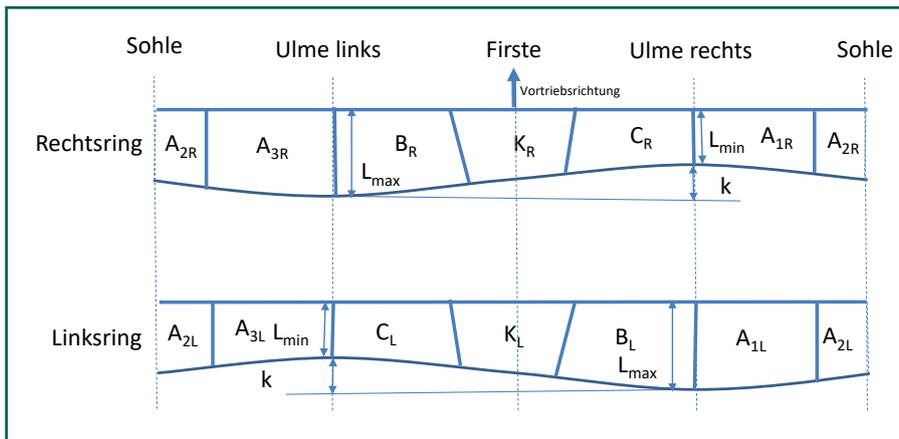
Da hieraus Zwängungen und Beschädigungen des Ringes im Schildschwanz resultieren können, sollten Parallelringe nur in Ausnahmefällen, z. B. für spezielle Ringe mit Einbauteilen, die an fest vorgegebener Stelle sitzen müssen, angewendet werden.

### Kurz- bzw. Passringe

Um am Vortriebsende den Anschluss des letzten Tübbingringes an die Betonkonstruktion des Zielbauwerkes zu vereinfachen und ggf. ein notwendiges Kürzen dieses Ringes zu verhindern oder auch bei vorgegebenen Stationierungen für Sonderringe (z. B. Querschläge) können „Kurz- oder Passringe“ vorgesehen werden (**Abbildung 6**). Bei der Annäherung an das Zielbauwerk kann vorausberechnet werden, mit welcher Ringfolge die vorgesehene Endstirnfläche am besten erreicht wird.



**Abbildung 3** Universalring mit schrägen Längsfugen zwischen allen Segmenten



**Abbildung 4** Prinzipskizze rechts- und linkskeilförmiger Ring

Die Hauptanwendung finden die o. g. Ringtypen beim Bau von Tunneln mit einschaliger Auskleidung, bei der die Tübbinge nach dem Einbau sofort die endgültige Tunnelschale darstellen.

Es werden aber auch Tunnel, insbesondere mit großem Durchmesser im Festgestein, mit zweischaliger Auskleidung (Außenschale: Tübbingring; Innenschale: Bewehrter und unbewehrter Ort beton, teilweise mit zwischenliegender KDB-Abdichtung) ausgeführt (siehe **Kap. 3.2**).

**Weitere Ringvarianten**

Die folgenden Ausführungen werden in der Regel nur bei zweischaligem Ausbau angewendet.

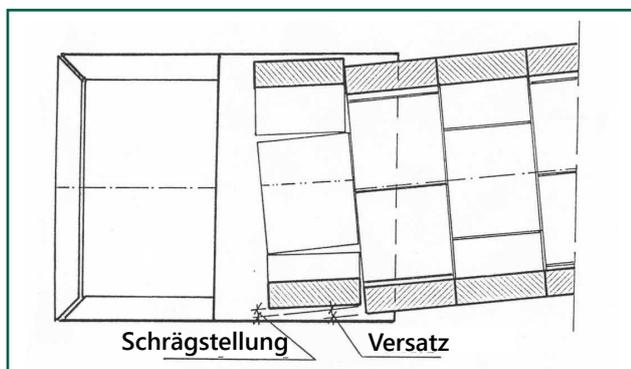
▪ **Spreitzübbingringe**

Spreitzübbingringe werden meist als einfache Ausbruchssicherung eingesetzt. Der Tübbingring wird im stark vereinfachten Schildschwanz (ohne Schildschwanzdichtung) mit einem seitlich keilförmigen Schlussstein kürzerer Breite vormontiert. Nachdem die TBM weitergefahren ist, und der Ring den Schildschwanz verlassen hat, wird der Schlussstein in den Ring eingeschoben und dadurch der gesamte Ring so weit gespreizt, dass der Tübbingring am

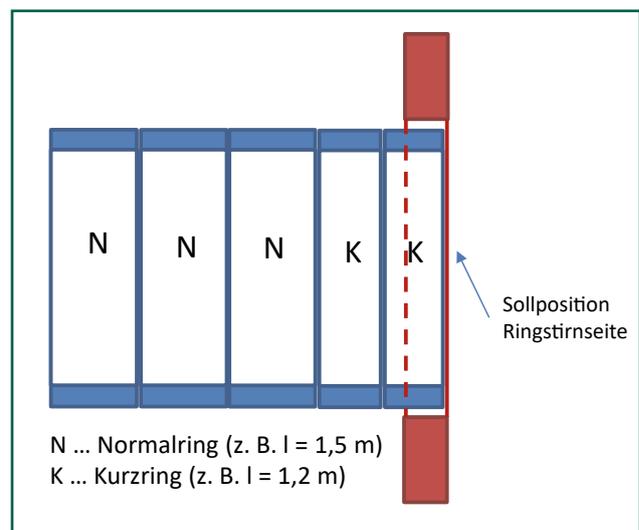
Gebirge anliegt. Die Ringspaltverfüllung kann damit entfallen. Spreitzübbingringe können nur im zumindest kurzfristig standfesten, nicht wasserführenden Baugrund eingesetzt werden. Im wasserführenden Gebirge wird für die Bauzeit eine Wasserhaltung erforderlich, da ein wasserdichter Ausbau mit Spreitzübbingringen nicht hergestellt werden kann.

▪ **Spartübbingring mit reduzierten Anforderungen**

Als vereinfachter Ring kann der Spartübbingring u. a. dort eingesetzt werden, wo die Hauptbelastung erst nach Einbau der Innenschale auftreten wird, zum Beispiel beim Vortrieb unter Grundwasserabsenkung oder im quellfähigen/schwellfähigen Gebirge. Weitere Einsatzbereiche sind druckhafte Gebirgsbereiche, in denen eine Verformbarkeit des Ausbaus für den Abbau des Gebirgsdrucks gewährleistet werden kann. Schäden am Tübbingring können hingenommen werden, solange die Standsicherheit gegeben ist.



**Abbildung 5** Mögliche Versätze beim Einbau von Parallelringen



**Abbildung 6** Ringfolge bei Kurz- bzw. Passringen

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

#### ▪ Ringe mit integrierten Sohltübbing

Wenn in Ausnahmefällen ein integriertes Sohlsegment eingesetzt werden soll, müssen für vertikale und horizontale Kurvenfahrten jeweils gesonderte keilförmige Ringe vorgesehen werden. Meist werden die Ringe mit durchgehenden Längsfugen und damit der Anordnung von Kreuzfugen konstruiert.

## 3 Tübbingkonstruktion

### 3.1 Beschreibung des einschaligen Tübbingringes

#### 3.1.1 Allgemeine Aspekte der Tunnelauskleidung

Die Tunnelauskleidung muss unterschiedliche Aufgaben im Bau- und Endzustand erfüllen:

- Sicherung des Gebirges zur Verhinderung von Nachbrüchen,
- Aufnahme der Einwirkungen aus Eigengewicht, Auflasten, Gebirge, Grundwasser und ggf. dem Betrieb,
- Abdichtung des Tunnels gegen Grund- und Bergwasser,
- Befestigungssystem für Ausrüstungsteile (zum Beispiel Oberleitung, Beleuchtung, Lüfter),
- Aufnahme der Vortriebs- und Steuerkräfte der Vortriebsmaschine.

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

Wenn der Tübbingring die TBM verlässt, hat er seine endgültige Tragfähigkeit bereits weitgehend erreicht und kann – nach erfolgter Ringspaltverfüllung – Lasten aufnehmen. Ebenfalls ist der Tunnel sofort gegen den anstehenden Grundwasserdruck abgedichtet, sofern Kompressionsdichtungsrahmen vorgesehen werden. Da Stahlbetontübbinge in einem Fertigteilwerk mit umfangreichen Qualitätsüberwachungsmöglichkeiten hergestellt werden, ist die Qualität üblicherweise gleichbleibend hoch.

Der Tübbingring bildet einen Gelenkring, der seine Stabilität hauptsächlich über die Ringspaltverfüllung und die Bettung im umgebenden Gebirge erhält. Kopplungsmöglichkeiten über die Ringfugen und eine beschränkte Übertragung von Momenten in den Längsfugengelenken tragen darüber hinaus zur Ringtragfähigkeit der Tübbingauskleidung bei.

Die Ringspaltverfüllung, die heute üblicherweise durch den Schildschwanz der TBM erfolgt, wird kontinuierlich mit dem Vortrieb vorgenommen. Als Ringspaltverfüllmaterial kommen klassische Ringspaltmörtel (1K-RSVM) oder Zweikomponentenringspaltverfüllmaterialien (2K-RSVM) zum Einsatz, bei denen die aktivierende Komponente direkt im Schildschwanz zugefügt wird. Die Ringspaltverfüllung stellt die sofortige Bettung des Tübbingringes zum umgebenden Baugrund her und bewirkt damit eine Vergleichmäßigung der Einwirkungen auf den Tübbingring.

#### Ringgeometrie

Eine frühzeitige Abstimmung der Schnittstelle zwischen Tübbingausbau und TBM ist bereits in der Phase der Konzeptionierung des Tübbingringes und der TBM erforderlich.

Bei der Festlegung des Ringinnendurchmessers muss beachtet werden, dass eine ausreichende Toleranz zum Auffahren des Tunnels vorgesehen wird. In Europa wird in der Regel ein Toleranzkreis für die TBM-Fahrt von Tunnelradius  $R \pm 10$  cm eingerechnet, d. h. der Tunnel wird im Durchmesser planmäßig um 20 cm größer hergestellt als die innere Tragwerksbegrenzung dies erfordert.

Die Tübbingdicke orientiert sich an statischen und konstruktiven Vorgaben wie Dichtungsdetails oder Dauerhaftigkeit und liegt abhängig von Tunneldurchmesser und den anstehenden Gebirgsverhältnissen zwischen 25 cm und ca. 75 cm, in der Regel zwischen 30 cm und 60 cm.

Die Ringbreite liegt in Abhängigkeit vom Außendurchmesser üblicherweise zwischen 0,75 m und 2,25 m. Gängige Anhaltswerte für Ringbreiten sind für

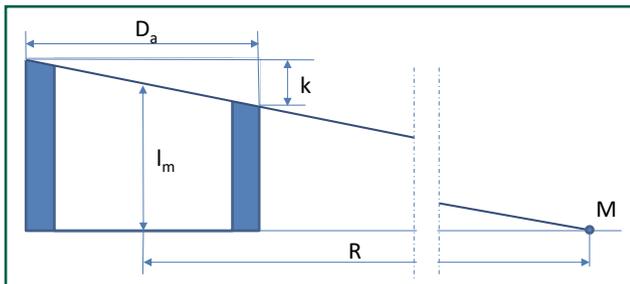
- Kleine Durchmesser (2,5 bis 5 m): 75 bis 125 cm
- Mittlere Durchmesser (5 bis 8 m): 125 bis 175 cm
- Große Durchmesser (über 8 m): 175 bis 225 cm

Bei Kurvenfahrten müssen keilförmige Ringe (umgangssprachlich auch „konische“ Ringe genannt) eingesetzt werden. Die erforderliche Keilform ( $k$ ) lässt sich dabei abhängig von den geometrischen Randbedingungen mit folgender Formel berechnen (siehe **Abbildung 7**):

$$k = D_a \cdot l_m / R$$

mit

- $k$  Keilform (Differenz von maximaler zu minimaler Ringbreite)
- $D_a$  Außendurchmesser des Tübbingringes
- $l_m$  mittlere Ringlänge
- $R$  minimaler Kurvenradius



**Abbildung 7** Geometrische Beziehung zwischen Keilform  $k$  und Kurvenradius  $R$ ,  $M$  entspricht dem Mittelpunkt der Kurve

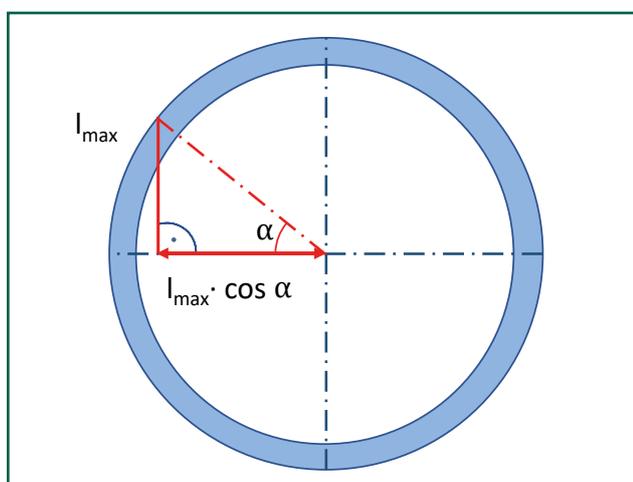
Bei Anwendung der obigen Formel ist zu berücksichtigen, dass die Keilform eines Ringes bei versetzten Längsfugen nicht vollständig ausgenutzt werden kann, da die Ringpositionen mit maximaler bzw. minimaler Ringbreite nur mit dem vorgegebenen Längsfugenversatz im Ring angeordnet werden können (**Abbildung 8**). Zur Berücksichtigung dieses Effektes wird die obige Formel wie folgt ergänzt:

$$k' = D_a \cdot l_m / R \cdot 2 / (1 + \cos \alpha)$$

mit

- $k'$  ausnutzbare Keilform bei versetzten Längsfugen
- $\alpha$  gegenseitiger minimaler Verdrehwinkel zweier aufeinanderfolgender Ringe

Beim Entwurf des Tübbingringes ist außerdem eine Korrekturkurvenfahrt der TBM zum Ausgleich von unvermeidbaren Fehlfahrten zu berücksichtigen. Der erforderliche Korrekturkurvenradius sollte mindestens 20 % bis 30 % kleiner gewählt werden als der kleinste

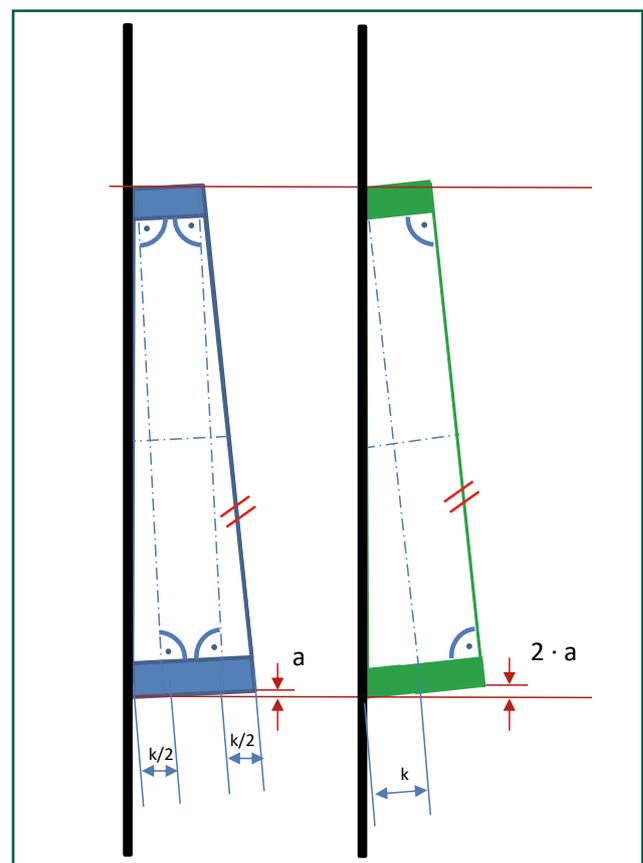


**Abbildung 8** Keilförmiger Ring mit Maximum um Winkel  $\alpha$  aus der horizontalen Achse gedreht

Sollkurvenradius der Tunnelgradiente im Grund- und Aufriss.

Da die Tunnelvortriebsmaschine nie genau der Soll-Tunnelachse folgen kann, sollten auch bei geraden Tunnelvortrieben keilförmige Tübbingringe vorgesehen werden. In diesem Fall sollte der Korrekturkurvenradius entsprechend den Steuerungsmöglichkeiten der Vortriebsmaschine gewählt werden (zum Beispiel  $R_{\text{Korrektur}} = 500 \text{ m}$ ).

Abhängig davon, ob die Keilform einseitig an einer Tübbingfuge (einfach keilförmiger Ring) oder beidseitig (doppelt keilförmiger Ring) vorgesehen wird, fällt die Richtungskorrektur unterschiedlich stark aus (vgl. **Abbildung 9**). Während einfach-keilförmige Ringe eine stärkere Richtungskorrektur ermöglichen, erfolgt die Kurvenkorrektur mit doppelt-keilförmigen Ringen entsprechend weicher. Auch ist zu beachten, dass die Achse der TBM bei doppel-keilförmigen Ringen nicht senkrecht zur Ringspiegelfläche des zuletzt eingebauten Ringes steht und somit die Pressen der TBM auf eine schräge Fläche drücken. Vor diesem Hintergrund haben sich in Deutschland einfach keilförmige Ringformen in der Praxis bewährt, wobei international beide Typen zur Anwendung kommen.



**Abbildung 9** Doppelt- (links) und einfach (rechts) keilförmiger Ring

Die Ringstellung des neu einzubauenden Ringes sollte immer so gewählt werden, dass die Ringvorderseite möglichst mittig im Schildschwanz zu liegen kommt und die Vorlaufdifferenzen der Vortriebspressen möglichst gering sind bzw. dem erforderlichen Kurvenvorlauf entsprechen.

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

### 3.1.2 Ringteilung

Die Ringteilung (Anzahl und Öffnungswinkel der einzelnen Segmente eines Ringes) und die Pressenanordnung der Vortriebsmaschine müssen aufeinander abgestimmt sein. Bei versetzt einbaubaren Tübbingringen bedeutet dies, dass eine regelmäßige Pressenverteilung über den Umfang der TBM vorgesehen wird. Die Pressen sollten immer an dafür vorgesehenen Stellen auf das einzelne Tübbingsegment drücken. An diesen Stellen können dann bedarfsweise gezielt Spaltzugbewehrungen und gegebenenfalls Ringzwischenlagen vorgesehen werden, um Schäden an den Tübbingungen zu vermeiden.

### Kreuzfugen

Als Kreuzfugen werden Fugenkonstellationen bezeichnet, bei denen die Längsfugen aufeinander folgender Ringe sich in der Ringfuge treffen oder näher als ca. 10 cm voneinander zu liegen kommen. Kreuz-

fugen wirken sich nachteilig auf die Trag- und Dichtwirkung des Tübbingausbaus aus. Jeder Tübbingring sollte deshalb zum vorhergehenden Ring um die Hälfte oder ein Drittel einer Tübbingsegment-Abwicklungslänge versetzt eingebaut werden (Längsfugenversatz). Treten einzelne, Kreuzfugen auf, ist zu prüfen, ob diese zu Qualitätseinbußen führen (siehe auch **Kap. 4**).

## 3.2 Besonderheiten bei zweischaliger Auskleidung

Bei der zweischaligen Auskleidung übernimmt die Tübbingauskleidung die Funktion einer Außenschale. Hierfür gelten im Allgemeinen die gleichen Empfehlungen wie beim einschaligen Tübbingring. So muss der Tübbingausbau wie bei der einschaligen Bauweise in der Regel sämtliche Einwirkungen im Bauzustand und – abhängig von den Projektanforderungen – im Endzustand aufnehmen können. Lediglich der Nachweis auf Wasserdruck kann im Falle einer Ausführung der Tübbingung ohne Abdichtung entfallen.

**Tabelle 2** zeigt die Funktionen der Tübbingschale in Abhängigkeit der Funktion der Innenschale bei einer zweischaligen Bauweise. Einige Vor- und Nachteile der zweischaligen Bauweise sind nachfolgend aufgeführt.

### Vorteile des zweischaligen Ausbaus

- Möglichkeit des Einsatzes einer Folienabdichtung (KDB) zwischen Innenschale und Tübbingausbau, wodurch ein nahezu vollständig wasserdichter Tunnel (auch bei sehr hohen Wasserdrücken) hergestellt werden kann.
- Der Tübbingring kann als vereinfachter, häufig auch nicht gedichteter Spartübbing vorgesehen werden (zum Beispiel wird keine Bemessung auf nachträgliche Abgrabung und Bebauung erforderlich).

**Tabelle 2** Funktionen von Ortbetoninnenschale und Tübbingring bei unterschiedlichen zweischaligen Ausführungen

Funktion Innenschale	Funktion Tübbingring
Nur als Brandschutzvorsatzschale	Dauerhafte Aufnahme aller Einwirkungen und Abdichtung
Mit Aufnahme von Wasserdruck und Brandlasten	Dauerhafte Aufnahme Erddruck
Mit Aufnahme aller endgültigen Einwirkungen (Erd- und Wasserdruck, Brandschutz) und Abdichtung	„Spartübbing“ zur bauzeitlichen Aufnahme der Einwirkungen aus Gebirge; ggf. mit reduzierten Sicherheiten, ggf. bauzeitliche Abdichtung
Mit Aufnahme erhöhter Lasten aus Erd- und Wasserdruck in ausgewiesenen Tunnelbereichen (z. B. begrenzte Bereiche mit hohen Erd- und/oder Wasserdrücken, Querschlagsbereiche, sonstige Anschlussbauwerke	Dauerhafte Aufnahme aller Einwirkungen und Abdichtung außer in Zonen mit zusätzlicher Innenschale

- Die Befestigungen im Tunnel (Ankerschienen, Dübel, Stahlplatten) können kostengünstiger ausgeführt werden, da die Befestigungspunkte in der Innenschale festgelegt werden können.
- Der Brandschutz wird durch die Innenschale gesichert. Nach einem Brandereignis kann die Innenschale erneuert werden.
- Die Herstellung von Querschlägen, Lüftungs- und Rettungsstollen bzw. -schächten kann vereinfacht werden.
- Die Innenschale kann direkt an die Betonkonstruktionen der Portale angeschlossen 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 ggf. Wasserdruck allein 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, zum Beispiel 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.

## 3.3 Fugenkonstruktion

Beim Tunnelausbau mit Tübbinggen kommt der Ausbildung von Fugen eine besondere Bedeutung zu, da die Fugen zwischen den einzelnen Tübbingsegmenten sowohl in Tunnellängsrichtung als auch in Umfangsrichtung hohe und zum Teil sehr konzentrierte Kräfte übertragen müssen, ohne dass dies zu Schäden an der Betonkonstruktion führt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bedarf es einer genauen Betrachtung und konstruktiven Auslegung der Fugen.

Nachfolgend werden Empfehlungen für die Auslegung der Längs- und Ringfugen gemacht. Diese gelten vorrangig für einschalige, gedichtete Tübbingsysteme, können jedoch sinngemäß auch für zweischalige Systeme angewendet werden.

### 3.3.1 Allgemeine Anforderungen an die Fugenkonstruktion

Die Ausbildung der Fugen zwischen den Einzeltübbinggen ist für die Kraftübertragung und die Dichtigkeit von entscheidender Bedeutung. Folgende Konstruktionsdetails sind bei der Planung der Ring- und Längsfugen zu berücksichtigen:

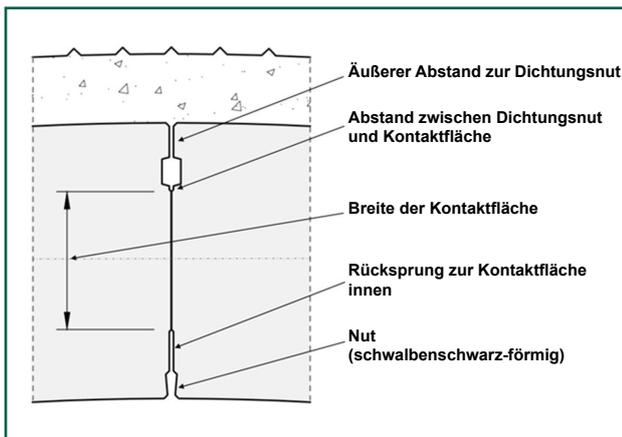
- Konzentration der lastübertragenden Kontaktflächen auf Bereiche, die im Einflussbereich der Bewehrung liegen. Tübbingbereiche wie Ecken und Kanten, die mittels Bewehrung nicht ausreichend gesichert werden können, sind durch entsprechende geometrische Formgebung (Rücksprünge, Abfasungen) zu entlasten.
- Vermeidung von Kerben und Kerbwirkungen im lastübertragenden Fugbereich.
- Ausreichende Randabstände bei der Anordnung der Kompressions-Dichtungsrahmen zur sicheren Aufnahme der Vorspannkräfte der Dichtung (siehe **Kap. 4** und **Kap. 5**)
- Wird eine lokale Erhöhung der Betondruckfestigkeit entsprechend dem Konzept der Teilflächenpressungen in Ansatz gebracht, sind auftretende Spaltzugkräfte nachzuweisen und durch Bewehrung abzudecken (siehe **Kap. 5.7** und **Kap. 5.11**).

Auswirkungen der Herstellungs- und Einbautoleranzen sind statisch zu berücksichtigen.

### 3.3.2 Längsfuge

Über die Längsfugen müssen die Schnittkräfte zwischen zwei Tübbinggen eines Ringes übertragen werden. Dies sind im wesentlichen Normalkräfte sowie, davon abhängig, die in den Fugen übertragbaren Momente und Schubkräfte. Darüber hinaus wirken in den Längsfugen die aus einer Komprimierung der Dichtungsrahmen resultierenden Rückstellkräfte.

Die konstruktive Auslegung der Längsfuge hat so zu erfolgen, dass die mitunter hohen Ringnormalkräfte unter Berücksichtigung des gleichzeitig wirkenden Biegemoments schadlos übertragen werden können. Hierfür wird eine Kontaktfläche ausgebildet, die gegenüber den Ober- und Stirnflächen einen ausreichenden Randabstand aufweist und gegenüber dem sie umgebenden Rand leicht erhaben ausgebildet wird (**Abbildung 10**). Weiter sollte der Abstand zur Dichtungsnut ausreichend groß sein, um Spannungskonzentrationen im Bereich des Dichtungsprofils zu vermeiden. In der Regel wird die Kontaktfläche der



**Abbildung 10** Typische Ausbildung der Längsfuge

Längsfugen eben ausgebildet, wobei in Sonderfällen auch konvexe oder konkave Ausführungen zur Anwendung kommen können.

Eine näherungsweise zentrische Ausführung der Kontaktfläche zur Fugenachse wird empfohlen, um ungewollte Biegemomente aus einer Exzentrizität der Normalkraft zu vermeiden. Die Höhe der Kontaktzone hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf das Kraftübertragungs- und Verformungsverhalten des Ringes und ist sorgfältig auf die zu übertragenden Schnittgrößen abzustimmen (vgl. **Kap. 5.7**). Insbesondere sind die Randabstände der Kontaktfläche, unter Berücksichtigung des Dichtungsprofils so zu wählen, dass Randabplatzungen des Tübbingbetons ausgeschlossen werden. Dies ist insbesondere bei hohen Ringnormalkräften von Bedeutung.

Grundsätzlich sollten alle Ränder der Längsfuge abgeschrägt ausgeführt werden, um Abplatzungen zu vermeiden. An den Innenseiten der Längsfugen kann weiter eine schwalbenschwanz-förmige Nut angeordnet werden, um das nachträgliche Einbringen von Dichtungen zu ermöglichen (**Abbildung 10**). Um Versätze in der Längsfuge zu reduzieren, werden häufig Führungsstäbe aus Kunststoff, auch als „Guiding

Rods“ bezeichnet, eingesetzt. Diese Zentrierhilfen haben im Wesentlichen die Funktion, den Einbau der Tübbinge zu erleichtern, Versätze in den Längsfugen beim Ringbau zu minimieren und ein Gleiten des Schlusssteins nach innen zu verhindern.

Eine Nut-/Federausbildung der Längsfugen kann bei Montageungenauigkeiten schnell zu Schäden an den Fugenflanken führen und sollte daher nicht ausgeführt werden.

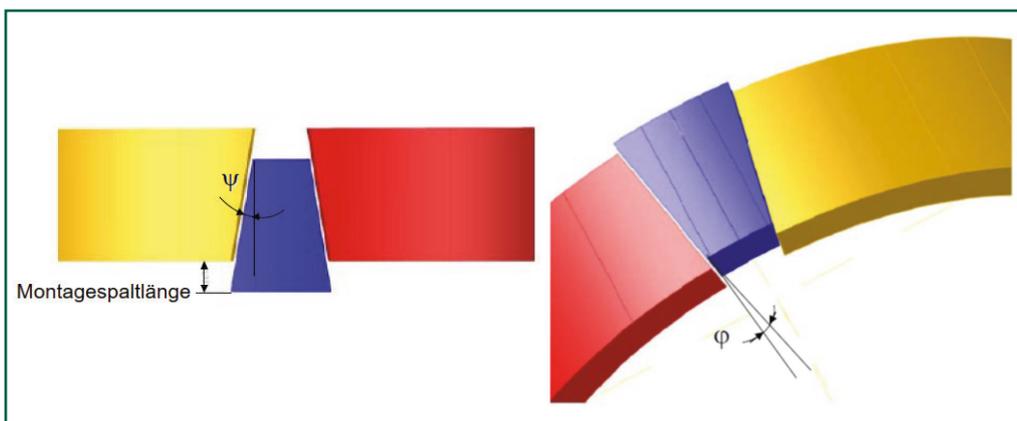
Um den Einbau der Tübbinge zu erleichtern, werden die Längsfugen um den Winkel  $\Psi$  zur Tunnel-längsachse geneigt ausgeführt (Längsfugenkonizität, **Abbildung 11**). Der Winkel der Längsfugenkonizität hat einen entscheidenden Einfluss auf die nötige Montagespaltlänge für den Einbau des Schlusssteins und damit den erforderlichen Hub der Vortriebspresen.

Beim Normalsystem werden nur die Längsfugen des Schlusssteins sowie der beiden angrenzenden Flankensteine mit einer Neigung zur Längsachse ausgeführt, während die Längsfugen der übrigen Steine (Normalsteine) senkrecht zur Ringachse stehen. Beim sogenannten Trapezesystem weisen hingegen alle Steine eines Ringes eine Längsfugenkonizität auf.

Zusätzlich zum Winkel  $\Psi$  werden die Längsfugen des Schlusssteins sowie der beiden Flankensteinen gegebenenfalls um einen Winkel  $\varphi$  zur Radialen geneigt ausgeführt, um das Einbringen des Schlusssteins von unten zu erleichtern und die Montagespaltlänge weiter zu verringern (Längsfugenwinkel, vgl. **Abbildung 11**).

Beide Winkel  $\psi$  und  $\varphi$  besitzen nicht nur einen erheblichen Einfluss auf die Ausführung des Ringbaus, sondern mitunter auch auf das statische System und das Tragverhalten des Ringsystems. Sie müssen daher sorgsam auf das gewählte Tübbingsystem abgestimmt und gegebenenfalls auch in den statischen Nachweisen berücksichtigt werden.

Bei kleinen Schlusssteinen wird empfohlen, die Längsfugen radial auszuführen, um ein Gleiten des Schlusssteins nach innen zu verhindern.



**Abbildung 11** Winkel der Längsfugenkeilform  $\Psi$  und der Längsfugenneigung  $\varphi$

### 3.3.3 Ringfuge

In den Ringfugen werden die Vortriebskräfte der TBM und die Koppelkräfte zwischen den Ringen übertragen. Die ungleichmäßige Lasteinwirkung durch Steuerkräfte bei Richtungsänderungen der Vortriebsmaschine ist mit in die Bemessung einzubeziehen. Folgende Fugenformen sind für die Ausbildung der Ringfugen gebräuchlich:

- Ebene Fuge
- Topf-Nocke-Ausbildung
- Nut-Feder-Fugenkonstruktion

Beim einschaligen Ausbau hat sich für die Ringfugen, wie auch bei den Längsfugen, die ebene Fuge durchgesetzt. Zusätzliche Zentrier- und Koppellemente können vorgesehen werden. Dies können Dübel, Zentrierkonen, bewehrte oder unbewehrte Topf-Nocke-Verzahnungen sein, wobei Dübel oder Zentrierkonen mittlerweile die Regel darstellen. Aufgrund der in der Vergangenheit gemachten Erfahrungen mit auftretenden Abplatzungen und Ausbrüchen sollte eine Topf-Nocke-Verzahnung nur angewendet werden, wenn eine ausreichend große Bautoleranz (in der Regel >15 mm) vorgesehen wird (siehe auch **Kap. 5.7**).

Eine Nut-Feder-Ausbildung in der Ringfuge stellt erhöhte Anforderungen an den Ringbau, da sich beim Vorschub bereits im Falle von geringeren Ringversätzen größere Abplatzungen einstellen können. Aus diesem Grund ist eine Nut-/Federausbildung beim einschaligen Tübbingausbau nicht empfehlenswert.

Die Ebenheit der gesamten Ringfuge eines Ringes, bezeichnet als Ringspiegel, wird wesentlich durch den Ringbau beeinflusst. Zur Lastdurchleitung an definierten Stellen und als Ausgleich von Unebenheiten werden in den Ringfugen häufig Zwischenlagen konstanter Dicke aus Hartfasermaterial oder Sperrholz vorgesehen. Plastisch verformbare Zwischenlagen (zum Beispiel Zwischenlagen aus bituminösem Material) sollten zu diesem Zweck nicht verwendet werden, da sie sich unter Lasteinwirkung plastisch verformen und damit ihre Wirkung verlieren. Bezüglich Maßhaltigkeit sind Hartkunststoffplatten von Vorteil. Grundsätzlich sind die Zwischenlagen und ihre Toleranzabweichungen bei der Auswahl und der Nachweisführung des Dichtungsprofils und von Verbindungsmitteln (z. B. Steckdübel) zu beachten und auf diese abzustimmen.

Eine Ausführung der Auskleidung ohne Zwischenlagen in den Ringfugen ist ebenfalls möglich, wobei in diesem Fall Ringbautoleranzen und Zwängungen weniger gut ausgeglichen werden können. Bei planmäßiger Kraftübertragung der Längskräfte ohne Zwischenlagen gelten entsprechend erhöhte Anforderungen an die Ringfugenebenheit. Die Kraftübertragungsflä-

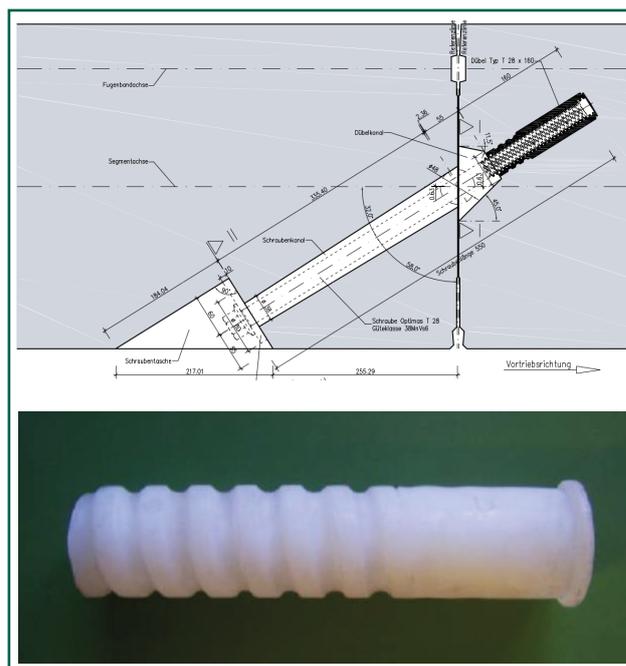
chen sollten in diesem Fall auf die Pressenschuhbereiche (ggf. unter Berücksichtigung einer Verrollung) begrenzt werden.

Bei der konstruktiven Durchbildung von Ringfugen ist Folgendes besonders zu beachten:

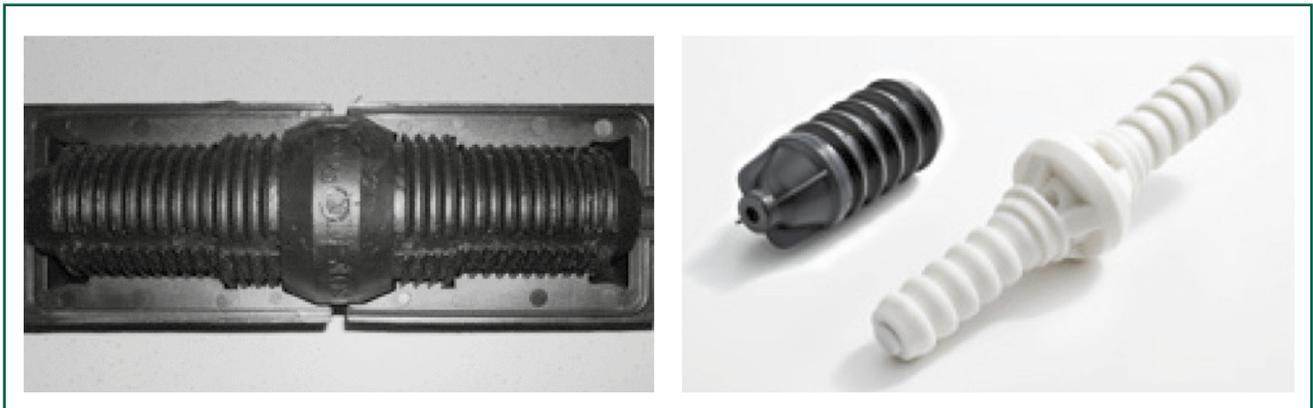
- Berücksichtigung von Fugenzwischenlagen auf der pressenabgewandten Seite und deren Zusammenrückbarkeit bei der Ringgeometrie
- Schnittstelle zur TBM: Anzahl, Lage und Abmessungen der Pressen bzw. Pressenschuhe
- Um Biegemomente in den Pressen und eine ausmittige Krafteinleitung am Tübbing, die zu „Krempelmomenten“ im Tübbingring führt zu vermeiden, sollte der Radius, auf dem die Pressen in der Maschine angeordnet sind, nach Möglichkeit mit dem Achsradius der Ringfuge übereinstimmen.
- Falls Vortriebspresen im Bereich der Längsfugen zu liegen kommen, muss sichergestellt werden, dass die Pressenkräfte nicht unmittelbar im Längsfugenbereich auf die Fugen einwirken (z. B. durch Abfasungen in den Kraftübertragungsflächen).

### 3.3.4 Verbindungsmittel

Als temporäre Verbindungsmittel in den Fugen der Tübbingauskleidung haben sich schräg geführte Schrauben mit Kunststoffdübeln (**Abbildung 12**) besonders bewährt. Sie stellen eine kraftschlüssige Verbindung dar, lassen sich leicht montieren und können problemlos wieder ausgebaut werden.



**Abbildung 12** Schraubenverbindungen mit Dübeln



**Abbildung 13** Steckdübel als Ersatz für die Verschraubung der Ringfuge

In der Ringfuge kommen anstelle der Verschraubungen vermehrt auch Steckdübelverbindungen zum Einsatz (**Abbildung 13**). Sie reduzieren die Versätze zwischen zwei Ringen erheblich, verkürzen bei exaktem Ringbau die Montagezeiten und vereinfachen durch Entfall der Schraubentaschen die Bewehrungsführung auf der Tübbinginnenseite.

Sofern Steckdübel anstelle von Verschraubungen eingesetzt werden, müssen sie zugfest ausgeführt werden, um die Rückstellkraft der Kompressionsfugendichtungen aufnehmen zu können. Dabei ist zu beachten, dass keine Vorspannung der Verbindung möglich ist, und somit ein geringfügiges Öffnen der Fuge („Schlupf“) im Millimeterbereich auftreten kann. Dies muss bei der Nachweisführung berücksichtigt werden.

Um den Schlupf einer solcher Steckdübelverbindung zu reduzieren, kann sich der Einsatz von speziellen Typen anbieten, die nur noch eine einseitige Klickverbindung aufweisen und auf der anderen Seite eingeschraubt sind.

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 der Ringspaltverfüllung bzw. nach dem Einbau von ca. 10 bis 15 Ringen wird diese Funktion meist nicht mehr benötigt, so dass die Schrauben entfernt werden können. Bei Verkehrstunnelbauwerken besteht die Pflicht, temporäre Schrauben im Bereich über dem Fahrweg zu entfernen, um ein Herausfallen 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.

In den Ringfugen werden teilweise auch Dübel zur Querkraftübertragung eingebaut (**Abbildung 14**), die insbesondere beim Ringbau und den zurückliegenden

den Ringen mit nicht ausgehärteter Ringspaltmasse die Stabilität des Ringes verbessern.

Kunststoff-Einbauteile haben auf die Dauerhaftigkeit des Tübbingringes in der Regel keinen negativen Einfluss. Es ist zu beachten, dass eingesetzte Kunststoffeinbauteile für den Einsatz unter Belastung für den jeweiligen Einsatzbereich geeignet sein müssen.

### 3.4 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 in diesem Fall in der Regel keine besonderen Einbauteile erforderlich.

Beim einschaligen Ausbau hingegen müssen spätere Befestigungsmöglichkeiten bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden. Grundsätzlich stehen dabei folgende Befestigungsmöglichkeiten zur Verfügung:

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



**Abbildung 14** Beispiele für Dübel zur Querkraftübertragung in den Ringfugen

Beim Einbau von Ankerschienen oder Befestigungsplatten ist darauf zu achten, dass die vorgesehene Position im Tunnel sichergestellt wird. Insbesondere bei keilförmigen, verdrehbar einzubauenden 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 betreffenden Tübbingringe muss auf die vorhandenen Einbauteile Rücksicht genommen werden. Die Lage der Ankerschienen oder Befestigungsplatten beeinflusst in der Regel auch die Ausbildung 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, wird empfohlen, 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 ist die Chloridbelastung bezüglich der Dauerhaftigkeit zu beachten und entsprechende Materialvorgaben sind einzuhalten. Bei großen Lasten, z. B. Lüftern, kann auch eine Befestigung direkt im Gebirge in Betracht gezogen werden. Der Tübbingausbau wird in diesem Fall allerdings perforiert („Knopfloch“), weshalb diese Art der Ausführung nur bei „gutmütigen“ hydrogeologischen Verhältnissen möglich ist.

## 3.5 Konstruktionstoleranzen

### 3.5.1 Grundsatzüberlegungen

Bei den Konstruktionstoleranzen handelt es sich um Herstelltoleranzen aus der Produktion des Einzeltübbings und Einbautoleranzen des Tübbingrings im Tunnel. Auffahrtoleranzen der Vortriebsmaschine, Einbautoleranzen des Tübbingrings in der Vortriebsmaschine sowie Verformungen des Tübbingrings beim Vortrieb und danach müssen gesondert betrachtet werden (vgl. hierzu **Kap. 5.7**).

Toleranzvorgaben dienen der Begrenzung von Maßabweichungen gegenüber der planmäßigen Tübbinggeometrie. Abweichungen können nur so weit zugelassen werden, als dass 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 in der Realität 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. Gründe für die strengen Toleranzanforderungen sind:

- Geometrische Empfindlichkeit gegenüber Ungenauigkeiten und Verdrehungen einzelner Tübbings,
- hohe Schnittkräfte im Tübbingring aufgrund von Lasteinwirkungen aus Erd-, Wasser- und Verpressdruck,
- hohe Pressenkräfte während des Vortriebs,
- die Lastübertragung findet nur in begrenzten Flächen statt (Teilflächenbelastung),
- Beschädigungen werden häufig erst aufgrund von Wasserzutritten erkannt (zum Beispiel Schäden an der Ringaußenseite),
- die Sanierung von beschädigten Tübbingringen ist kostspielig, zeitaufwändig und ggf. technisch/betrieblich nicht möglich.

### 3.5.2 Toleranzforderungen

Beim Einbau der Tübbings in der Vortriebsmaschine treten in der Regel Abweichungen von der Sollage auf. Abgesehen von meist vermeidbaren Einbaufehlern können auch Ovalisierungen des Ringes durch die Lasteinwirkungen, das Aufschwimmen des Ringes im Ringspaltverfüllmaterial und das Entstehen von Versätzen zwischen den Einzelsegmenten durch Zwängungen in der Schildschwanzdichtung auftreten.

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

Bezüglich der zulässigen Fugenversätze (Lastexzentrizitäten) wird auf **Kap. 5.7** verwiesen. 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, müssen in Summe so begrenzt werden,

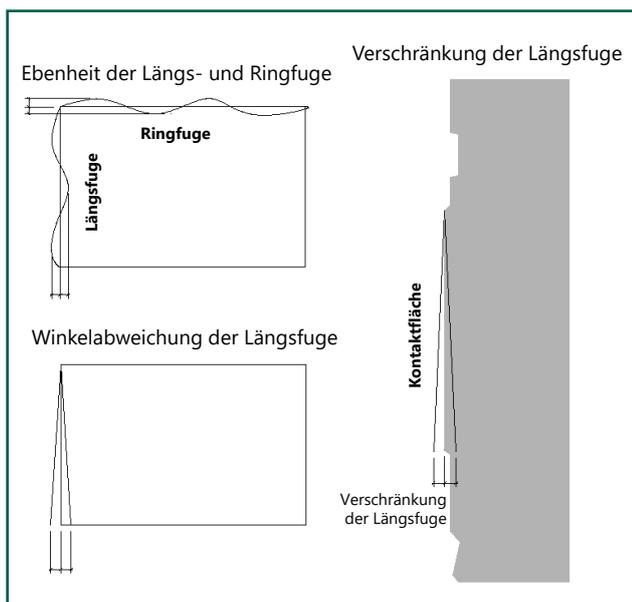
dass das geforderte Lichtraumprofil immer eingehalten wird.

Die in **Tabelle 3** genannten zulässigen Maßabweichungen gelten für die Referenzbedingungen gemäß **Kap. 11**. Sie 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 Werte linear interpoliert und auf volle 1/10 mm aufgerundet werden. Die ZTV-ING [2] gibt geringfügig abweichende Toleranzwerte vor.

Einen etwas anderen Ansatz zur Festlegung der zulässigen Toleranzwerte zeigt das Merkblatt „Tübbingtoleranzen – Herleitung und Anwendung“, welches die Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV) erarbeitet hat [29]. In diesem Merkblatt werden Toleranzklassen auf Basis einer Risikoanalyse im mathematischen Sinn ermittelt. Der Ansatz berücksichtigt die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkungen eines Schadens bzw. risikorelevanter Szenarien. Mit diesem Ansatz wird das Ziel verfolgt, dass bei einem

**Tabelle 3** Herstelltoleranzen für den Einzeltübbing und den gesamten Tübbingring (einschaliger Tübbingring mit Zwischenlagen in den Ringfugen)

Herstelltoleranz		Ringgröße (Innendurchmesser)	
		$\leq 8,0$ m	$\geq 11,0$ m
<b>1</b>	<b>Längsfugentoleranz bezogen auf die Kraftübertragungsfläche</b>		
1.1	Längsfugenverschränkung	$\pm 0,5$ mm	$\pm 0,7$ mm
1.2	Winkelabweichung der Längsfuge	$\pm 0,5$ mm	$\pm 0,7$ mm
1.3	Additionsregel für 1.1 und 1.2	$\pm 0,6$ mm	$\pm 0,9$ mm
<b>2</b>	<b>Abweichungen Gesamttübbing (bezogen auf die Mittelebene)</b>		
2.1	Tübbingbreite	$\pm 0,5$ mm	$\pm 0,7$ mm
2.2	Tübbingdicke	$\pm 3,0$ mm	$\pm 4,0$ mm
2.3	Tübbingbogenlänge	$\pm 0,6$ mm	$\pm 0,7$ mm
2.4	Innenradius jedes Tübbings	$\pm 1,5$ mm	$\pm 2,5$ mm
2.5	Differenz der Diagonalenlänge eines Tübbings zur Solllänge	$\pm 1,0$ mm	$\pm 2,0$ mm
2.6	Vertikaler Abstand der vierten Tübbingecke von der Ebene, die von den drei anderen Ecken gebildet wird	$\pm 5$ mm	$\pm 8$ mm
<b>3</b>	<b>Dichtungsnut</b>		
3.1	Dichtungsnutbreite	$\pm 0,2$ mm	$\pm 0,2$ mm
3.2	Dichtungsnuttiefe	$\pm 0,2$ mm	$\pm 0,2$ mm
3.3	Lage der Dichtungsnutachse	$\pm 1,0$ mm	$\pm 1,0$ mm
<b>4</b>	<b>Ebenheit der Kontaktzonen</b>		
4.1	Längs- und Ringfuge	$\pm 0,3$ mm	$\pm 0,5$ mm
<b>5</b>	<b>Toleranzen am gesamten Tübbingring</b>		
5.1	Außendurchmesser	$\pm 10$ mm	$\pm 15$ mm
5.2	Innendurchmesser	$\pm 10$ mm	$\pm 15$ mm
5.3	Außenumfang (in drei Höhen gemessen)	$\pm 30$ mm	$\pm 45$ mm
<b>6</b>	<b>Lage der Einbauteile</b>		
6.1	Erektorkonen	$\pm 2$ mm	$\pm 2$ mm
6.2	Schraubentaschen und -durchführungen	$\pm 1$ mm	$\pm 1$ mm



**Abbildung 15** Herstelltoleranzen am gefertigten Tübbing einschaliger Konstruktionen [2]

höheren Schadensrisiko geringere Maßabweichungen zulässig sind und bei einem geringeren Schadensrisiko größere Maßabweichungen akzeptiert werden.

Für die Ermittlung der zulässigen Maßabweichungen werden die geometrischen Abmessungen der Steine und die Baustoffcharakteristik berücksichtigt. Für jede einzelne zulässige Maßabweichung wurde jeweils eine mathematische Formel definiert, mit deren Hilfe der jeweilige Toleranzwert berechnet werden kann. Zur einfacheren Bestimmung der Toleranzen wurde ein entsprechendes Berechnungsmodul entwickelt. Mit diesem Berechnungsmodul können die Toleranzen für ein beliebiges Tübbingsystem mit den entsprechenden Hauptabmessungen der Segmente und einer Festigkeitsklasse berechnet werden.

Der Auftraggeber hat projektspezifisch festzulegen, welche Maßabweichungen zulässig sind.

### 3.5.3 Überschreitung der Herstellungstoleranzen

Sind Tübbinge außerhalb der Toleranzforderungen produziert worden, können diese nur dann eingesetzt werden, wenn die Verträglichkeit nachgewiesen werden kann. Dabei gilt grundsätzlich, dass Maßabweichungen nachträglich besser aufgenommen und nachgewiesen werden können, wenn der planmäßige Ausnutzungsgrad des Tübbings sowie des Dichtungsprofils geringer ist. Mögliche Maßnahmen bei Überschreitung der zulässigen Toleranzen werden im Folgenden beschrieben (siehe auch **Kap. 11** oder auch in [29]). Eine Abstimmung mit dem Auftraggeber wird hierzu dringend empfohlen.

#### ▪ Überschreitung der Tübbingbreitentoleranz

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

#### ▪ 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 Tübbinge in Bereichen mit geringerer Belastung einzubauen. Der Nachweis der Spaltzugbewehrung muss für die dort auftretende Spannung möglich sein.

#### ▪ Nachbarschaftsbeziehungen

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

Hierfür ist ein erheblicher Aufwand für das Sortieren der Tübbinge im Tübbinglager und für den Transport in die Vortriebsmaschine erforderlich. Diese Möglichkeit schränkt die Kombinierbarkeit verschiedener Tübbinge stark ein und sollte vom Bauherrn genehmigt werden.

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

## 4 Abdichtung der Tübbingfugen

### 4.1 Grundlagen

Die nachstehenden Ausführungen gelten für den einschaligen Ausbau, bei dem die Dichtfunktion allein durch die Tübbingschale zu erbringen ist.

Die Dichtigkeit der aus Stahlbetonfertigteilen zusammengesetzten Tunnelauskleidung wird nahezu ausschließlich durch die Dichtigkeit der Tübbingfugen bestimmt. Die Regellösung zur Abdichtung der Fugen sind umlaufend um die Tübbinge angeordnete Dichtungsrahmen entlang der Ring- und Längsfugen. Beim Ringbau werden die Dichtungsrahmen benachbarter Tübbinge gegeneinander sowie auf den Beton gedrückt. Da die Dichtwirkung allein auf der Kompress-

sion der Dichtungsrahmen beruht, muss diese in der für den aufzunehmenden Wasserdruck erforderlichen Größe überall entlang der Rahmen vorhanden sein. Dies gilt sowohl für die Kontaktflächen zum Beton als auch für die Fuge zwischen den Dichtungsrahmen sowie unter Berücksichtigung von Toleranzen.

Detailliertere Angaben zur Verwendung von Dichtungsrahmen können der STUVA-Empfehlung [56] entnommen werden. Weitere Vorgaben hierzu machen in Deutschland die Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Dichtungsprofile (TL/TP-DP) [28].

## 4.2 Anforderungen an Dichtigkeit, Dichtungen und an die Wasserableitung

Die Höhe des anzusetzenden Wasserdrucks ist durch den Bauherrn unter Berücksichtigung der projektspezifischen Wasserstände festzulegen.

Die Anforderungen an die Dichtigkeit der Tunnelschale sind vertraglich vorzugeben. Im Bauvertrag sind darüber hinaus auch Regelungen zu Maßnahmen der Nachdichtung, zulässigen Restwassermengen sowie deren Abführung zu formulieren. Beim Restwasser ist dabei zwischen Einzelzutritten und einem Gesamtwasseranfall über größere Tunnelstrecken, gegebenenfalls auch nach dem Ort des Wasserzutritts zu unterscheiden.

Rinnende oder tropfende Wasserzutritte sind in Verkehrstunneln im Regelfall nicht zugelassen. In Tunneln des Schienenverkehrs muss ein Abtropfen auf stromführende Einbauten einschließlich der Schienen verhindert werden. Im Fall von Versorgungstunneln oder Druckstollen können abhängig von den Randbedingungen geringere Anforderungen an die Dichtigkeit zulässig sein.

Die allgemeinen Dichtigkeitsanforderungen für Eisenbahntunnel sind der RiL 853.4101 [1] und für Verkehrstunnel den ZTV-ING, Teil 7, Abschnitt 3, Kapitel 8 [2] zu entnehmen. Sie sind allerdings nicht direkt für Tübbingschalen vorgesehen, da sich die Kriterien auf die Betonoberfläche und nicht auf die Fugen beziehen. In Anlehnung an die TL/TP DP [28] müssen die Dichtungsrahmen die folgenden Anforderungen mindestens erfüllen:

- Funktionsfähigkeit,
- Alterungsbeständigkeit,
- Langzeitdichtigkeit,
- Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse auch aus dem Betrieb des Tunnels,
- Materialverträglichkeit mit den umgebenden Medien.

Als Maßnahme im Fall von tropfenden Wasserzutritten können in den Tübbingfugen Dichtprofile zur Nachdichtung eingeschlagen werden, so dass das Tropfwasser innerhalb der Fugen abgeleitet wird und nicht in den Tunnelinnenraum eintritt. Damit diese Dichtprofile in den Tübbingfugen mit ausreichend gutem Halt eingeklemmt werden können, sind dann die Fugen innenseitig entsprechend geometrisch auszubilden, meist als schwalbenschwanzförmige Nuten. Dabei handelt es sich in der Regel um eine vorübergehende Maßnahme, bevor eine weitergehende und endgültige Nachdichtung vorgenommen wird (siehe hierzu Kap. 11.3)

Zusätzlich zum Restwasser aus Undichtigkeiten wird bei befahrenen Tunneln Schleppwasser eingetragen und ist bei einem Brandereignis Löschwasser abzuführen. Auch kann es bei längeren Tunneln im Sommer zu erheblicher Tauwasserbildung kommen. Eine rückstaufreie Abführung des anfallenden Wassers sollte daher zumindest bei Verkehrstunnelbauwerken planmäßig vorgesehen werden. Eine durchgehende Entwässerungsleitung mit Revisionschächten und erforderlichenfalls mit Pumpanlagen wird hierfür empfohlen.

## 4.3 Dichtungsrahmen

Tübbingdichtungen bestehen in der Regel aus EPDM-Kunstkautschuk. Die Dichtungsprofile werden im Extrusionsverfahren gespritzt und anschließend vulkanisiert. Durch Zuschneiden der geradlinig hergestellten Profile und Anvulkanisieren von Ecken werden sie zu Dichtungsrahmen zusammengesetzt. Gemäß STUVA-Empfehlung [56] stellt eine Ausbildung der Ecken durch Folienvulkanisation keine ausreichende Verbindung dar.

Es werden sowohl eingeklebte als auch verankerte Dichtungsprofile verwendet.

Bei eingeklebten Dichtungen erfolgt die Montage am betonierten Tübbing durch Einkleben in eine im Beton eingeformte Nut. Diese soll sicherstellen, dass der Dichtungsrahmen während des Ringbaus sowie im eingebauten Zustand in der vorgesehenen Lage bleibt und dadurch die Dichtwirkung aufgebaut werden kann.

Ein verankertes Dichtungsprofil weist Verankerungsfüße oder -rippen als Teil des Profilquerschnitts an der Profilunterseite auf. Bisweilen werden als technische Neuerung auch Fasern nachträglich am Profil angeklebt. Das Profil wird vor dem Betonieren eines Tübbings in die Schalformen eingelegt und direkt einbetoniert. Zur Aufnahme der Dichtungsrahmen mit Verankerung müssen die Schalungen mit einer entsprechenden innenliegenden Halte-Nut ausgestattet werden. Hinsichtlich der Bewehrungskörbe ist zu beachten, dass diese konfliktfrei in die Schalungen

durch die darin bereits befestigten Dichtungsrahmen eingehoben werden können.

Verankerte Dichtprofile bieten den Vorteil, dass nachträgliche Verklebungsarbeiten entfallen können. Ablösungen während der Transporte und der Lagerung können ebenfalls weitgehend ausgeschlossen werden. Darüber hinaus verringert sich bei verankerten Profilen das Risiko einer reduzierten Dichtwirkung durch Umläufigkeit. Dem steht der Nachteil gegenüber, dass im Fall einer dennoch erforderlichen Instandsetzung diese für verankerte Profile aufwändiger als bei eingeklebten Dichtrahmen ist. Entsprechend sind verankerte Profile während der gesamten Zeit von Produktion bis zum Einbau vor Ort gegen Beschädigung zu schützen.

Eine frühzeitige Abstimmung zwischen Planer, Schalungshersteller und Profilverhersteller ist bei Dichtungsprofilen aufgrund der vorzusehenden Geometrien der Halte-Nut, der Kontaktfläche sowie des Randabstandes der Dichtung in jedem Fall zu empfehlen.

Beim Ringbau wird durch die Kompression der gegenüberliegenden Dichtungsrahmen eine Rückstellkraft in den Dichtungen erzeugt. Die dadurch entstehenden Spannungen im Profilquerschnitt wirken sowohl auf die Nutgründe als auch auf die Nutflanken und bewirken als Gegendruck zum anstehenden Wasserdruck die Dichtigkeit in den Fugen. Die Rückstellkraft der eingebauten Dichtungen verringert sich über die Zeit; anfangs schnell, später sehr langsam. Dieser Vorgang wird als Spannungsrelaxation bezeichnet und verringert die Dichtwirkung. Zur langfristigen Sicherstellung der Dichtigkeit müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

- Materialbeständigkeit des Dichtungsprofils,
- Erhaltung der für die Dichtigkeit mindestens erforderlichen Kompression über die gesamte Nutzungsdauer.

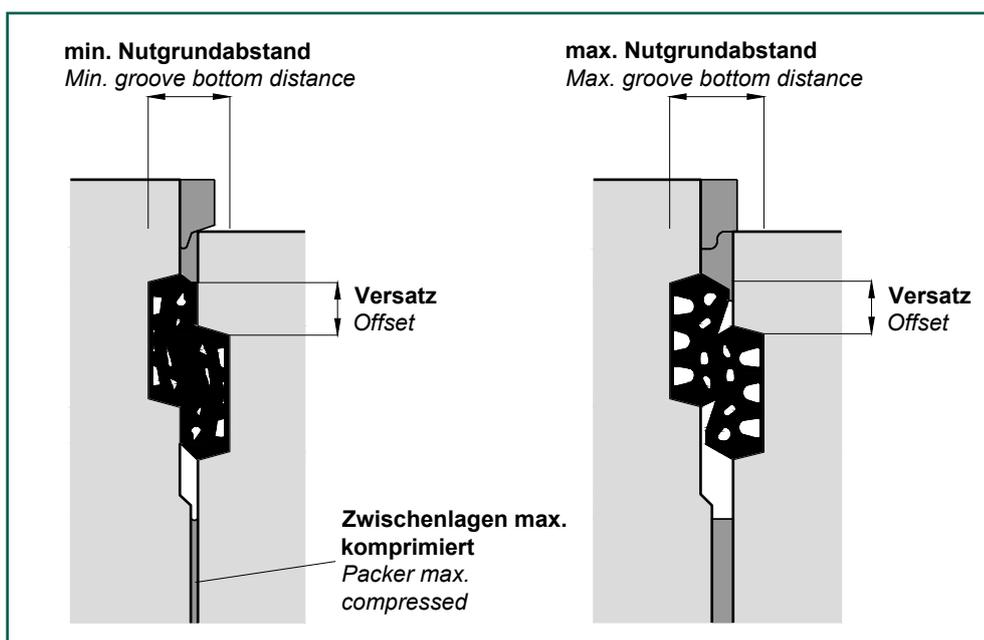
Für die Dimensionierung der Dichtung sind der Nutgrundabstand sowie die Nuttiefe und der Versatz nach dem Einbau der Tübbinge relevante Größen (vgl. **Abbildung 16**).

Bei einem doppelten Dichtungssystem wird sowohl außen- als auch innenliegend eine Dichtungsebene angeordnet. Die daraus erhofften Vorteile einer höheren Dichtigkeit haben sich aber nicht nachhaltig bestätigt.

#### 4.4 Rahmenecken

Die Ecken der Tübbinge stellen in einer Tübbingschale meist die kritische Stelle dar. Um Betonabplatzungen zu vermeiden, muss der Hersteller die Form für die Rahmenecken so gestalten, dass die Volumenkonzentration von Elastomer in der Ecke möglichst begrenzt wird.

Zur Vermeidung von Unstetigkeiten in der Dichtung ist beim Einkleben der Dichtrahmen in die Betonnuten bzw. beim Einklipsen der verankerten Dichtrahmen in die Schalungen auf den gleichmäßigen Einbau und dessen Reihenfolge zu achten. Die an den montierten Dichtungsrahmen ggf. zu beobachtende Vertiefung bzw. Erhöhung der Eckenspitze gegenüber der Profilkontaktfläche sollte gemäß STUVA-Empfehlung [56] die Größe von 5 mm nicht überschreiten. Darüber hinaus gehende Anforderungen sind der STUVA-Empfehlung zu entnehmen.



**Abbildung 16**  
Nutgrundabstand und Versatz nach [56]

Beim Ringbau entstehen beim Einschieben der Tübbinge bei Kontakt zwischen den aneinandergrenzenden Dichtungen Reibungskräfte in Längsrichtung der Rahmen. Diese Kräfte können die Dichtungsrahmen stark beanspruchen und in Längsrichtung verschieben. Besonders groß ist diese Gefahr beim Einschieben des Schlussteins. Daher sollte insbesondere in den Rahmenecken auf eine sichere Fixierung des Dichtprofils gegen Verschieben in Längsrichtung geachtet werden.

## 4.5 Beeinflussung der Dichtwirkung

Die Dichtwirkung eines Dichtungsprofils kann durch nachfolgende Abweichungen aus Produktion und Montage der Tübbinge maßgeblich beeinflusst werden:

- 1) Maßtoleranzen der Tübbings,
- 2) Kiesnester und Luftblasen bzw. -poren im Beton der Dichtungsnut,
- 3) Ringbautoleranzen und Ringverformungen,
- 4) Maßtoleranzen in den Dichtungsrahmen, einschließlich Gewichts- bzw. Steifigkeitstoleranzen des Dichtungsprofils,
- 5) Toleranzen der Geometrie und des mechanischen Verhaltens in den Rahmenecken,
- 6) Unstetigkeit aus Höhenversprung infolge Längsversatz benachbarter Dichtungsrahmenecken durch die Montage der Rahmen oder den Ringbau,
- 7) unplanmäßige Dehnungen und Stauchungen sowie Loslösung aus der Dichtungsnut beim Ringbau,
- 8) Versatz der Dichtungsrahmen,
- 9) ungenügendes Zusammendrücken der Dichtungsrahmen, d. h. unplanmäßig vergrößerter Nutgrundabstand,
- 10) bei eingeklebten Dichtungsrahmen Maßtoleranzen der eingeformten Dichtungsnut.

In den Dichtigkeitsprüfungen gemäß STUVA-Empfehlung [56] bzw. TL/TP DP [28] werden der Versatz und der Nutgrundabstand variiert. Für eine Lebensdauer von 100 Jahren wird der Einfluss der Relaxation der Dichtung sowie der übrigen Abweichungen demnach durch eine Erhöhung des Prüfdrucks im Vergleich zum tatsächlich aufzunehmenden Wasserdruck um den Faktor 2 erfasst.

## 4.6 Betonabplatzungen an der Dichtungsnut

Zu hohe Rückstellkräfte der Dichtungsrahmen können insbesondere im Eckbereich der Tübbinge zum

Abplatzen des Betons führen. Abplatzungen oder Rissbildungen im Bereich der Dichtungsnut führen zu einer Verringerung oder gar zu einem Verlust der Dichtigkeit und sind daher unbedingt zu vermeiden.

Der Randabstand, dies ist der Abstand von der äußeren Kante der Dichtungsnut zur äußeren Oberfläche des Tübbings, hat auf das Abplatzverhalten im Bereich der Dichtungsnut einen entscheidenden Einfluss. Er sollte unbedingt ausreichend groß gewählt werden, um Betonabplatzungen in den Ecken zu vermeiden. Aufgrund der unterschiedlichen Einflussfaktoren ist eine einfache Empfehlung zur Größe des Randabstandes aber schwierig. Als erster Anhaltswert wird für eingeklebte Dichtungen ein Randabstand größer oder gleich der Nutgrundbreite, mindestens aber 30 mm empfohlen. Größere Randabstände von 40 mm bis 50 mm sind nach Möglichkeit vorzuziehen.

Im Vergleich zu eingeklebten Dichtungen findet bei Dichtungen mit Verankerungsfüßen ein tieferer Eintrag der Rückstellkräfte in den Beton statt und es tritt eine höhere Kerbwirkung im Beton auf. Daher können Dichtungsrahmen mit Verankerungsfüßen ein höheres Risiko für Abplatzungen aufweisen. Neuentwicklungen mit abgerundeten Rahmenecken oder Faserverankerungen versuchen diesem Umstand entgegenzuwirken.

Benachbarte Tübbinge sollten im Bereich des Randabstandes auch bei maximal komprimierter Dichtung einen Spalt von mindestens 3 mm, besser 5 mm, aufweisen, um einen Kontakt der Betonflächen auch bei unplanmäßigen Verdrehungen zu vermeiden. Größere Spaltmaße, die aus konstruktiven Gründen vorgesehen werden, sind möglich.

Als Nutfüllungsgrad wird der Anteil des festen Dichtungsmaterials am betrachteten Gesamtquerschnitt bezeichnet. Den Rest gegenüber 100 % machen die luftgefüllten Kammern aus. Der Nutfüllungsgrad nimmt bei der Kompression des Dichtprofils zu, wobei die Steifigkeit stetig anwächst. Beim Erreichen von 100 % gibt es einen sprunghaften Anstieg der Steifigkeit, weil dann nur noch die Elastizität des Feststoffs maßgebend ist.

Zur Vermeidung hoher Rückstellkräfte und daraus resultierender Betonabplatzungen soll der Nutfüllungsgrad des Dichtungsprofils bei planmäßiger Kompression kleiner als 90 % gewählt werden. In jedem Fall soll der Füllungsgrad auch bei ungünstiger Kombination der zulässigen Toleranzen weniger als 100 % betragen, damit keine vollständige Nutfüllung vorliegt.

Zusätzlich sollte vermieden werden, dass die Dichtprofile beim Tübbingeinbau niedrigen Temperaturen ausgesetzt sind, da die Dichtprofile hierdurch versteifen und die Rückstellkräfte zunehmen. Gegebenenfalls sind entsprechende Gegenmaßnahmen vorzusehen.

## 4.7 Prüfungen und Versuche

### 4.7.1 Grund- und Eignungsprüfungen

Bezüglich der Anforderungen an den Dichtungsrahmen bzw. das Dichtungsprofil verweist die für Straßentunnel geltende ZTV-ING, Teil 7 [2], im Abschnitt 3 unter 8.2.2 auf die TL/TP DP [28]. Die für Eisenbahntunnel geltende RiL 853 [1] schließt sich im Modul 4005 unter (14) dieser Vorschrift an. Umfangreiche Angaben zu Versuchen und deren Durchführung können der STUVA-Empfehlung [56] entnommen werden, auf die ebenfalls in den TL/TP DP verwiesen wird.

Die Prüfungen werden in Grund- und Eignungsprüfungen unterschieden. Mit der Grundprüfung werden die generellen Eigenschaften eines Dichtungsprofils untersucht, wobei es sich in erster Linie um Materialeigenschaften und allgemeine Eigenschaften der Dichtungsprofile handelt, die in [1] und [28] näher erläutert werden.

Bei den Eignungsprüfungen handelt es sich um ergänzende projektbezogene Prüfungen, die unter Berücksichtigung der projektspezifischen Randbedingungen wie Nutgeometrie, Wasserdruck und Tübbingbeton durchzuführen sind. Auf diese Prüfungen kann unter Umständen verzichtet werden, wenn aus vorangegangenen Projekten ausreichend vergleichbare Erfahrungen vorliegen. Die im Folgenden aufgeführten projektbezogenen Prüfungen sollten in der angegebenen Mindestanzahl durchgeführt werden:

- Rückstellkraft des Dichtungsprofils sowie der Rahmenecken, jeweils mindestens 3 Einzelversuche,
- Wasserdichtigkeit, mindestens 2 Einzelversuche,
- Abplatzverhalten des Tübbingbetons, mindestens 2 Einzelversuche.

Die Eignungsprüfungen werden in der Regel in einer geeigneten Versuchsanstalt durchgeführt.

Da Dichtungsprofile ein ausgeprägt temperaturabhängiges Verhalten aufweisen, sind bei außergewöhnlichen Temperaturbedingungen ggf. projektspezifische Betrachtungen anzustellen.

### 4.7.2 Versuche zur Bestimmung der Rückstellkräfte

Die Rückstellkraft eines Dichtungsprofils wird insbesondere für die Bemessung der Verbindungselemente in den Ring- und Längsfugen benötigt. Darüber hinaus wird die Rückstellkraft bei der rechnerischen Betrachtung des Spannungszustandes im Beton im Nahbereich der Dichtungsnut herangezogen, um hieraus Rückschlüsse auf ein mögliches Abplatzverhalten in den Eckbereichen des Tübbings ziehen zu können. Zur Bestimmung der Rückstellkräfte hat sich der in der STUVA-Empfehlung [56] beschriebene Versuchsaufbau und -ablauf bewährt. Zu unterscheiden sind Prüfungen für gerade Profilstücke und für Rahmenecken.

Aufgrund der steiferen Ausbildung der Rahmenecken ist die Rückstellkraft an diesen Stellen gegenüber den geraden Profilabschnitten lokal erhöht und muss daher separat bestimmt und bei der Nachweisführung berücksichtigt werden. Die im Versuch ermittelten Rückstellkräfte werden in einem Kraft-Weg- sowie einem Kraft-Zeit-Diagramm dargestellt.

### 4.7.3 Versuche zum Nachweis der Wasserdichtigkeit

Die Versuche zum Nachweis der Wasserdichtigkeit werden je nach Projekterfordernis an einem T-Stoß, an einem Kreuzungsstoß oder an beiden Stößen durchgeführt. Bei diesen Versuchen wird die materialbedingte Spannungsrelaxation abhängig von der vorgesehenen Nutzungsdauer durch einen gegenüber dem Bemessungswasserdruck erhöhten Prüfwasserdruck erfasst.

Versuchsaufbau und Versuchsablauf zum Nachweis der Dichtigkeit werden sowohl in den STUVA-Empfehlungen als auch in den TL/TP DP beschrieben, wobei der Aufbau der Versuche praktisch gleich ist. Unterschiede bestehen jedoch in der Versuchsdurchführung, so dass die anzuwendende Richtlinie bzw. Prüfvorschrift projektspezifisch vorzugeben ist.

### 4.7.4 Versuche zum Abplatzverhalten

Abhängig von den anzuwendenden Richtlinien sind Abplatzversuche an Betonkörpern durchzuführen, um zu überprüfen, ob die Rückstellkräfte der Dichtungsrahmen durch die Tübbinge aufgenommen werden können. Entsprechende Vorgaben sind in den Projektspezifikationen vorzusehen.

Nach TL/TP DP [28] sind Abplatzversuche durchzuführen. Die RiL 853 sieht dies hingegen nicht vor. Die STUVA-Empfehlungen [56] ermöglichen, auf Abplatzversuche zu verzichten, wenn über das Abplatzverhalten des gewählten Dichtungsrahmens ausreichende praktische Erfahrungen sowie ggf. ergänzende rechnerische Abschätzungen oder Versuchsergebnisse vorliegen, die unter vergleichbaren Projekttrandbedingungen gemacht wurden. Abplatzversuche sollten in jedem Fall vor Beginn der Serienfertigung der Tübbinge durchgeführt werden.

Die Durchführung der Versuche ist sowohl in der TL/TP DP als auch in den STUVA-Empfehlungen beschrieben, wobei die Vorgaben zum Versuchsaufbau hinsichtlich der Abmessungen der einzusetzenden Dichtungsrahmen sowie der Fugenkomprimierung in diesen Dokumenten voneinander abweichen.

## 4.8 Auswahl des Dichtungsprofils

Bei der Auswahl der Dichtung ist auf ausreichende Dichtwirkung unter Berücksichtigung zu beachtender Versatzmaße sowie zu erwartender Fugenöffnungen in den Längsfugen aufgrund einer Verformung der Tübbingröhre zu achten. Eine höhere Dichtwirkung resultiert in der Regel in einer höheren Rückstellkraft, die wiederum höhere Randabstände zum Vermeiden von Betonabplatzungen erfordert.

Nach Möglichkeit sollten bereits bewährte und ausreichend getestete Dichtungsprofile verwendet werden, da für diese Planungssicherheit besteht. Die Neuentwicklung einer Dichtung liegt im Aufgabenbereich der Hersteller. Hierbei wird im Regelfall ein Iterationsprozess durchlaufen. Projektbezogen kann dies unter Einbeziehen der übrigen Projektbeteiligten, Baufirma, Planer, Bauherr mit seinen Sachverständigen, Prüfsingenieur, Prüfinstituten und Materialprüfanstalten erfolgen. Die Zulassung eines Dichtungsprofils erfolgt durch Nachweis der erfolgreichen Prüfung der Dichtung. Die Prüfungen sind projektbezogen vorzugeben.

**Abbildung 17** kann als Hilfsmittel verwendet werden, um zu prüfen, ob ein Dichtungsprofil die gestellten Anforderungen grundsätzlich erfüllen kann. Es stellt die Abhängigkeit zwischen der Rückstellkraft  $F$ , dem Prüfwasserdruck  $p$  und der Profilquerschnittsgröße  $A$  für folgende Randbedingungen dar.

- Rückstellkraft  $F$  [kN/m] wird nach 5 Minuten Relaxation gemessen.
- Die Dichtigkeit wird bei einem Prüfwasserdruck  $p$  [bar] über 20 bis 24 Stunden Versuchszeit, einem

Versatz von 10 mm und einem Nutgrundabstand, der 5 mm größer als derjenige der zugehörigen Rückstellkraft ist, bestimmt.

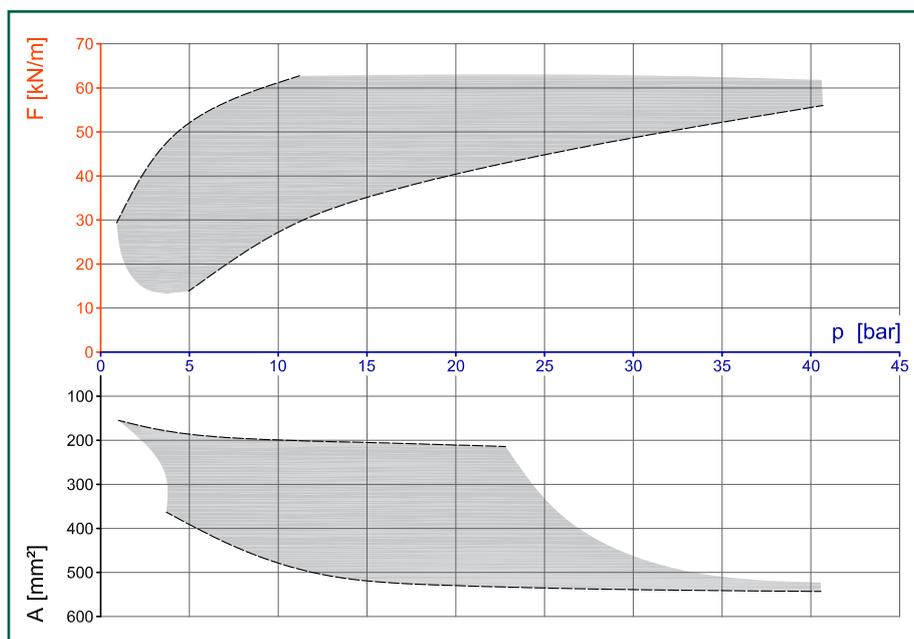
Mit Hilfe des Diagramms kann beispielsweise ermittelt werden, welche Rückstellkräfte bzw. Größe ein Dichtungsprofil voraussichtlich aufweisen muss, um gegenüber einem bestimmten Prüfwasserdruck ausreichend dicht zu sein. Sollte ein Dichtungsprofil mit den seitens des Herstellers gemachten Angaben zu Dichtigkeit, Rückstellkraft und Profilquerschnitt unter den oben genannten Randbedingungen außerhalb der grau schraffierten Anwendungsbereiche liegen, wird empfohlen, zusätzliche Betrachtungen bzw. projektspezifische Versuche durchzuführen, um die angegebenen Größen zu überprüfen.

Es ist zu beachten, dass die Verwendung dieses Hilfsmittels keine geforderten Versuche oder sonstigen Nachweise ersetzt.

Es ist anzumerken, dass höhere Prüfdrücke erreicht werden können, wenn geringere Versätze als 10 mm bzw. geringere Nutgrundabstände vorgesehen werden. Dies kann beispielsweise durch entsprechende konstruktive Maßnahmen in der Tübbingplanung erreicht werden.

## 4.9 Einfluss von Verbindungsmitteln auf die Dichtigkeit

Beim Einsatz von Kompressionsfugenbändern ist im Regelfall eine temporäre Verschraubung oder Verdübelung der Ring- und Längsfugen erforderlich, die benachbarte Tübbinge bis zum Aushärten des Ringspaltverfüllmaterials gegen die Rückstellkraft der Dich-



**Abbildung 17**  
Kraft-Dichtigkeit-Querschnitt-Diagramm gemäß  
STUVA-Empfehlung [56]

tungsrahmen gegenseitig verspannt. Bezüglich der statischen Nachweise der Verbindungsmittel wird auf **Kap. 5** verwiesen.

Das Kraft-Verformungsverhalten der Verbindungsmittel hat einen Einfluss auf die Kompression und damit auf die Dichtigkeit eines Dichtungsprofils und ist daher in die Gesamtbetrachtung des Systems mit einzubeziehen.

Im Bereich von Querschlägen, im Übergang zu Schächten oder Haltestellen sowie an den Tunnelenden sind in der Regel besondere Maßnahmen vorzusehen, um größere Verformungen und damit einhergehende Dekompressionen der Profile auszuschließen. Nähere Angaben hierzu sind **Kap. 10** zu entnehmen.

#### 4.10 Nachweise der Dichtigkeit

Für den Nachweis der Dichtigkeit sind projektspezifische Vorgaben zum Prüfdruck erforderlich. Falls keine Angaben gemacht sind, wird empfohlen, auf den anstehenden Wasserdruck den Faktor 2 anzuwenden (vgl. **Kap. 5**).

Für den Dichtigkeitsnachweis sind der anzusetzende Versatz und die Vergrößerung des planmäßigen Nutgrundabstandes im Rahmen der Planung zu beachten. In der Vergangenheit haben sich eine Fugenöffnung von 5 mm und ein maximaler Versatz von 20 mm bewährt. Durch Verwenden von Zentrierhilfen konnte in der jüngeren Vergangenheit ein qualitativ deutlich verbesserter Ringbau erreicht werden, der eine Verringerung des Versatzes auf 10 mm rechtfertigt.

Die Größe der Fugenöffnung ist abhängig von Tübbinggeometrie und zu erwartenden Verformungen anzusetzen. Bei Verwenden von Dübelverbindun-

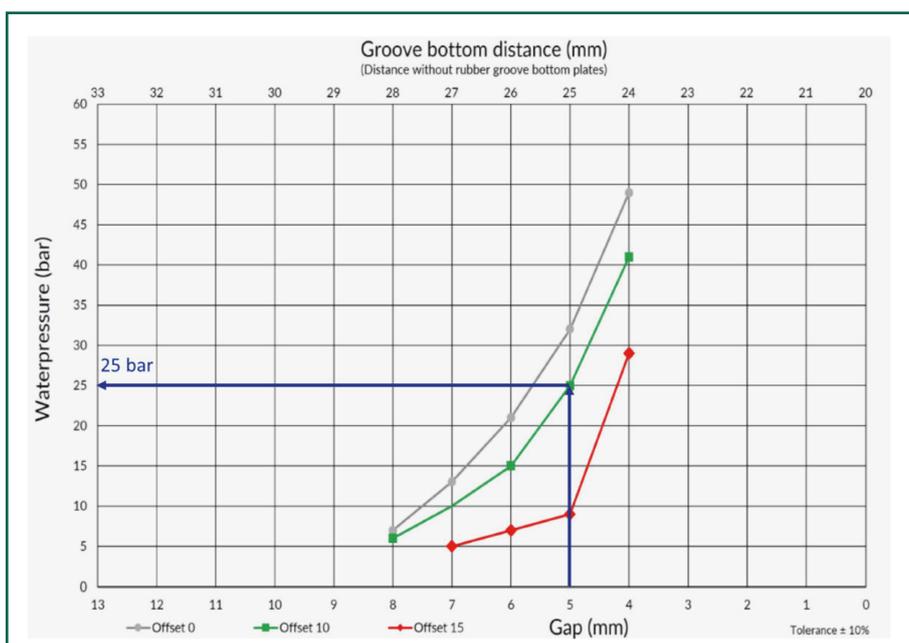
gen, insbesondere bei Dübeln mit geringer Steifigkeit, können für die Ringfugen weitergehende Überlegungen zu einer vergrößerten Fugenöffnung infolge des Last-Verformungsverhaltens der Verbindungen erforderlich sein. Der Nachweis der Dichtigkeit kann zum einen über die in **Kap. 4.7.3** beschriebenen Versuche erfolgen. Weiter können bestehende und in Form von Dichtigkeitsdiagrammen vorliegende Versuchsergebnisse verwendet werden, in denen der aufnehmbare Wasserdruck in Abhängigkeit vom Nutgrundabstand und Nutgrundtiefe bzw. der Fugenöffnung dargestellt ist (**Abbildung 18**).

#### 4.11 Maß- und Gewichtstoleranzen des Dichtungsprofils

Die Einhaltung der üblichen Herstellungstoleranzen (vgl. **Kap. 4.5**), die sich nur auf die äußeren Abmessungen von Höhe und Breite beziehen, reicht häufig nicht aus, um ein konstantes Bauteilverhalten zu gewährleisten. Entscheidend sind Schwankungen des gesamten Gummivolumens, die sich in 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.

#### 4.12 Nachdichtung

Die Notwendigkeit, bestehende Undichtigkeiten zu beseitigen, ist bei Neubauten in der Regel vertraglich



**Abbildung 18**  
Beispiel für ein Dichtigkeitsdiagramm

geregelt. In technischer Hinsicht ist eine nachträgliche Abdichtung bzw. Instandsetzung auch abhängig von der Art des Tunnels und der möglichen Auswirkung einer Undichtigkeit auf die geforderten Eigenschaften des Bauwerks. Der Erfolg einer Abdichtung oder Instandsetzung hängt von mehreren Faktoren ab, insbesondere der Schadensursache und dem Zeitpunkt Ihres Auftretens. Bei den Ursachen ist zu unterscheiden zwischen:

- Montageungenauigkeiten einschließlich ungenügender Kompression der Dichtprofile an unbeschädigten Tübbing,
- alterungsbedingtem Abbau der Kompression,
- von einer Dichtungsnut ausgehenden Betonabplatzung, die örtlich die Dichtbandkompression gänzlich verhindert bzw. zunichte macht.

Undichtigkeiten der Fugendichtungen an unbeschädigten Tübbing lassen sich in aller Regel durch eine Nachinjektion beseitigen. Dafür sind verschiedene Verpressmaterialien und verschiedene Arten der Einbringung geeignet. Als Material kommen Zementsuspensionen und chemische Stoffe, insbesondere Acrylatgele, in Betracht. Bei der Wahl spielen sowohl die Fließeigenschaften und das Verhalten im Endzustand als auch die Kosten eine Rolle. Für das Festlegen der Vorgehensweise sind in der Regel Versuche erforderlich. Zusätzlich ist auf die Materialverträglichkeit der eingesetzten Produkte zu achten.

#### 4.12.1 Konventionelle Injektion

Die Regelwerke [28] und [56] sehen vor, dass die Außenseite eines Tübbinge zum Zwecke der Nachdichtung über Betonbohrungen erreicht wird. Ein gezieltes Anbohren des Fugenspaltes hinter dem Dichtrahmen erfolgt durch das exakte Ansetzen einer Schrägbohrung. Dies ist sehr aufwändig und beinhaltet das Risiko einer Beschädigung der Dichtung, unter Umständen ist das mehrmalige Ansetzen für eine Bohrung erforderlich, um den abzudichtenden Bereich ausreichend gut mit Injektionsgut beaufschlagen zu können. Die Herstellung von Bohrungen senkrecht zur Tübbingoberfläche und damit parallel zur Fuge ist deutlich einfacher und risikoärmer. Allerdings gelangt das Injektionsgut dabei zunächst in den verfüllten Ringspalt, um von dort im Verlauf der Injektion seinen Weg in den Fugenspalt und bis zur undichten Stelle zu finden. Ein Großteil des Injektionsguts ist – sofern es überhaupt an der „richtigen“ Stelle ankommt – für die Zurücklegung des Wegs zur Undichtigkeit erforderlich. Vor allem bei Verwendung chemischer Injektionsmittel kann das sehr hohe Kosten verursachen.

#### 4.12.2 Injektion über vorinstallierte Schläuche

Um den äußeren Fugenspalt direkt zu erreichen, wurden Systeme entwickelt, bei denen in die Fuge führende Injektionsschläuche in einzelne Tübbinge einbetoniert werden (**Abbildung 19**). Die Schläuche kommen dabei entweder in Verlängerung von planmäßig vorhandenen Verpressstutzen oder in Verlängerung der Aussparungen für die Erektorkonen zu liegen. Der Zugang zu den Schläuchen erfolgt mittels Anbohren. Ein Problem kann die dauerhafte Abdichtung des von der Tübbingaußenseite ins Tunnelinnere führenden Kanals darstellen. Bei Verwendung eines nicht erhärtenden Acrylaltgels wird dieses durch den Bergwasserdruck aus dem Schlauch gedrückt. Für diesen Fall müssen die Verschlussorgane an der Tübbinginnenseite auf den vollen Wasserdruck bemessen werden.

#### 4.12.3 Nadelinjektion

Als Neuentwicklung wurde erstmals beim Finnetunnel der Deutschen Bahn eine Nachdichtungsinjektion unmittelbar durch die Dichtung selbst vorgenommen. Dabei wird eine Injektionshohlnadel durch die Fugendichtung geschlagen, ohne dass ein Materialabtrag aus der Dichtung erfolgt. Diese Nadel besitzt ein Rückschlagventil gegen das Zurücklaufen des Injektionsgutes.

Das Durchstoßen der Dichtungsprofile für die Nachdichtungsinjektion setzt voraus, dass die Ansatzstelle zugänglich ist. Hierfür ist insbesondere bei außenliegenden Dichtungen meist die Herstellung einer radialen Betonbohrung in der Tübbingfuge erforderlich. Bei Fugen ohne Spalt, wie Ringfugen ohne Zwischenlagen und Längsfugen, besteht die Gefahr, dass die Bohrung verläuft und ihr Ziel verfehlt. Der Bohrvorgang kann erheblich erleichtert werden, wenn die Fugenoberfläche in regelmäßigen Abständen rinnenartige Vertiefungen aufweist, die der Bohrspitze eine Führung geben. Dies ist durch einen entsprechenden Auftrag auf die Tübbingschalung leicht realisierbar und wird insbesondere bei Tübbing mit



**Abbildung 19** Injektionsschläuche zur nachträglichen Fugenabdichtung

außenliegenden Dichtungen und hohen Anforderungen an die Dichtigkeit empfohlen.

## 5 Tragwerksplanung

### 5.1 Baugrundeigenschaften (Geologie, Hydrologie)

Die geotechnischen Untersuchungen sind generell auf Basis der DIN 4020 [13] durchzuführen. Die Festlegung charakteristischer 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 Perlkiesverbläsung 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 4** sind 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.

Wenn der Ringspalt mit geeignetem Ringspaltverfüllmaterial (RSVM) verpresst wird, wird der Tübbingring hierdurch sofort unter dem angesetzten Verpressdruck gegen das Gebirge gebettet. Im 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.

**Tabelle 4** Erforderliche geotechnische Kenngrößen für die statischen Berechnungen

Stabzugberechnung		Scheibenberechnung (Mohr-Coulomb)		Scheibenberechnung (Hardening-Soil)	
Steifemodul	$E_s$	Elastizitätsmodul	$E$	Referenzsteifemodul	$E_{s,ref}$
Wichte	$\gamma/\gamma'$	Querdehnzahl	$n$	Referenztriaxialmodul	$E_{50,ref}$
Seitendruckbeiwert	$k_0$	Wichte	$\gamma/\gamma'$	Ent-/Wiederbelastungsmodul	$E_{ur}$
Wasserdruck	$p_w$	Reibungswinkel	$\varphi$	Referenzspannung	$\sigma_{ref}$
		Kohäsion	$c$	Steifigkeitsexponent	$m$
		Dilatanzwinkel	$\psi$	Querdehnzahl	$n$
		Zugfestigkeit	$f_t$	Wichte	$\gamma/\gamma'$
		Wasserdruck	$p_w$	Reibungswinkel	$\varphi$
		Seitendruckbeiwert	$k_0$	Kohäsion	$c$
				Dilatanzwinkel	$\psi$
				Zugfestigkeit	$f_t$
				Wasserdruck	$p_w$
				Seitendruckbeiwert	$k_0$
				Bruchfaktor	$R_f$

## 5.2 Einfluss der Ringspaltverfüllung auf die Berechnungen

In vielen Fällen ist der Einfluss der mechanischen Parameter der Ringspaltverfüllung bei der Tragwerksplanung vernachlässigbar. Eine Ausnahme hiervon stellt u. a. ein RSVM mit wesentlich niedrigerer Steifigkeit als das Gebirge (Unterschied mindestens eine Zehnerpotenz) dar. Wird der Einfluss der Ringspaltverfüllung in der Modellierung betrachtet, muss das Modell die Eigenschaften möglichst realitätsnah abbilden, d. h. die Funktionsweise des verwendeten RSVM und ggf. dessen zeitlicher Abbindeverlauf müssen bekannt sein.

Bei einem vollständigen Modellieren des RSVM, ist darauf zu achten, dass dies zu realistischen Ergebnissen auf der sicheren Seite führt und keine unbeabsichtigten oder unplanmäßigen Tragwirkungen im Ringspalt entstehen: Beispielsweise kann sich bei hohen Steifigkeiten und Festigkeiten des RSVM eine anteilige Normalkraftabtragung mit einhergehender Entlastung des Tübbingausbaus ergeben.

Für die Tangentialbettung ist die Scherfestigkeitsentwicklung des RSVM zu berücksichtigen. Verfügt ein frisches RSVM über keine ausreichende Scherfestigkeit, wird in statischen Berechnungen für die vortriebsnahen Bereiche meist zwischen 1 % bis 5 % der Radialbettung für die Sicherstellung der numerischen Stabilität angesetzt. Bei einem RSVM mit rascher Zunahme der Scherfestigkeit sowie für spätere Lastfälle, z. B. zukünftige Baumaßnahmen oder einseitige Lasten, ist unter Umständen die tangential Bettung zu berücksichtigen. Die tangential Bettung sollte in jedem Fall auf die maximal übertragbare Reibung begrenzt werden.

Wird der Tübbingring mit Perlkies hinterfüllt, sind bezüglich der rechnerischen Modellierung besondere Überlegungen unter Berücksichtigung der projektspezifischen Randbedingungen anzustellen, z. B. bettungsfreie Bereiche – insbesondere in der Firste – und mögliche Lastbilder.

Hinsichtlich der Funktionsweisen der RSVM wird auf Gehwolf et al. [37] und auf die RiL 853.4006 [1] verwiesen.

## 5.3 Einwirkungen und Einwirkungskombinationen

### 5.3.1 Ständige Einwirkungen

Zu den ständigen Einwirkungen gehören:

- Eigengewichte des Tübbingausbaus und aller übrigen eingebrachten Bauteile,
- Einwirkungen aus dem Gebirge einschließlich Schwellen und Quellen,

- Wasserdruck,
- Einwirkungen aus Tunneleinbauten,
- Innendruck, in der Regel als Wasserinnendruck,
- Einwirkungen aus der Ringspaltverpressung, sofern ungünstig wirkend,
- dauernd wirkende Lasten auf der Geländeoberfläche und Einflüsse aus benachbarten Bauwerken im Untergrund,
- Einwirkungen aus möglichen Subrosions- und Sulfosionserscheinungen (zum Beispiel Karst, Erdfälle).

Die im TBM-Vortrieb auf den Ausbau wirkenden Pressenkräfte der Tunnelbohrmaschinen (TBM) stellen eine Besonderheit dar. Es handelt sich um zeitweilig auftretende Einwirkungen aus der Bauzeit, die lange genug eingepreßt bleiben, um als ständige Lasten angesehen zu werden. Üblicherweise wird unterschieden zwischen den „Pressenkräften aus dem Regelvortrieb“ und als Grenzfall den maximal für den Vortrieb möglichen „installierten Pressenkräften“. In den statischen Untersuchungen ist als Grenzbetrachtung davon auszugehen, dass sich die Pressenkräfte durch Kriechen, insbesondere in den Zwischenlagen, oder durch Schwinden im Verlauf der Zeit vollständig abbauen können.

Einwirkungen aus Schwinden können im Regelfall beim Tübbingring vernachlässigt werden, da die Tübbinge vor ihrem Einbau nahezu ausgehärtet sind.

Da sich durch Kriechvorgänge in den Tübbing die Biegung in der Regel reduziert, braucht Kriechen aufgrund der damit verbundenen geringeren Gesamtbelastung üblicherweise nicht betrachtet zu werden.

Bei der Dimensionierung des Tübbingrings sollte auch eine potenzielle spätere Bebauung berücksichtigt werden. Besonders Abgrabungen über und seitlich neben der Tunnelröhre sowie Lasten aus zukünftiger Bebauung können zu maßgeblichen Lastzuständen führen. Diese Problematik wird verstärkt, je höher der Tunnel liegt (seicht liegender Tunnel). Entsprechende Vorgaben sollten daher projektspezifisch vorgenommen und bereits im Zuge der Ausschreibung behandelt werden. Dabei können unterschiedliche Konzepte verfolgt werden:

- A: Die Lasten und spätere mögliche Abgrabungen sind schon bekannt und werden in der Ausschreibung explizit vorgegeben.
- B: Die Auslegung des Tunnels erfolgt ohne Berücksichtigung von Einflüssen aus zukünftiger Bebauung. Eine spätere Bebauung ist demnach so auszulegen, dass sie zu keinen unerlaubten Lastzuständen für die Tunnelauskleidung führt.

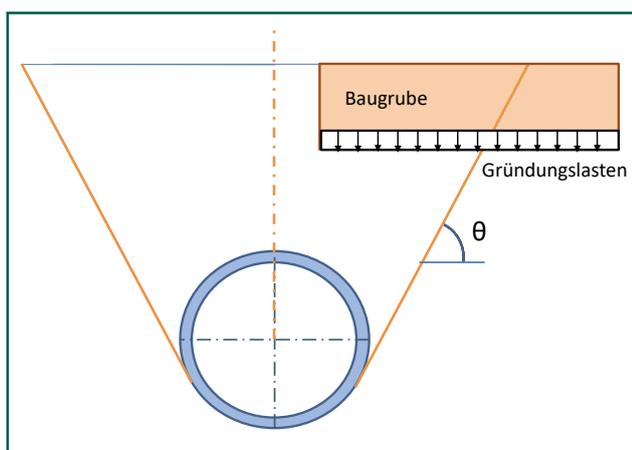
C: Es wird eine „Schutzzone“ bzw. ein Einflussbereich um den Tunnel definiert, innerhalb derer – ohne detaillierte rechnerische Untersuchungen – keine späteren Bebauungen, Lasteinleitungen oder Abgrabungen erfolgen dürfen. Dabei ist die Schutzzone so zu dimensionieren, dass außerhalb liegende Beeinflussungen nicht zu maßgebenden Lastzuständen für die Tunnelauskleidung führen können.

In **Abbildung 20** ist ein Einflussbereich dargestellt, innerhalb dessen Grenzen davon ausgegangen werden kann, dass Abgrabungen oder Belastungen eine möglicherweise maßgebende Einwirkung auf die Tunnelröhre ergeben. Der Winkel der Lastausbreitung  $\Theta$  wird dabei üblicherweise im Bereich von  $45^\circ$  bis  $45^\circ + \varphi/2$  angesetzt. In **Abbildung 21** ist beispielhaft eine Schutzzone definiert, innerhalb deren Grenzen zukünftig keine Lasteintragung und/oder Abgrabung erfolgen sollte.

Die entsprechenden Kenngrößen wie der Winkel der Lastausbreitung oder die Größe einer Schutzzone sind in jedem Fall frühzeitig mit dem Auftraggeber und gegebenenfalls weiteren Gutachtern abzustimmen und in der Ausschreibung zu beschreiben, da hierfür keine allgemein anerkannten Regelungen gelten.

### 5.3.2 Besonderheiten bei Einwirkungen aus Schwellen und Quellen

Das Schwellen von Anhydritgestein oder das Quellen von einigen Tonböden, beides hervorgerufen durch Wasserzutritte, kann für Tübbinge unter Umständen eine äußerst ungünstige Lasteinwirkung darstellen. Die Quell- und Schwelldrücke sind im Allgemeinen abhängig von der mineralogischen Zusammensetzung des Baugrunds und der Steifigkeit des Tübbingrings bzw. seiner Möglichkeit, sich durch Verschiebungen



**Abbildung 20** Einflussbereich eines seicht liegenden Tunnels für seitliche Abgrabungen und Gründungslasten

der Belastung zu entziehen und diese dadurch zu verringern. Weiter ist zu beachten, dass die in Quell- und Schwellversuchen ermittelten Drücke meist deutlich über den in-situ gemessenen Drücken liegen.

Die Überlagerung von Quell- bzw. Schwelldrücken mit den übrigen Einwirkungen ist im Lastenheft bzw. der Ausschreibung festzulegen und durch Lastbilder darzustellen. Dabei sind spätere Laständerungen, beispielsweise aus Bebauung oder Abgrabung, mit gegebenenfalls abweichenden Lastwirkungen zu berücksichtigen. Der Wasserdruck ist als eigenständige Last anzusetzen.

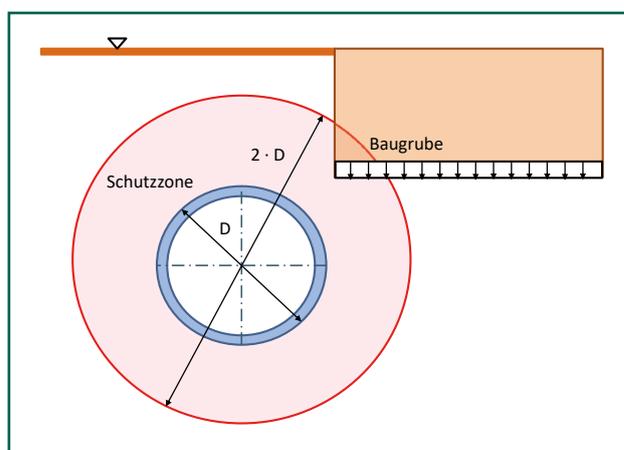
Für die Überlagerung von Drücken aus dem Baugrund/Gebirge und den Quell- bzw. Schwelldrücken wird die Überlagerung entsprechend **Abbildung 22** empfohlen.

### 5.3.3 Regelmäßig auftretende veränderliche Einwirkungen

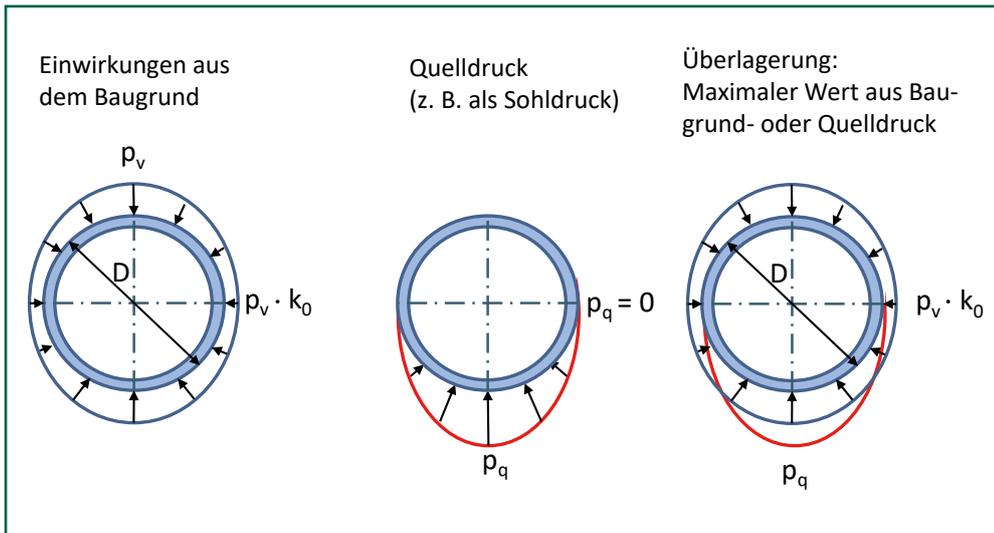
- Temperaturänderungen: Sie erzeugen Zwangsschnittgrößen und sind im Endzustand mit ihrer Spanne als Grenz betrachtungen anzusetzen.
- Verkehrslasten auf der Geländeoberfläche, in benachbarten Bauwerken im Untergrund sowie auf Verkehrswegen im Einflussbereich des Tunnels.
- Charakteristische Einwirkungen für Verkehr im Tunnel.
- Durch den Verkehr im Tunnel verursachte aerodynamische Einwirkungen: Sie können bei der Berechnung und dem Nachweis der Tübbinge im Regelfall vernachlässigt werden.

### 5.3.4 Seltene und vorübergehende Einwirkungen

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



**Abbildung 21** Beispiel einer Schutzzone um einen tiefliegenden Tunnel



**Abbildung 22**  
 Empfehlung zur Überlagerung von Quelledruck und Gebirgsdruck (der Wasserdruck ist zu überlagern)

grund ihrer meist geringen Größe und der Lastverteilung im Untergrund können sie meist vernachlässigt werden. In einem Baugrund mit geringer Steifigkeit und bei Tunneln mit geringer Überdeckung können sie aufgrund der vergleichsweise steifen und damit lastanziehenden Tunnelröhre gegebenenfalls maßgebende Belastungen hervorrufen.

Zu den vorübergehenden Einwirkungen während der Bauzeit sind zu rechnen:

- Zeitweilig wirkende Lasten aus Vortriebsmaschinen, Baugeräten, Rüstungen, Baustoffen und Bauwerksteilen. Hierzu gehören zum Beispiel die Lasten aus der Nachläuferbrücke, den Nachläufern und den Versorgungsfahrzeugen für die TBM.
- Sekundärinjektionen, wie z. B. Nachverpressungen oder Firstspaltverpressungen; die Höhe der Verpressdrücke und deren Reichweite sind projektspezifisch festzulegen.
- Einwirkungen aus Druckluft, soweit diese ungünstig wirken.

Vorübergehend wirkende Einwirkungen aus Veränderungen an der Geländeoberfläche (zum Beispiel Abgrabungen oder Aufschüttungen) und aus benachbarten Hohlräumen (zum Beispiel später durchgeführter Tunnelvortrieb) sind in der Regel als ständige Einwirkungen einzustufen. Lediglich im Fall von sehr kurzzeitig auftretenden Belastungszuständen (z. B. Stützdruck bei Schildvorbeifahrt) können sie den seltenen Einwirkungen zugerechnet werden.

### 5.3.5 Außergewöhnliche Einwirkungen

Zu den außergewöhnlichen Einwirkungen gehören:

- Temperatureinwirkungen im Brandfall,

- Erdbebeneinwirkungen: Diese können in Deutschland aufgrund ihrer meist geringen Auswirkungen auf die segmentierten Tübbingringe im Regelfall vernachlässigt werden,
- außergewöhnliche Einwirkungen aus Tunnelausbauten (zum Beispiel Bruch der Oberleitung bei Eisenbahntunneln),
- Flutung des Tunnels im Überschwemmungsfall über die Portale: Bei Tunnelprojekten in der Nähe von offenen Gewässern, wo bei außergewöhnlichen Hochwasserereignissen eine Flutung der Tunnelröhre möglich ist, muss ein Nachweis der Tübbingröhre auf Innenwasserdruck erfolgen,
- Anpralllasten von Fahrzeugen auf den Tunnelausbau. Sie sind projektspezifisch und unter Berücksichtigung eventueller vorhandener Schutzmaßnahmen wie Anprallwänden vorzugeben,
- Explosionen in Verkehrstunnelröhren: Eine Berücksichtigung dieser Einwirkungen wird im Regelfall nicht gefordert. Lastfälle aus Explosionen sind nur in besonderen Fällen durch den Bauherrn oder durch die Genehmigungsbehörde festzulegen.

## 5.4 Nachweiskonzepte im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

### 5.4.1 Allgemeines zu den statischen Nachweiskonzepten

In den nachfolgenden Abschnitten wird das Nachweis- und Bemessungskonzept für Tunnel mit Tübbingauskleidung beschrieben, wie es üblicherweise in Deutschland zur Anwendung kommt. Für Länder außerhalb Deutschlands sollten die Regelungen sinn-

gemäß und gegebenenfalls unter Verwendung von nationalen Regelwerken angewendet werden.

Die nachfolgend aufgeführten Empfehlungen sind für jedes Projekt individuell zu betrachten. Es wird empfohlen, im Rahmen der Projektausschreibung die Vorgaben zu den anzuwendenden Regelungen sowie zu den Einwirkungen in einem „Lastenheft“ zusammenzustellen. Weiterhin ist zu empfehlen, vor Beginn der statischen Berechnungen die Grundlagen der Nachweisführung zwischen den Projektbeteiligten abzustimmen und in einem Grundlegendokument zusammenzufassen.

Die in diesem Kapitel zitierten europäischen Normen DIN EN 1990, DIN EN 1991, DIN EN 1992 und DIN EN 1997 gelten immer in Verbindung mit den zugehörigen nationalen Anhängen und den darin genannten Regelwerken (z. B. DIN 1054) ([3] bis [11]).

Die im Folgenden aufgeführten Konzepte betreffen die statischen Nachweise am System des fertigen Tübbingrings. Nach DIN EN 1990 sind die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit für die ständige, vorübergehende und außergewöhnliche maßgebende Bemessungssituation BS-P, BS-T und BS-A nachzuweisen. Die Nachweise sind in Verbindung mit DIN EN 1997-1 und DIN 1054 zu führen.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) sind dies im Allgemeinen die Nachweise STR (structural failure – Inneres Versagen oder große Verformung des Tragwerks) und GEO-2 (geotechnical failure – Versagen oder große Verformungen des Baugrunds). Entsprechend den Vorgaben des Nationalen Anhangs erfolgt der Nachweis STR nach dem Verfahren 2 unter Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend DIN EN 1997-1/NA und DIN 1054, Tabelle A.2.1. Insbesondere für seicht liegende Tunnel ist auch der Nachweis UPL für die Auftriebssicherheit zu erbringen. Da Schwingungsbelastungen in Tunneln gegenüber den äußeren Einwirkungen meist gering sind, ist der Nachweis FAT auf Ermüdungsversagen der Tübbinge in der Regel nicht erforderlich. Bezüglich der Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) wird auf **Kap. 5.4.3** verwiesen.

Die statischen Berechnungen sind üblicherweise nichtlinear, was durch das Baugrund- bzw. Bettungsverhalten sowie die Kopplungen in den Ring- und Längsfugen bedingt ist. Bei Ansatz auch nichtlinearen Materialverhaltens für die Tübbinge wird der Grad der Nichtlinearitäten unter Umständen verstärkt. Die Berechnungsergebnisse sind unabhängig vom Umfang ihrer Nichtlinearität mit dem grundsätzlichen Problem behaftet, dass die Schnittgrößen nicht für die Lastanteile ständiger, vorübergehender oder außergewöhnlicher Einwirkungen einzeln berechnet und dann superponiert werden können, was bei der Bestimmung von Bemessungsschnittgrößen die Berücksichtigung der unterschiedlichen Teilsicherheits- und Kombina-

tionsfaktoren erschwert. Verschiedene mögliche Vorgehensweisen werden in **Kap. 5.4.2** beschrieben.

Für die Widerstände von Stahlbetontübbingungen gelten dabei die in der DIN EN 1992-1-1 bzw. DIN EN 1992-2 angegebenen Materialkenngrößen und Teilsicherheitsbeiwerte. Die Bemessung erfolgt im Regelfall nach DIN EN 1992-1-1 und für Eisenbahntunnel aufgrund der Vorgaben der RiL 853 nach DIN EN 1992-2.

➤ **Hinweis:** Die Stahlbetonnorm DIN EN 1992-1-1 bezieht sich auf Hochbauten und DIN EN 1992-2 auf Betonbrücken. Eine Stahlbetonnorm speziell für Tunnelbauwerke liegt nicht vor. International ist es üblich, Tunnelschalen nach EN 1992-2 bzw. nach Regelwerken für Betonbrücken auszulegen, u. a. aufgrund der zugrundeliegenden erhöhten Anforderungen an die rechnerische Lebensdauer (Dauerhaftigkeit). Für die Bemessung von Tübbingungen sind die Unterschiede in der praktischen Anwendung von DIN EN 1992-1-1 gegenüber DIN EN 1992-2 allerdings gering.

Nachweise im Grenzzustand GEO-3 (Böschungs- bzw. Geländebruch) sind abgesehen von Sonderfällen, zum Beispiel in rutschgefährdeten Hängen, für Tunnel nicht relevant.

Über die Nachweise am Gesamtragsystem hinaus sind als weitere Detailnachweise zu führen:

- Tangentialer Spaltzug, infolge Pressenbelastung,
- Teilflächenpressung und Spaltzug in Ring- und Längsfugen,
- Dichtigkeit der Segmentfugen, d. h. Nachweis der Rahmendichtungen.

#### 5.4.2 Tragfähigkeitsnachweise (Nachweise im GZT)

##### Nachweisführung in den Grenzzuständen STR und GEO-2

Die Nachweisführung erfolgt nach DIN 1054 in Ergänzung zu den Vorgaben der DIN EN 1997-1 mit den Teilsicherheitsbeiwerten dieser Normen. Tübbingtunnel im Lockergestein oder geklüftetem Fels werden üblicherweise der Geotechnischen Kategorie GK 3 und Tübbingtunnel in festem, wenig geklüfteten Fels der Geotechnischen Kategorie GK 2 zugeordnet.

Für die Nachweise nach DIN 1054 bzw. DIN EN 1997-1 besteht die Grundproblematik, dass es sich um nichtlineare Berechnungen handelt, für die das Superpositionsprinzip für die Schnittgrößen im Tunnel nicht anwendbar ist. Zur Bestimmung der Schnittgrößen nach den Nachweisverfahren STR bzw. GEO-2 bestehen im Grundsatz folgende Möglichkeiten:

- 1) Für linear elastische Berechnungen kann das Verfahren nach DIN EN 1997-1 / DIN 1054, Abs. 2.4.7.3.4.2 (1) mit Bestimmen der Schnittgrößen nach Gleichung A (2.6c) angewendet werden. Dies bedingt den Ansatz der Lastfaktoren auf die Einwirkungen, d. h. auf die einzelnen Lasten.

Aufgrund seiner Voraussetzungen ist dieses Verfahren nur für Berechnungen geeignet, bei denen die Einwirkungen als äußere Lasten bekannt oder vorgegeben sind. Im Tunnelbau ist das Verfahren damit grundsätzlich nur auf Systeme gebetteter Stabzüge oder Schalen beschränkt. Bezüglich detaillierter Angaben wird auf die Angaben in RiL 853.2001 [1], Abs. (19) verwiesen.

- 2) International wird auch eine modifizierte Methode zu 1) nach DIN EN 1990, Abs. 6.3.2(2) bei nicht-linearem Systemverhalten verwendet, bei der alle Belastungen mit den zugehörigen Lastsicherheitsbeiwerten nach DIN EN 1990 und ggf. Teilsicherheitsfaktoren auf die Baugrundkenngrößen angesetzt werden. Bei der anschließenden Bemessung werden dann die so ermittelten Schnittgrößen nicht weiter faktorisiert.

Da Bemessungsergebnisse auf der unsicheren Seite nicht ausgeschlossen werden können, sollte diese Vorgehensweise für statische Untersuchungen am Gesamttragssystem nicht angewendet werden.

- 3) Für Tübbingtunnel kann das Verfahren nach DIN 1054, Abs. 2.4.7.3.4.3 A(4) angewendet werden. Dieses bedingt die Berechnung mit nicht faktorisierten Lasten, d. h. unter charakteristischer bzw. repräsentativer Last. Die Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerte werden erst nach der Berechnung auf die Schnittgrößen angesetzt.

Um eine Trennung der Schnittgrößen infolge von ständigen und veränderlichen Einwirkungen vornehmen zu können, müssen die Schnittgrößen der veränderlichen Einwirkungen aus einer Differenzbildung bestimmt werden. Bezüglich detaillierter Angaben wird auf die Angaben in RiL 853.2001 [1], Abs. (17) verwiesen. Diese Vorgehensweise auf Basis von Differenzbildungen ist aufwändig und unübersichtlich, insbesondere, wenn wegen verschiedener Einwirkungen umfangreiche Differenzbildungen vorgenommen werden müssen und/oder wenn mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Bemessung die Kombinationsbeiwerte angesetzt werden sollen. Das Vorgehen nach DIN 1054, Abschnitt 2.4.7.3.4.3 A(4) ist somit in der Regel nur eingeschränkt praktikabel.

- 4) Die Bemessungsschnittgrößen für die Tübbinge können im Verfahren nach DIN 1054, Abs. 2.4.7.3.4.3 A(5) bestimmt werden. Für den Nachweis von Tübbingtunneln, bei denen veränderliche

Einwirkungen im Gesamtsystem in der Regel untergeordnet sind, ist allgemein die Anwendung dieser Vorgehensweise unabhängig von der Größe, Verteilung und Art der veränderlichen oder außergewöhnlichen Einwirkungen geeignet.

Bei diesem Verfahren wird die Berechnung der Schnittgrößen so durchgeführt, dass die ständigen Lasten mit ihrer charakteristischen Größe angesetzt werden und die veränderlichen Belastungen teilfaktorisiert mit dem Faktor  $f_q = \gamma_Q / \gamma_G$  in die Berechnung eingehen. Zur Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen werden die berechneten Schnittgrößen dann einheitlich mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G$  multipliziert.

Dieses Vorgehen entspricht in wesentlichen Zügen demjenigen nach DIN EN 1990, Kap. 6.3.2(4b). Da das Verfahren auch bei nichtlinearem Systemverhalten zu plausiblen Schnittgrößen führt und gut umsetzbar ist, vgl. auch [51] und [58], wird es für die Bemessung von Tübbingungen nach DIN 1054 zur Anwendung empfohlen.

Der Nachweis des Tragvermögens des Baugrunds ist für Tübbingtunnel in ausreichender Tiefenlage (Überlagerung  $\geq 2 \varnothing$ ) meist nicht erforderlich. In Sonderfällen, wie z. B. bei seicht liegenden Tunneln, bei Abgrabungen in Tunnelnähe oder bei Tunneln in Hanglage (insbesondere bei rutschgefährdeten Hängen), kann der Nachweis der ausreichenden Baugrundtragfähigkeit erforderlich werden. Der Nachweis wird dann nach dem Verfahren GEO-3 geführt, wobei die Bemessungswiderstände nach DIN EN 1997-1, Abschnitt 2.4.7.3.3 nach Gleichung (2.7a) Eingang finden, d. h. reduzierte Baugrundtragfähigkeiten angesetzt werden.

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass eine Berücksichtigung der Temperaturänderungen beim Nachweis in den Grenzzuständen STR und GEO-2 aufgrund des nach DIN 1054 anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_Q = 1,5$  im BS-P zu nicht plausiblen, ungünstigen Ergebnissen führen würde. Für die Beiwerte der Temperaturänderungen werden daher in Anlehnung an RiL 853.2001, Abs. 19, besondere Festlegungen empfohlen:

- $\gamma_Q = 1,5$ , wenn die Schnittgrößen mit den Steifigkeiten (EI) der Tunnelschale im Zustand II ermittelt werden, näherungsweise darf dabei  $E_{II} = 0,6 E_I$  angenommen werden,
- $\gamma_Q = 1,0$ , wenn die Schnittgrößen mit den Steifigkeiten (EI) der Tunnelschale im Zustand I ermittelt werden.

### Nachweise in den Grenzzuständen UPL / Nachweise der Auftriebssicherheit

Der Nachweis der Auftriebssicherheit (Grenzzustand UPL) ist meist nur bei seicht liegenden Tunneln und im Fall von Abgrabungen in Tunnelnähe erforderlich. Er ist nach DIN EN 1997-1 in Ergänzung durch DIN 1054 für die Bemessungssituation BS-P, BS-T und BS-A zu führen. Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, den Nachweis mit analytischen oder mit numerischen Methoden zu erbringen.

Bei der analytischen Vorgehensweise wird üblicherweise vereinfacht der Auftrieb auf den Tunnelquerschnitt als ungünstige ständige Einwirkung angesetzt. Das Eigengewicht des Tunneln sowie der Baugrund oberhalb des Tunneln, der sich innerhalb der vertikalen Grenzlinien ab Außenkante Tunnel befindet, gilt als günstige ständige Einwirkung. Sollen weitere Widerstände aus dem Baugrund aus einer Lastausbreitung angesetzt werden, sind geeignete Ansätze zu wählen und geotechnisch zu begründen.

Beim Nachweis mit numerischen Methoden am Kontinuum müssen die Teilsicherheitsbeiwerte vollständig Eingang in die Berechnung finden. Äußere Lasten sowie Eigengewichte von Bauteilen sind in der Regel entsprechend durch Erhöhen oder Verringern anzupassen. Die Bodenkennwerte sind entsprechend ihrer verringerten Größe anzusetzen, ebenso wie haltende Wirkungen aus Pfählen und Verankerungen. Dieses Vorgehen entspricht im Prinzip dem Nachweisverfahren nach DIN 1054 bzw. Gleichung (2.6a) der DIN EN 1997-1. Der Nachweis wird durch Konvergenz der Berechnung bei verträglichen Verschiebungen des Tunneln erbracht. Hinsichtlich der Bewertung der berechneten Verschiebungen ist zu beachten, dass es sich hierbei um einen Bemessungsnachweis handelt, für den höhere Verschiebungen als beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit zulässig sind.

Für den Nachweis der Auftriebssicherheit sollte für den Endzustand bei nicht vollständig im Grundwasser liegenden Tunnelröhren der höchste während der Nutzungszeit des Tunneln zu erwartende Wasserdruck (Bemessungswasserstand), und für den Bauzustand der höchste während der Bauzeit zu erwartende Wasserdruck (Bauwasserstand) angesetzt werden. Für einen späteren Austausch der Fahrbahn von Verkehrstunneln dürfen für den Nachweis „ohne Fahrbahn“ die Teilsicherheitsbeiwerte der Bemessungssituation BS-A verwendet werden, sofern nicht projektbezogene abweichende Vorgaben bestehen.

#### 5.4.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweise (GZG)

Im Rahmen der Tragwerksplanung beinhalten die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit die Rissbreitenbemessung und eine Begrenzung der Verschiebungen der Tübbingschale. Gegebenenfalls sind auch die Verdrehungen auf den Längsfugen nachzuweisen bzw.

dahingehend zu begrenzen, dass die Dichtigkeit der Rahmendichtungen gewährleistet bleibt.

Der Nachweis der Rissbreitenbeschränkung erfolgt allgemein nach DIN EN 1992-1-1, für Eisenbahntunnel gemäß ZTV-ING nach DIN EN 1992-2. Die zugehörige Schnittgrößenermittlung erfolgt analog zu den in den **Kap. 5.3.2 bis 5.3.5** aufgeführten Vorgehensweisen. Gemäß RiL 853 sind für Eisenbahntunnel die Schnittgrößen mit linearem Materialverhalten für die Tübbinge zu bestimmen. Die Schnittgrößenermittlung soll für die häufige Einwirkungskombination durchgeführt werden. Für Verkehrsbauwerke des BMDV (Straßentunnel) gelten die Vorgaben der ZTV-ING.

Die Verformungen der Tübbingschalen sind für die häufige Einwirkungskombination nach DIN EN 1990 zu bestimmen. Zulässige Verformungen sind projektspezifisch festzulegen. In jedem Fall dürfen die rechnerischen Verformungen die Funktionsfähigkeit des Tunneln nicht beeinträchtigen.

### 5.5 Ermittlung der Schnittgrößen – Berechnungsverfahren

Das Tragverhalten einer Tunnelauskleidung wird maßgeblich durch die stützende Wirkung des umgebenden Gebirges und die Boden-Bauwerks-Interaktion bestimmt. Hierdurch weisen Tragwerksplanungen im Tunnelbau eine Reihe von Besonderheiten auf:

- Das umgebende Gebirge wirkt gleichzeitig als Belastung und als Stützung (Widerstand). Eine Trennung dieser beiden Wirkungen ist in der Regel nicht möglich, bzw. nur bei stark vereinfachter Modellierung des tatsächlichen Tragverhaltens.
- Bei Tübbingringen handelt es sich um Gelenkketten, die ihre Stabilität im Wesentlichen durch die Interaktion mit dem umgebenden Gebirge (einschließlich der Ringspaltverfüllung), sowie ggf. durch eine Kopplung der einzelnen Ringe erhalten.
- Die statischen Systeme von Tunneln sind hochgradig statisch unbestimmt.
- Tunneln werden in der Regel durch eine Kombination aus Normalkraft und Biegemomenten beansprucht. Häufig ist nicht von vorneherein klar, ob die maximalen oder minimalen Einwirkungen bzw. Baugrundkennwerte zu den bemessungsrelevanten Zuständen führen. In Tunnelberechnungen sind deshalb häufig Grenzfallbetrachtungen oder Sensitivitätsstudien erforderlich.
- Die Gebirgskennwerte und Rechenparameter weisen in der Regel große Streuungen auf.

- Bauverfahren und Bauzustände sind von erheblichem Einfluss auf die Belastungen der Tübbingringe und müssen in der Regel in den rechnerischen Nachweisen berücksichtigt werden.

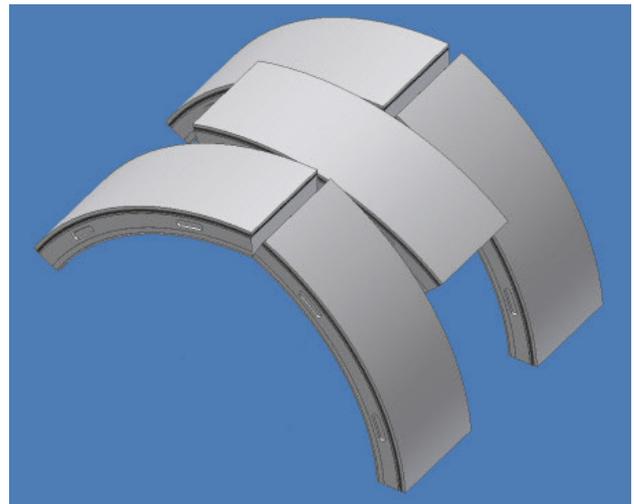
Das Berechnungsverfahren und Sicherheitskonzept muss auf die genannten Randbedingungen abgestimmt werden.

### 5.5.1 Übersicht zu den Berechnungsmodellen

Die Ermittlung der Schnittgrößen für den Tübbingring erfolgt mit Hilfe von numerischen Modellen in 2D und 3D. Gängig sind 2D-Modelle mit den Ansätzen des ebenen Dehnungszustands. Liegen komplexere Randbedingungen oder Interaktionen der einzelnen Ringe vor, werden 3D-Modelle herangezogen.

Die Interaktion der einzelnen Segmente bzw. Ringe ist zu berücksichtigen. Dabei ist für die Wahl des Modells zu unterscheiden, ob die Ringe als Einzelring betrachtet werden können oder eine Kopplung zwischen den Ringen zu berücksichtigen ist. Bei Ansatz der Kopplung in den Ringfugen gleichen sich die Verformungsbilder der einzelnen Ringe einander an (**Abbildung 23**), wobei die Überbrückung der Betongelenke durch die Nachbartübbinge zu einer Erhöhung der Systemsteifigkeit führt. Insofern die Ringkopplung nicht über die gesamte Lebensdauer gewährleistet ist, ist im Endzustand als Grenzbetrachtung auch von der Tragwirkung als Einzelring auszugehen.

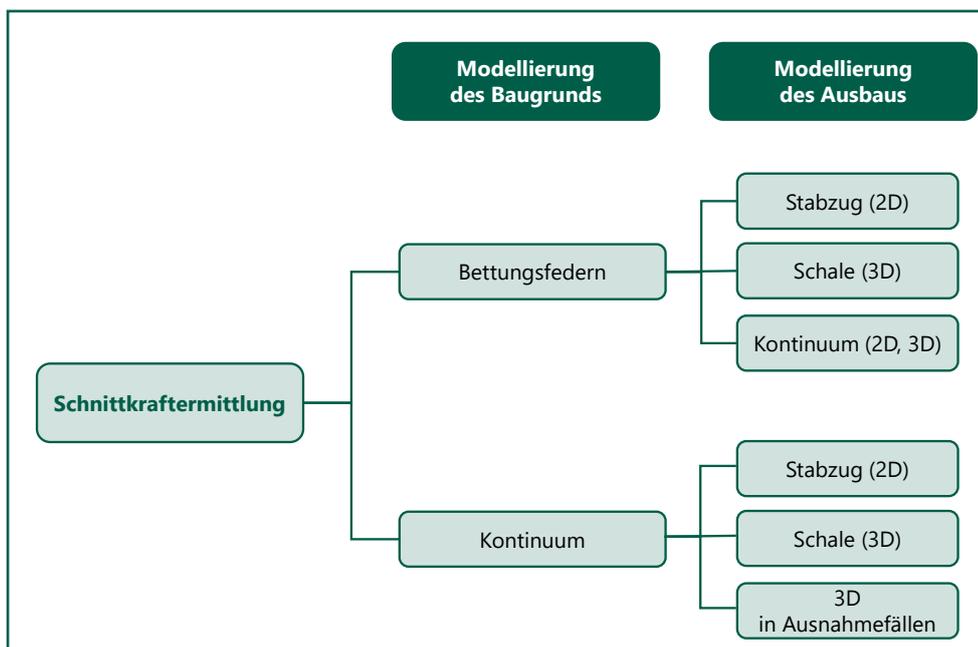
Grundsätzlich ergeben sich bei den zum Einsatz kommenden Berechnungsmodellen Unterschiede hinsichtlich der Diskretisierung des Baugrunds und des Ausbaus (**Abbildung 24**).



**Abbildung 23** Unterschiedliche Verformung einzelner Tübbinge (stark überhöht)

Ein wesentliches Merkmal bildet die Modellierung des Baugrunds, die entweder in Form von Bettungs- oder in Form von Kontinuumsmodellen erfolgen kann. Bettungsmodelle bilden den Baugrund mittels Bettungsfedern ab. Bei komplexeren Bettungsverhältnissen haben sich Kontinuumsmodelle mit expliziter Modellierung des Baugrunds etabliert.

Die Diskretisierung des Ausbaus erfolgt entweder in 2D mit Stabzügen, in 3D mit Schalenelementen bis hin zu Sonderfällen mit Kontinuumselementen in 2D und 3D. Die Interaktion der Segmente in den Längs- und Ringfugen wird mittels Koppellementen simuliert.



**Abbildung 24** Modellierungsmöglichkeiten Baugrund und Tübbingausbau

Die verschiedenen Möglichkeiten der Modellierung des Tübbingausbaus können mit denen für die Simulation des Baugrunds kombiniert werden. Die dadurch entstehenden Modelle sind für die statische Berechnung, abhängig von den Randbedingungen und Zielsetzungen, unterschiedlich geeignet. Die Ergebnisse erlauben Auswertungen, die von abschätzenden Erkenntnissen bis hin zu einer weitgehenden Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens im Ausbau und Baugrund reichen. Eine Übersicht über die Kombinationen und die Einsatzbereiche kann **Tabelle 5** entnommen werden.

### Modelle der Boden-Bauwerks-Interaktion mittels gebetteter Stabzüge

Bei Bettungsmodellen erfolgt die Modellierung des Baugrunds und somit der Bettung des Tübbingrings mittels linear-elastischer Bettungsfedern mit radialem Zugausfall. Die radiale Bettungssteifigkeit  $K_r$  wird über den Steifemodul des anstehenden Baugrunds  $E_s$  sowie den Systemradius  $R_{sys}$  ermittelt, vgl. hierzu auch Erläuterungen in Behnen et al. [36]:

$$K_r = E_s / R_{sys}$$

Für spätere Lastfälle, z. B. zukünftige Baumaßnahmen oder einseitige Lasten, ist in der Regel die tangential Bettung zu berücksichtigen, die aber auf die maximal übertragbare Reibung begrenzt werden sollte. Zum Ansatz der tangentialen Bettung vgl. auch Anmerkungen in **Kap. 5.2**.

Aufgrund der eingeschränkten Boden-Bauwerks-Interaktion können Bettungsmodelle eventuelle Vorverformungen des Baugrundes nicht unmittelbar berücksichtigen.

Die Aufbringung der Belastung erfolgt mit geeigneten und verträglichen Lastmodellen, z. B. nach EBT/Duddeck [31] oder Behnen et al. [36]. Der Lastansatz tangentialer Lasten ist auf die Größe der Tangentialbettung abzustimmen.

### Tunnelauskleidung als Stabzugmodelle

Für 2D-Berechnungen mit Bettungsmodellen haben sich für die Diskretisierung des Ausbaus Stabzüge etabliert. Hierbei werden den aus Balkenelementen bestehenden Stäben die Querschnittseigenschaften des Tübbingausbaus zugewiesen.

Die Kopplung benachbarter Ringe kann durch die geeignete Wahl der Stabzugabmessungen auch in 2D-Modellen mit geeigneten Koppellementen durchgeführt werden.

### Tunnelauskleidung als Schalenmodelle

Schalenelemente mit Bettung werden häufig zur Diskretisierung der Tübbingsegmente in Pseudo-3D- und in 3D-Modellen genutzt. Die Last- und Bettungs-

annahmen entsprechen hier denen der (gebetteten) Stabzugmodelle. Wesentlicher Vorteil der Schalenelemente gegenüber Balkenelementen ist die Abbildung des Kraftflusses auch in Tunnellängsrichtung. Dies ist insbesondere bei komplexeren Interaktionen zwischen einzelnen Tübbing sinnvoll, wie sie sich beispielsweise bei einer ausgeprägten Kopplungswirkung in den Fugen oder im Bereich von Querschlagöffnungen ergeben.

### Tunnelauskleidung mittels Kontinuumsmodellen

Im Ausnahmefall können auch Kontinuumsmodelle mit Bettung zur Modellierung der Tunnelsegmente genutzt werden. Vorteile und Anwendung ergeben sich analog zu den Schalenmodellen mit Bettung.

### 5.5.2 Kontinuumsmodelle für den Baugrund

Kontinuumsmodelle für den Baugrund haben sich in den letzten Jahren bewährt. Der Ausbau wird analog zu den Bettungsmodellen entweder mittels Stabzug, Schalen- oder Kontinuumsmodellen abgebildet.

Durch die diskrete Modellierung des Baugrundes ergeben sich dessen Einwirkungen auf den Ausbau „automatisch“ als ein Ergebnis der Berechnung und es ist nicht mehr erforderlich, sie als äußere Lasten wie bei den Bettungsmodellen anzusetzen. Voraussetzung für eine realitätsnahe Erfassung der resultierenden Effekte ist, dass alle einzelnen Bestandteile, wie z. B. Tunnelschale, Interaktionen zwischen Baugrund, RSVM und Tübbingausbau, sowie deren Steifigkeiten und ihr Zusammenwirken realistisch abgebildet werden. Kontinuumsmodelle für den Baugrund können unter anderem bei den folgenden Situationen vorteilhaft sein:

- Berücksichtigung von inhomogenen Spannungszuständen im Untergrund,
- konsolidiertem und überkonsolidiertem Untergrund,
- der Berücksichtigung von Entlastungszuständen,
- Inhomogenitäten im Untergrund, inklusive Bauwerke und Bauteile,
- Querschlägen, insbesondere bei Vorliegen von Bauhilfsmaßnahmen wie Vereisung oder Injektionen,
- Bestimmen von Setzungen und stabilisierenden, setzungsmindernden Maßnahmen,
- ausgeprägt plastische Baugrundverhältnisse,
- tiefliegende Tunnel,
- Tunnel in ausgeprägt geschichtetem Baugrund im Felsgestein.

**Table 5** Vereinfachte Übersicht von Rechenmodellen und Einsatzbereichen zur Berechnung von Tübbingausbauten. Weitere Rechenmodelle, Kombinationen von Modellen und Auswertungen sind möglich und hier nicht aufgeführt.

Modell	Modellierung von		Anwendungsfall								Bemerkung
	Tübbingauskleidung	Baugrund	realitätsnahe Erfassung von			Ermittlung von					
			Baugrundeigenschaften	Belastungen auf Tübbingring	Bauablauf	Schnittgrößen	LF-Verdrehungen	Verformungen am Ring	Baugrundssetzungen	Einwirkungen aus Baugrund	
2D	Stabzug (biegesteif)	Bettungs-federn	○	○	-	○	-	-	-	-	"Muir-Wood" klassisch
	Stabzug, gekoppelt (Gelenke in LF)		○	○	-	+	+	-	-	-	Einfacher oder doppelter Stabzug
	Stabzug (biegesteif)	Kontinuum 2D	+	+○	-	○	-	○	○	○	"Muir-Wood" im Kontinuum
	Stabzug, gekoppelt (Gelenke in LF)		+	+	-	+	+	+	+	+	Einfacher oder doppelter Stabzug
	Kontinuums-elemente (2D)		+	+	-	+	+	+	+	+	
Pseudo-3D	Schalen oder Volumenelemente, gekoppelt	Bettungs-federn / -modul	○	○	-	+	+	○	-	-	Für 3D-Effekte in den Tübbing- ringen
	Schalen oder Volumenelemente, gekoppelt	Kontinuum 3D	+	+	-	+	+	+	+	+	
3D	ungekoppelte Schalen (biegesteif)	Bettungs-federn / -modul	○	○	○	○	-	-	-	-	i. d. R. für Sonderbereiche u. a. mit Beanspruchungen in Tübellängs- richtung (z. B. Querschlä- ge)
	gekoppelte Schalen		○	○	○	+	+	○	-	-	
	Volumenelemente		○	○	○	○	+	-	-	-	
	ungekoppelte Schalen (biegesteif)	Kontinuum 3D	+	+	+	○	-	○	○	○	Relativ hoher Rechenauf- wand; daher eher für Spezialfälle
	gekoppelte Schalen		+	+	+	+	+	+	+	+	
	Volumenelemente		+	+	+	○	+	+	+	+	

- + geeignet/empfohlen
- weniger geeignet/empfohlen
- nicht geeignet/empfohlen

Häufig begrenzen sich diese Modelle aufgrund der Rechenzeit auf 2D-Berechnungen im ebenen Dehnungszustand. 3D-Modelle werden beispielsweise genutzt, um Bauabläufe und die daraus resultierenden räumlichen Spannungumlagerungen realitätsnah zu erfassen.

### 5.5.3 Kopplungen

Die einzelnen Segmente und Ringe interagieren in den Fugen, was i. d. R. bei der Schnittgrößenermittlung durch Simulieren der Kopplungsbedingungen zu berücksichtigen ist. Kopplungen liegen aufgrund von geometrisch-mechanischen Randbedingungen sowie von gegebenenfalls vorhandenen Einbauteilen vor. Hinsichtlich der zu berücksichtigenden Kopplungen ist zwischen den Längs- und Ringfugen zu unterscheiden, vgl. auch **Kap. 5.7.11**.

#### Längsfugen

In den Längsfugen können wegen der dort vorliegenden Betongelenke Biegemomente nur begrenzt übertragen werden. Zur Simulation der verringerten, nichtlinearen Drehfedersteifigkeit werden meist Kontaktflächenelemente oder Drehfedern angesetzt. Mit den Ansätzen nach [14] bzw. [34] können dafür Drehfedersteifigkeiten abgeleitet werden, die sich in der Praxis bewährt haben (**Abbildung 25**). Nach diesen Ansätzen ist die Drehfedersteifigkeit abhängig von der Größe der Normalkraft und der geometrischen Ausbildung in der Fuge sowie der Steifigkeit des Tübbingbetons.

Je nach softwaretechnischen Möglichkeiten kann das Vereinfachen der Kennlinien zu einem bilinearen Verlauf erforderlich sein. Hierbei ist darauf zu achten, dass der konstante Ast der Beziehung im Bereich einer

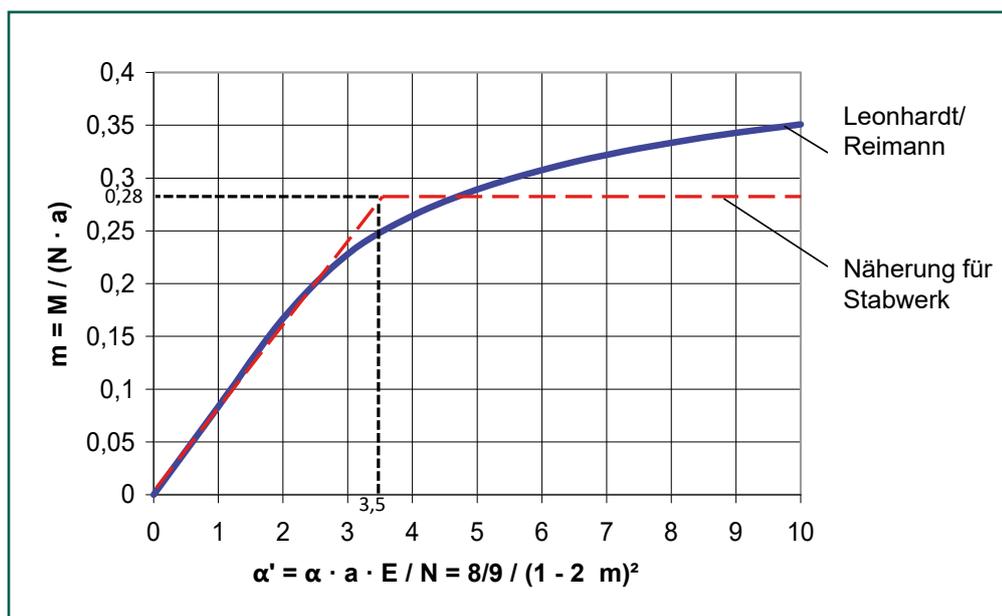
in den Berechnungen zutreffenden Verdrehung angesetzt wird.

Unter Umständen ist bei der Modellierung auch die maximale Übertragbarkeit von Schubkräften in den Längsfugen zu beachten, z. B. durch Verwenden von Normalkraft-Schub-Federn unter Berücksichtigung der Reibung. Ansonsten können zu hohe Querkkräfte in den Längsfugen berechnet werden, die durch die anstehenden Normalkräfte nicht übertragbar sind. Dies ist insbesondere bei ausgeprägt dreidimensionaler Lastabtragung, wie beispielweise an Querschlägen, oder bei geringen Ringnormalkräften zu beachten.

#### Ringfugen

Eine Kopplung der einzelnen Ringe in den Ringfugen kann einerseits durch Reibung in den Kontaktflächen und andererseits durch eingebaute Elemente, wie z. B. Schubdübel oder Zugdübel mit Schubkraftübertragung, vorliegen. Aufgrund dessen gleichen sich die Verformungsbilder der einzelnen Ringe an, da die Ringfugenkopplung eine Versteifung des Tragsystems bewirkt. Abhängig von der jeweiligen Kopplung können verschiedene Kraft-Verschiebungskurven und ggf. Schlupf angesetzt werden.

Für den Ansatz der Reibungskopplung in der Ringfuge ist wesentlich, ob und welche Kräfte in Tunnel-längsrichtung im jeweiligen Zustand vorhanden sind. Bei Vorliegen von Längskräften sind diese in der Regel durch das Verbleiben von Pressenkräften aus dem Vortrieb der TBM bedingt. Längskräfte können belastungsbedingten Veränderungen unterliegen, wie zum Beispiel bei Lastumlagerungen an Querschlägen, aus thermischen Zwängungen wie im Brandfall oder bei hohen Zusatzbelastungen. Bei der Reibungskopplung sind die Ausbildung der Ringfugen mit ihren Kontakt-



**Abbildung 25**  
*m- $\alpha'$  Beziehung nach [14] bzw. [34] sowie eine bilineare Annäherung*

flächen sowie ggf. vorhandene Zwischenlagen und deren Reibungsverhalten zu beachten. Diese bestimmen sowohl die Normal- als auch die Querkraftsteifigkeit sowie die Größe der übertragbaren Reibkraft. Durch zeit- und temperaturabhängige Effekte kann das Vorhandensein der Reibungskopplung für die gesamte Lebensdauer des Bauwerks weder gewährleistet noch ausgeschlossen werden. Daher ist die Betrachtung von vorhandener sowie von verloren gegangener Ringfugenreibung als Grenzfälle sinnvoll.

Für das Querkraftverhalten von Einbauteilen in der Ringfuge sind die in Versuchen ermittelten Kraft-Weg-Kennlinien zu Grunde zu legen. Bei der Planung werden in der Regel Toleranzen in den Segmenten für die Einbauteile vorgesehen. Diese Einbautoleranzen sind in den Versuchen unter Umständen nicht berücksichtigt und bewirken einen Schlupf oder eine geringere Anfangssteifigkeit, die gegebenenfalls beim Ansatz der rechnerischen Kraft-Weg-Kennlinie zu beachten ist.

Die Modellierung der Kopplung erfolgt in der Regel mit nichtlinearen Koppellementen, meist Federn. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Kopplungen sowohl in radialer als auch tangentialer Richtung wirken können.

## 5.6 Ermittlung der Schnittgrößen und Spannungen aus dem Bauprozess

### 5.6.1 Spaltzugbeanspruchung infolge von Pressenkräften

Während des Vortriebs stützt sich die TBM mit der Vortriebskraft über die Pressen auf die Ringfugen der bereits gebauten Tübbingringe ab. Dabei entstehen unter den Pressenschuhen Teilflächenpressungen, deren Höhe u. a. von der Geometrie der Ringfuge, der Pressenschuhe sowie der Art der Pressen abhängig ist. Die Teilflächenpressungen und die daraus resultierenden Spaltzugkräfte sind gemäß DIN EN 1992-1-1 [7] in Verbindung mit Kap. 5.7.7 nachzuweisen.

Bei den Nachweisen kann gemäß ZTV-ING, Abs. 3.2.3(2) [2] zwischen einer Betriebspressenkraft im Regelvortrieb und einer maximal installierten Pressenkraft unterschieden werden. Bezüglich weiterer Einzelheiten wird auf Kap. 5.3.1 und Kap. 5.7.7 verwiesen.

### 5.6.2 Scheibenbeanspruchung aufgrund von Versätzen oder Spaltmaßen in der Ringfuge

Unter „Scheibenbeanspruchungen“ werden Beanspruchungen in der gekrümmten Tübbingebeane verstanden; gebräuchlich sind auch die Bezeichnungen „Schalenbeanspruchung“ oder „Beanspruchung in Tübbingebeane“.

Die üblichen Pressenanordnungen führen gemäß [30] zu Scheibenbeanspruchungen und Randzugkräf-

ten an den Tübbingringfugen, die statisch nachzuweisen und durch Bewehrung abzudecken sind. Tafelwerte für die Randzugkräfte bei Tübbingungen können [38] entnommen werden. Im Allgemeinen wird die Berechnung der Spaltzugspannungen gemäß [58] und [59] numerisch mit Scheiben- bzw. Schalenmodellen eines gekrümmten Einzelsegments durchgeführt.

Im Rahmen des Ringbaus kann es wegen Montagegenauigkeiten zu Versätzen zwischen benachbarten Tübbingungen, einem unebenen Ringspiegel (Ringfugenebene) bzw. zu Spaltmaßen in der Ringfuge kommen, die aufgrund von Herstelltoleranzen unter Umständen noch verstärkt werden. Je nach Ausmaß der Unebenheit und der Art der Fugenausbildung, mit Fugeneinlagen oder ohne Einlagen, d. h. mit reinem Beton-Beton-Kontakt, sind die Kopplungen in der Ringfuge ggf. sehr steif und nicht in der Lage, die unplanmäßigen Abweichungen auszugleichen. Aufgrund der dann zusätzlich entstehenden Scheibenzugspannungen können Schäden an den Tübbingungen entstehen (Abbildung 26).

Für die Bemessung ist es schwer, realistische Werte für mögliche Spaltmaße  $\Delta x$  vorzugeben, da diese vor allem von der Qualität des Ringbaus, aber auch weiteren Randbedingungen abhängen. Zu ungünstige Annahmen können zu unwirtschaftlichen Bewehrungsquerschnitten führen, zu günstige Annahmen dagegen zu vermehrten Rissbildungen. In der Praxis hat es sich daher als sinnvoll erwiesen, in Abstimmung zwischen Bauherr, Planer und Ausführendem projektspezifisch Grenzwerte festzulegen.

### 5.6.3 Beanspruchungen aus Pressenexzentrizitäten, -schiefstellungen und Verrollung

In der Praxis kann es vorkommen, dass die Pressen nicht senkrecht auf die Stirnfläche der Ringe oder

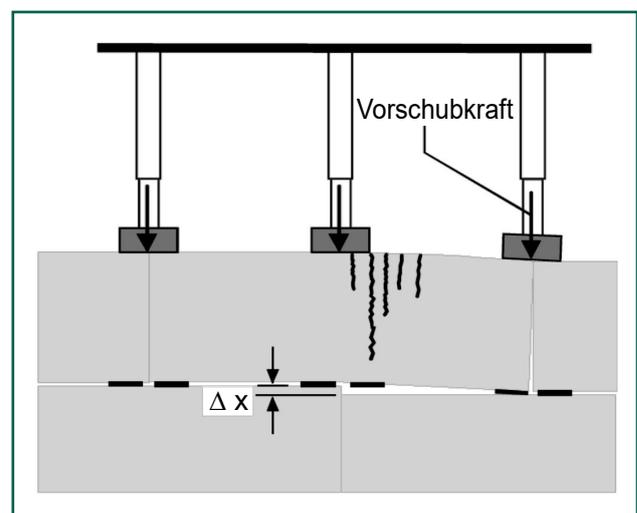


Abbildung 26 Schäden aus Versätzen in der Ringfuge

exzentrisch zur Ringachse wirken. Hieraus entstehen Abtriebskräfte, die zu einem „trompetenförmigen“ Aufweiten der Ringe und verstärkter Rissbildung führen können.

Auch eine Verrollung kann wegen der abweichenden Lasteinleitung zu erhöhten Zugspannungen in den Segmenten führen. Die Verrollung kann in der Regel durch Vorgaben in der TBM-Steuerung begrenzt werden.

Die in diesem Absatz aufgeführten Zusatzbeanspruchungen aus Imperfektionen werden in der Regel rechnerisch nicht untersucht, sondern durch eine robuste Auslegung im Tübbingdesign und konstruktive Vorhaltemaße berücksichtigt. Rechnerische Abschätzungen der genannten Einflüsse könnten zur Überprüfung der ausreichend robusten Auslegung der Tübbinge sinnvoll sein.

#### 5.6.4 Beanspruchungen aus Transport, Lagerung und Einbauprozessen

##### Lagerung

Die Lagerung der Tübbinge ist in **Kap. 11.1.9** beschrieben. Aus statischer Sicht ist darauf zu achten, dass die Lagerungen hinsichtlich ihrer Ebenheit und gemäß den statischen Vorgaben exakt angeordnet werden und die Zwischenlagen Berührungen der Tübbinge untereinander oder zur Lagerfläche sicher verhindern. Die Tübbinge sind genau in der vorgesehenen Position abzulegen. Bei schräg liegenden Auflager- bzw. Zwischenleisten besteht das Risiko, dass der Tübbing durch Kriechen eine innere Verdrehung erfährt und nicht mehr lagegenau eingebaut werden kann.

Die Lagerung im Tübbingstapel ist statisch nachzuweisen bzw. die Lagerungen aufgrund statischer Berechnung vorzugeben. Daraus sind die einzuhaltenden Toleranzen für die Positionen der Zwischenlagen zu ermitteln. Weiter sind die zum Zeitpunkt des Lagerungsbeginns vorliegenden Betonfestigkeiten bei den Nachweisen zu beachten.

##### Transport

Beim Transport sind Gefährdungen durch ungewollte Berührungen oder dynamische Einwirkungen zu verhindern. Werden nach dem Antransport in der TBM Beschädigungen der Tübbinge festgestellt, ist nachzuprüfen, wie diese Beschädigungen entstanden sind, und es ist Abhilfe zu schaffen. Jede Transportbeschädigung ist zu dokumentieren.

##### Beanspruchungen aus Einbauprozessen

Bereits bei der Planung der Tübbingringe sind die Beanspruchungen durch die Einbauprozesse zu berücksichtigen. In der Regel ist bei der Verwendung von Vakuumrektoren für die Tübbinge kein rechnerischer Nachweis erforderlich. Bei der Verwendung von punk-

tuellen mechanischen Erektoraufnahmen muss der Tübbing auf die daraus resultierenden Biegemomente bemessen werden.

#### 5.6.5 Spaltzug aus der Rückstellkraft in der Dichtungsnut

Aus den Versuchen zur 4. Röhre Elbtunnel Hamburg ist bekannt, dass die Rückstellkräfte der Dichtungsprofile von erheblichem Einfluss auf die Dichtigkeit und Schadensfreiheit der Tübbingfugen sind **[39]**.

Die vorhandene Bewehrung kann wegen der Einhaltung der Betondeckungen zur Tübbingoberfläche und zu den Fugen in der Regel nicht zur Aufnahme von Spaltzugkräften genutzt werden. Ein Nachweis der Betonkante gegen Abplatzen im Bereich der Dichtungsnut kann deshalb nur unter Ansatz der Betonzugfestigkeit erfolgen. Ein zuverlässiges analytisches Nachweisverfahren für diese Beanspruchung liegt nicht vor; vielmehr sollte der Nachweis vorzugsweise durch Abplatzversuche gemäß **Kap. 4.7.4** und/oder durch konstruktive Maßnahmen gemäß **Kap. 4.6** geführt werden.

Falls ein rechnerischer Nachweis geführt werden soll, kann dieser aussagekräftig nur durch numerische Berechnungen, für die Eckbereiche dreidimensional unter Berücksichtigung der dortigen Lastkonzentration, erfolgen. Diese Vorgehensweise ist allerdings sehr aufwändig und sollte auf Ausnahmefälle beschränkt bleiben.

### 5.7 Einzelnachweise der Tübbingfugen

#### 5.7.1 Allgemeines zur Teilflächenbelastung und Spaltzugbewehrung

Aufgrund der üblichen Fugenausbildung mit ebenen Kontaktflächen wirken sowohl in der Ring- als auch in der Längsfuge konzentrierte Lasten. Diese werden in der Regel mithilfe von analytischen Nachweisverfahren (Spannungsblockverfahren) als „Teilflächenbelastungen“ nachgewiesen. Es sind die lokal erhöhten Betondruckspannungen und die aus deren Lastausbreitung resultierenden Spaltzugspannungen nachzuweisen bzw. die Spaltzugbewehrung zu ermitteln.

Alle Nachweise in **Kap. 5.7** setzen voraus, dass die in der Fuge wirkenden Einwirkungen von Normalkraft  $N$  und Biegemoment  $M$  bekannt sind. Sie werden mittels der in **Kap. 5.5** beschriebenen Berechnungsverfahren ermittelt.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Nachweise gelten ausschließlich für konventionell bewehrte Stahlbeton-Tübbinge. Einzelnachweise für Tübbinge aus Stahlfaserbeton werden in **Kap. 5.11** behandelt. Dabei werden hier zunächst die analytischen Fugennachweise behandelt. Für Fugennachweise mithilfe von numerischen nichtlinearen Berechnungen wird auf **Kap. 5.7.9** verwiesen.

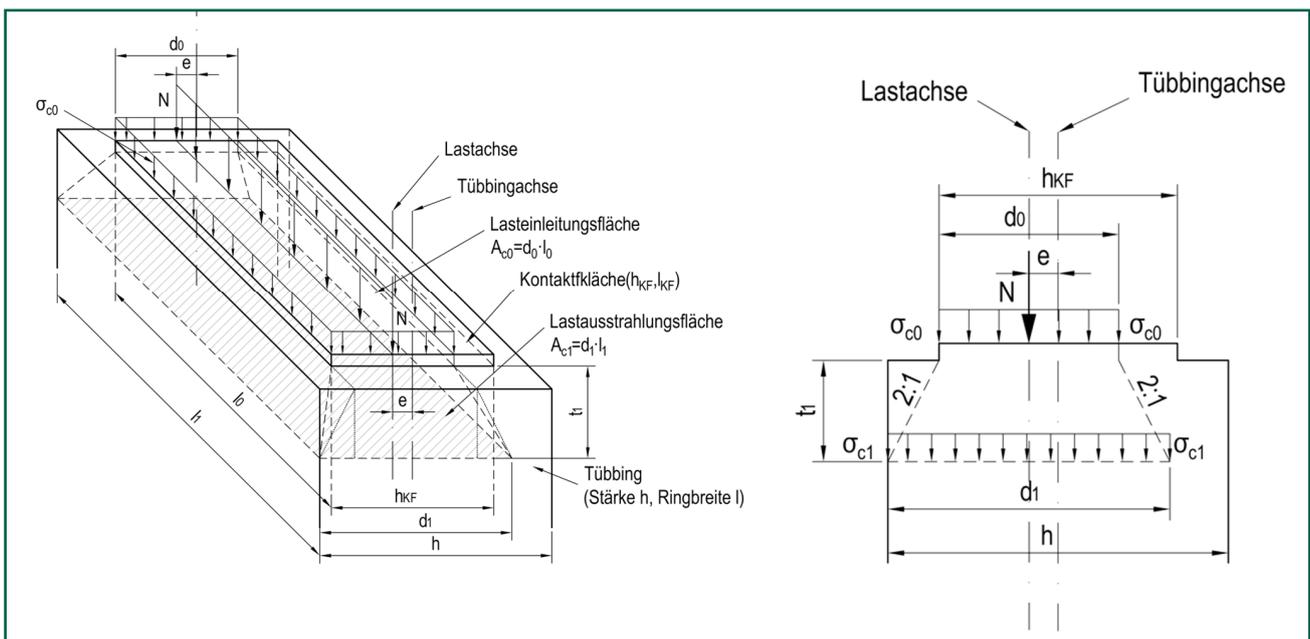
Die in den Nachweisen verwendeten geometrischen Größen und Belastungen sind in **Abbildung 27** dargestellt.

### Spannungsblockverfahren

Die in den **Kap. 5.7.2** bis **Kap. 5.7.8** genannten Nachweiskonzepte zur Bemessung der Längsfugen basieren auf dem analytischen „Spannungsblockverfahren“.

Hierbei werden die in der Kontaktfläche der Breite  $h_{KF}$  angreifenden Beanspruchungen  $N$  und  $M$  als Blocklast mit konstantem Spannungsverlauf angenommen. Die Breite  $d_0$  des Spannungsblocks umfasst dabei nur einen Teilbereich der Kontaktfläche, der sich aus der resultierenden Gesamtexzentrizität  $e$  der angreifenden Kraft ergibt. Analog wird die Breite  $d_1$  der Lastverteilungsfläche berechnet.

$h$	Tübbingdicke in radialer Richtung
$L$	Tüblinglänge in Tunnellängsrichtung, Ringbreite
$h_{KF}$	Höhe der Kontaktfläche, Gelenkhalsbreite
$d_0$	Höhe der rechnerischen Lastübertragungsfläche (radial) oder Lasteinleitungsbreite oder Belastungsbreite
$d_1$	Höhe der rechnerischen Lastverteilungsfläche (radial)
$l_0$	Länge der rechnerischen Lastübertragungsfläche
$l_1$	Länge der rechnerischen Lastverteilungsfläche (längs)
$A_{c0} = d_0 \cdot l_0$	rechnerische Lastübertragungsfläche auf der Kontaktebene
$A_{c1} = d_1 \cdot l_1$	rechnerische Lastverteilungsfläche (nach Lastausbreitung)
$t_1$	Tiefe der rechnerischen Lastausbreitungsfigur (im Nachweis der Teilflächenpressungen nach <b>Kap. 5.7.2</b> )
$\sigma_{c0}$	Teilflächenpressung (als rechteckiger Ersatzspannungsblock)
$\sigma_{c1}$	rechteckige Ersatzspannung nach Lastausbreitung
$e$	Gesamtausmitte / Exzentrizität der Belastung
$e_{OF}$	Abstand der Normalkraft von der nächstgelegenen Segmentoberfläche, Randabstand der Lastresultierenden ( $e_{OF} = h/2 - e$ )



**Abbildung 27** Prinzipskizze Lastausbreitung über die Tübbingdicke bei erhöhter Teilflächenpressung mit Definition der rechnerischen Verteilflächen

Bei symmetrischer Fugengeometrie (ohne Versätze) berechnen sich die Breiten  $d_0$  und  $d_1$  zu:

$$d_0 = 2 \cdot [h_{KF} / 2 - e] = h_{KF} - 2 \cdot e$$

$$d_1 = 2 \cdot [h / 2 - e] = h - 2 \cdot e = 2 \cdot e_{OF}$$

Die Nachweisführung mit dem Spannungsblock setzt entsprechende lokale Plastifizierungen in den Kontaktflächen voraus, die durch experimentelle Untersuchungen abgesichert sind und als Grundlage in die Festlegung der im Bemessungsfall maximal auftretenden, mittleren Kontaktpressung eingeflossen sind. Die aufnehmbaren Teilflächenpressungen gemäß DIN EN 1992-1-1 und **Kap. 5.7.2** gelten demzufolge nur für einen Spannungsblock, nicht aber für lokale Spannungsspitzen, wie sie sich beispielsweise in FEM-Berechnungen mit einer Modellierung der Längsfugen mittels linear-elastischer Kontaktelemente ergeben (**Abbildung 28**).

Sofern bei numerischen Berechnungen die Tübbinge durch Kontinuums-elemente modelliert worden sind und demzufolge in den Längsfugen Spannungen, aber keine Schnittgrößen ermittelt worden sind, ist zur Anwendung des Spannungsblockverfahrens die in der Fuge berechnete Spannungsverteilung über die Kontaktfläche aufzuintegrieren und daraus die resultierende Normalkraft  $N$  und das Biegemoment  $M$  zu ermitteln. Hieraus kann dann der Spannungsblock zurückgerechnet und die Nachweise der Teilflächenbeanspruchung gemäß **Kap. 5.7.2** geführt werden (vgl. **Abbildung 28**).

#### Zusatzexzentrizitäten aus Herstellung und Montage

Zusätzlich zu der Lastexzentrizität  $e_M$  sind in sämtlichen Einzelnachweisen der Tübbingfugen in der Regel Zusatzexzentrizitäten  $e_{VS}$  aus Herstell- und Montagetoleranzen zu berücksichtigen:

$$e = e_M + e_{VS} = M/N + e_{VS}$$

In Anlehnung an RiL 853.4005 **[1]** können die Zusatzexzentrizitäten im Regelfall mit  $e_{VS} = 10$  mm angenommen werden, wenn nicht durch Qualitäts-sicherungsmaßnahmen auf der Baustelle oder Zentrierhilfen in den Fugen kleinere Toleranzen begründet werden können.

#### 5.7.2 Nachweis der Teilflächenbeanspruchung in der Längsfuge

Das analytische Nachweiskonzept für die Teilflächenbelastung basiert auf dem „Spannungsblockverfahren“, siehe auch **Kap. 5.7.1**, und folgt grundsätzlich der DIN EN 1992-1-1 **[7]** und **[9]**, Abs. 6.7 „Teilflächenbelastung“. Demnach wird die aufnehmbare Teilflächenpressung in der Längsfuge wie folgt ermittelt:

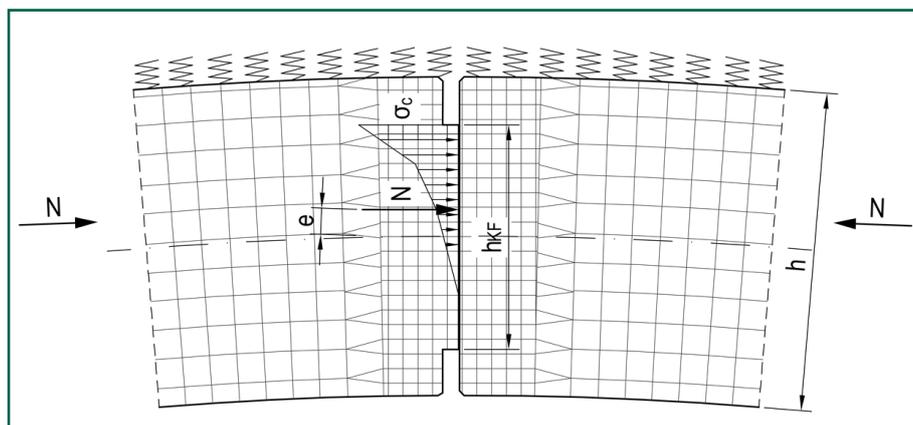
$$\sigma_{c0,Rd} = f_{cd} \cdot \sqrt{A_{c1} / A_{c0}} \leq 3 \cdot f_{cd}$$

mit:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$$

Für Tübbinglängsfugen mit Teilflächenbeanspruchung wurden bereits eine Vielzahl von tübbingspezifischen Versuchen durchgeführt. Beispielhaft seien die Versuche für die 4. Röhre Elbtunnel Hamburg **[33]**, für verschiedene Bahntunnel der DB AG (Boßlertunnel, Fildertunnel) sowie in Forschungsvorhaben (vgl. **[41]**, **[43]**) genannt. Alle Versuche zeigen hohe Beanspruchbarkeiten, die bei geeigneter Fugenbewehrung und größeren bezogenen Exzentrizitäten  $e/h_{KF}$  teilweise deutlich über den bisherigen normativ zulässigen Tragfähigkeiten liegen. Aus diesem Grund wird für die Teilflächenbelastung auf Tübbingfugen empfohlen, beim Nachweis nach DIN EN 1992-1-1 die folgenden Anpassungen vorzunehmen und dabei die zugehörigen Bedingungen einzuhalten:

- Für die Tiefe  $t_1$  der Lastverteilung in Belastungsrichtung gelten die Bedingungen der **Abbildung 27** mit einer Lastausbreitung unter der Neigung 2:1, die an Bild 6.29 der DIN EN 1992-1-1 angelehnt ist.



**Abbildung 28**

Beispielhafte Darstellung der Fugenspannungen in einem FE-Modell mit linear-elastischem Betonverhalten

- Die Begrenzung der Lastverteilungsbreite  $d_1$  auf das Dreifache der Lastübertragungsbreite  $d_0$  ( $d_1 \leq 3 \cdot d_0$ ) ist für Tüblinglängsfugen nicht anzuwenden, sofern die Betonfestigkeitsklasse nicht höher als C50/60 ist. Bei höheren Festigkeiten als C50/60 dürfen aber mindestens diejenigen aufnehmbaren Teilflächenpressungen angesetzt werden, die sich aus den vorstehenden Regelungen für einen Beton C50/60 ergeben
- Der Schwerpunkt der Fläche  $A_{c1}$  muss in Belastungsrichtung mit dem Schwerpunkt der Lastübertragungsfläche  $A_{c0}$  übereinstimmen. Die Tüblingkrümmung darf vernachlässigt werden.
- Das Kriterium der „geometrischen Ähnlichkeit“ zwischen den Flächen  $A_{c1}$  und  $A_{c0}$  ist bei Tübbing nicht anzuwenden.
- Wirken auf den Betonquerschnitt mehrere Druckkräfte, so dürfen sich die rechnerischen Verteilungsflächen innerhalb der Tiefe  $t_1$  nicht überschneiden. Dies gilt nicht für die üblichen Aussparungen von Führungsstäben (Guiding Rods).
- Die rechnerischen Belastungen müssen über die Länge  $l_0$  nahezu konstant sein, wobei Aussparungen unberücksichtigt bleiben können. Bei einem nicht konstanten Verlauf in Tüblinglängsrichtung sind die weiteren Angaben in **Kap. 5.7.8** zu berücksichtigen.
- Die durch die Lastausbreitung infolge der Teilflächenbelastung entstehenden Querkzugkräfte (Spaltzug) sind durch eine ausreichende Bewehrung gemäß **Kap. 5.7.3** aufzunehmen.
- Zusätzlich zu der Lastexzentrizität  $e_M = N/M$  sind Ausmitten aus Herstell- und Montagetoleranzen ( $e_{vs}$ ) in den rechnerischen Nachweisen zu berücksichtigen.

- Bei großen bezogenen Exzentrizitäten  $e/h_{kf}$  haben Versuche gezeigt, dass ggf. noch höhere Teilflächenpressungen als  $3 \cdot f_{cd}$  aufnehmbar sind. Im Einzelfall kann es daher sinnvoll sein, die ggf. erhöhte Tragfähigkeit mittels projektbezogener Versuche im Rahmen einer versuchsgestützten Bemessung nachzuweisen.

### 5.7.3 Nachweis der Spaltzugbewehrung in der Längsfuge

An den Längsfugen ist die Spaltzugbeanspruchung rechnerisch nachzuweisen. Dazu wird die Spaltzugbewehrung für die ungünstigste Kombination von Normalkraft und zugehörigem Moment, bzw. der Exzentrizität  $e_M = M/N$ , sowie unter zusätzlicher Berücksichtigung von Herstell- und Montagetoleranzen ermittelt.

Für eine exzentrisch angreifende Last mit  $e > h/6$  treten zusätzlich zu den Spaltzugkräften  $F_{z1}$  noch Randzugkräfte  $F_{z0}$  und sekundäre Spaltzugkräfte  $F_{z2}$  auf, vgl. **Abbildung 29** und DAfStB, Heft 631 [18]. Randzug- und sekundäre Spaltzugkräfte sind für die Tübbingbemessung in der Regel untergeordnet. Bei Erfordernis können die Randzugkräfte gegen die zulässige Betonzugfestigkeit nachgewiesen werden. Sie werden hier nicht weiter behandelt.

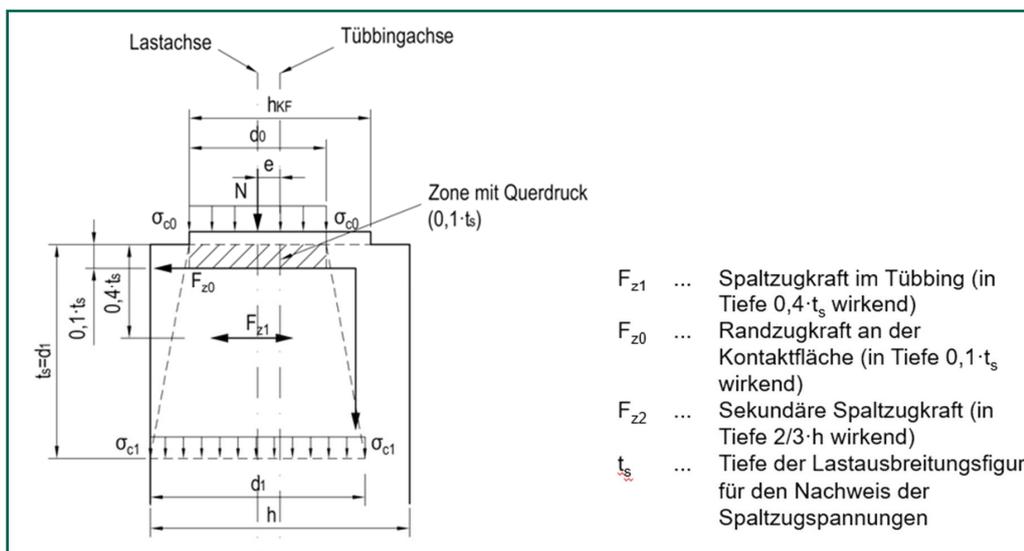
Die Berechnung der Kräfte und der Nachweis der Bewehrung erfolgen unter Ansatz der Kraftübertragung mittels des Spannungsblockverfahrens auf Grundlage des DAfStB-Hefts 631 [18] sowie der DIN EN 1992-1-1-1, Abs. 6.5.3.

Für die Resultierende der Spaltzugspannungen gilt demnach:

$$F_{z1} = 0,25 \cdot N \cdot (1 - d_0 / d_1)$$

mit:

$$d_1 = 2 \cdot (h/2 - e) = 2 \cdot e_{OF} \leq h \quad (\text{Abbildung 29})$$



**Abbildung 29**

Bezeichnungen der Spaltzugbeanspruchungen bei Teilflächenbelastung nach dem Spannungsblockverfahren in Ergänzung zu Abb. 28

Die erforderliche Spaltzugbewehrung erf.  $A_{S,Z1}$  ist für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) wie folgt zu ermitteln:

$$\text{erf. } A_{S,Z1} [\text{cm}^2] = F_{z1,d} / (f_{yk} / \gamma_S)$$

Für die Spaltzugbewehrung brauchen keine Rissbreitennachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) geführt zu werden.

Für die konstruktive Ausbildung der Spaltzugbewehrung wird empfohlen:

- Die Lage der Spaltzugbewehrung soll dem Verlauf der Spaltzugspannungen bzw. der Lage der Resultierenden gemäß **Abbildung 29** entsprechen; Einzelheiten können DAfStB-Heft 631 [18], Abs. 5.2.1 entnommen werden.
- Die Fugeneinfassbewehrung erfüllt die Funktion einer konstruktiven Randbewehrung.

➤ **Hinweis:** Die rechnerische Tiefe der Lastausbreitungsfigur wird in den Nachweisen der Spaltzugbeanspruchung gemäß **Kap. 5.7.3** („ $t_s$ “) und in den Nachweisen der Teilflächenpressungen gemäß **Kap. 5.7.2** („ $t_1$ “) unterschiedlich ermittelt und wird zur Vermeidung von Verwechslungen hier unterschiedlich bezeichnet („ $t_s$ “ bzw. „ $t_1$ “).

- Die Spaltzugbewehrung soll außerhalb der Lasteinleitungsfläche verankert werden. Sofern die Verankerung durch angeschweißte Querstäbe erfolgt, ist die Verankerungslänge gemäß DIN EN 1992-1-1, Abs. 8.6, zu ermitteln. Die Regelungen des NA, NDP zu 8.6(2) und NCI zu 8.6.(5) ( $F_{btd} = 0$ ) sind nicht anzuwenden.
- Sofern für die Verankerung geschweißter Bewehrungselemente Scherfaktoren nach EN ISO 17660-1 planarisch vorgegeben werden, sind diese im Zuge von QM-Prüfungen der Bewehrungsproduktion nachzuweisen. Scherfaktoren für statische Verbindungen liegen üblicherweise zwischen 0,5 und 0,7.
- Die Fugeneinfassbewehrung dient konstruktiv der Sicherung gegen größere Eckabplatzungen. Ihre Bewehrungsführung ist besonders sorgfältig zu planen und es wird empfohlen, die minimal zulässige Betondeckung gemäß **Kap. 5.9.1** auszunutzen. Planarisch kann sinnvoll sein, Vorhaltemaße nicht nur für eine Unterschreitung, sondern auch für bestimmte Überschreitungen der Nominalmaße der Betondeckung festzulegen.
- Die Fugeneinfassbewehrung liegt üblicherweise im Bereich der Querdruckspannungen, die im Randabstand  $\leq 0,1 \cdot t_s$  auftreten, vgl. **Abbildung 29**. Sie ist deshalb rechnerisch nicht auf die Spaltzugbe-

wehrung anzurechnen. Versuche haben allerdings die gute Wirksamkeit einer Einfassbewehrung auf die Einleitung von Teilflächenpressungen gezeigt; im Sinne einer robusten konstruktiven Ausbildung sollte deshalb eine Einfassbewehrung in jedem Fall vorgesehen werden.

#### 5.7.4 Konstruktiv mögliche Gelenkverdrehung in der Längsfuge

Zusätzlich zu den statischen Nachweisen der Längsfugen ist die konstruktive Verträglichkeit der berechneten Gelenkverdrehungen mit der Fugengeometrie und der Auslegung des Dichtprofils zu überprüfen. Hierbei sind insbesondere die ausreichende Dichtwirkung des Dichtprofils (Vergrößern des Nutgrundabstandes bei Öffnen der Fuge auf der Außenseite) und die Aufnahme der Rückstellkraft des Dichtprofils durch den Beton im Bereich der Dichtungsnut (erhöhte Kompression und Abplatzwirkung bei Öffnen der Fuge auf der Innenseite) zu beachten. Die Achse der Gelenkverdrehung kann dabei vereinfachend nach Janßen [34], Abs. 4.2 angenommen werden, sofern keine genaueren Untersuchungen durchgeführt werden. Zum Nachweis des Nutfüllungsgrads siehe auch **Kap. 4.6**.

#### 5.7.5 Nachweis der Querkraftübertragung in der Längsfuge

Bei Tübbinggelenken kann das Verhältnis von Querkraft  $V$  zu Druckkraft  $N$  über ein Reibungsmodell bewertet werden.

In Anlehnung an DIN EN 1992-1-1, Abs. 6.2.5 [7] kann der Reibungsbeiwert zwischen Beton und Beton selbst bei glatten Fugen regelmäßig mit  $\mu = 0,5$  angenommen werden. Für die Schlusstein-Längsfuge sind gesonderte Betrachtungen erforderlich, siehe hierzu **Kap. 5.7.6**. Für das ungünstigste Verhältnis der charakteristischen Werte von  $V$  und  $N$  in der Längsfuge ergibt sich damit die minimale globale Sicherheit gegen Gleiten zu:

$$\min. \eta \geq (0,5 \cdot N_k) / V_k$$

Für die erforderliche Sicherheit  $\eta$  wird für die Bemessungssituationen BS-P und BS-T ein Wert  $\eta \geq 2$  und für die Bemessungssituation BS-A ein Wert  $\eta \geq 1,5$  empfohlen.

#### 5.7.6 Nachweis der Längsfuge am Schlusstein

Die Längsfugen der Standardtübbingge 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 Längsfugen eben und ohne eine Verzahnung oder Verdübelung auszubilden.

Aufgrund der in **Kap. 3.3.2** genannten, häufig steileren Ausbildung der Längsfugen am Schlussstein ergeben sich dagegen für die Schlusssteinfugen zusätzliche Abtriebskräfte, die ggf. in detaillierteren Untersuchungen rechnerisch nachzuweisen sind. Führungsstäbe (Guiding Rods) und Verschraubungen sind zur Abtragung von Abtriebskräften in der Regel nicht geeignet.

Aus der Praxis ist bekannt, dass vereinfachte Nachweise der Lagestabilität des Schlusssteins beim Ringbau ggf. zu Ergebnissen auf der unsicheren Seite führen können, da beispielsweise bei einer Schmierung zur Montageerleichterung (**Kap. 11.2.2**) der Ansatz des Reibungsbeiwerts  $\mu = 0,5$  gemäß **Kap. 5.7.5** zu günstig sein kann. Rückrechnungen aus Projekten mit Schlusssteinverschiebungen deuten darauf hin, dass der Reibungsbeiwert bis auf etwa  $\mu = 0,25$  reduziert sein kann.

### 5.7.7 Nachweis der Teilflächenpressungen in der Ringfuge

Die Ringfugen, einschließlich der lastausleitenden Seite, sind infolge der Pressenkräfte aus dem TBM-Vortrieb nachzuweisen. Für den Nachweis der Teilflächenpressung und die Ermittlung des Spaltzugs ist eine zusätzliche Exzentrizität  $e_{vs}$  des Pressenschuhs aus Bauabweichungen zu berücksichtigen, vgl. auch **Kap. 5.6.3**.

Der Nachweis der Teilflächenpressungen erfolgt nach DIN EN 1992-1-1, Abs. 6.7. Dabei kann die Krümmung der Tübbinge vernachlässigt werden, und das „Ähnlichkeitskriterium“ braucht nicht berücksichtigt zu werden (vgl. **Kap. 5.7.2**). Die Empfehlungen zur Spaltzugbewehrung gemäß **Kap. 5.7.3** können sinngemäß angewendet werden. In der Praxis ist es üblich, folgende Nachweise zu führen:

- auf die „prognostizierte Pressenkraft im Regelvortrieb“, mit Berücksichtigung der normativen materialseitigen Teilsicherheiten, und
- auf die „installierte Pressenkraft (bzw. abgeregelter Wert)“, ohne Berücksichtigung von materialseitigen Teilsicherheiten.

Die lastseitigen Erhöhungen der Pressenkräfte (Teilsicherheiten  $\gamma_E$  der Einwirkungsseite) werden in der Praxis sehr unterschiedlich gehandhabt. Üblich sind Werte in der Spanne  $\gamma_E = 1,35$  bis  $\gamma_E = 1,0$  (keine Erhöhung), u. a. abhängig vom Ansatz der Pressenkräfte. Aufgrund des großen Einflusses auf den Bewehrungsgehalt der Tübbinge, das eventuelle Risiko von Längsrissbildungen, die Flexibilität im TBM-Vortrieb und ggf. vertragliche Randbedingungen kann keine allgemeingültige Empfehlung genannt werden. Vielmehr soll möglichst schon in der Ausschreibung eine projektbezogene Vorgabe erfolgen. In jedem Fall sind

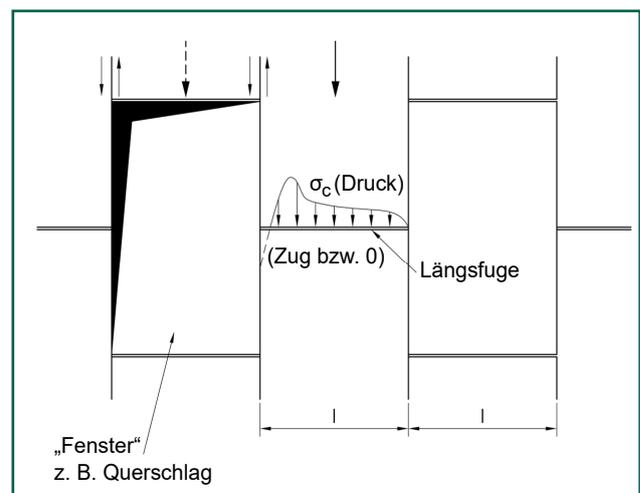
die rechnerisch nachgewiesenen Pressenkräfte auf den Ausführungsplänen anzugeben und im Vortrieb strikt einzuhalten.

### 5.7.8 Längsfugenbeanspruchungen in Tunnel-längsrichtung

In Tunnel-längsrichtung kann im Allgemeinen näherungsweise von einem konstanten Spannungsverlauf ausgegangen werden. Die Längsfugennachweise werden hier auf einen Laufmeter (lfdm) Tunnel oder die Ringbreite  $L$  bezogen.

In Sonderbereichen, beispielsweise neben Querschlagöffnungen, liegen wegen der Lastumleitung um die Öffnung meist stark veränderliche Spannungsverläufe in Längsrichtung der Längsfugen vor (**Abbildung 30**). In der Praxis hat sich bewährt, hierfür über ingenieurmäßig festgelegte Teilabschnitte in Längsrichtung eine Mittelung der Fugenpressungen zu Spannungsblöcken vorzunehmen und abschnittsweise die Nachweise gemäß **Kap. 5.7.2** und **Kap. 5.7.3** zu führen. Für diese Vorgehensweise gelten folgende Empfehlungen:

- Eine Mittelwertbildung soll in jedem Fall nur über Spannungsbereiche gleichen Vorzeichens erfolgen. Eine Mitteilung über Bereiche mit Fugenklaffungen bzw. rechnerischen Zugspannungen ist nicht zulässig.
- Die maximale Teillänge für eine Mittelung soll die halbe Ringbreite, maximal aber 1,0 m, nicht überschreiten.
- Der gemittelte Spannungswert einer Teillänge soll nicht kleiner sein als 50 % des Maximalwerts in diesem Bereich.



**Abbildung 30** Beispielhafte Längsfugenspannungen neben einer Querschlagöffnung, für einen in Längsrichtung nicht konstanten Spannungsverlauf

- Die Mittelung der Normalkräfte  $N$  und der Biegemomente  $M$  soll in jedem Fall über jeweils gleiche Teillängen erfolgen.
- Wenn die Nachweise abschnittsweise über Teilbereiche in Längsrichtung erfolgen, ist darauf zu achten, dass sich die Lastverteilungsbereiche über die Tiefe  $t_1$  in Tunnellängsrichtung nicht überschneiden.

### 5.7.9 Numerischer Nachweis von Teilflächenbelastungen

Grundsätzlich sollten die Nachweise der Teilflächenbelastung und auf radialen Spaltzug mit den analytischen Verfahren nach DIN EN 1992-1-1 bzw. DAFStB, Heft 631 [18] erfolgen. Ergänzend oder alternativ können diese Nachweise auch mithilfe numerischer Nachweise erbracht werden. Da diese allerdings noch wenig erprobt sind und noch nicht als etabliert angesehen werden können, sollten die Zulässigkeit und die Vorgehensweise bei der Nachweisführung im Rahmen der Ausschreibung durch den Bauherrn festgelegt werden. Im Rahmen eines Planungshandbuchs sollte zudem das Vorgehen hinsichtlich der Modelle, Belastung, aufnehmbaren Bauteilwiderstände, Teilsicherheitsfaktoren, dem simulierten Materialverhalten und sonstiger Randbedingungen zwischen dem Planenden, dem Bauherrn sowie dem Prüfer vor Ausführen der Nachweise abgestimmt werden.

Die numerischen Berechnungen können die folgenden Nachweise zum Ziel haben:

- Teilflächenbelastung, insbesondere im Fall hoher Druckspannungen, lokal oder insgesamt;
- Aufnahme radialer Spaltzugspannungen im Tübbinginneren;
- Aufnahme der Randzugspannungen im Fall stark ausmittiger Belastungen;
- Aufnahme von Zugspannungen, die außerhalb von bewehrten Bereichen auftreten und daher durch Bewehrung nicht aufgenommen werden können.

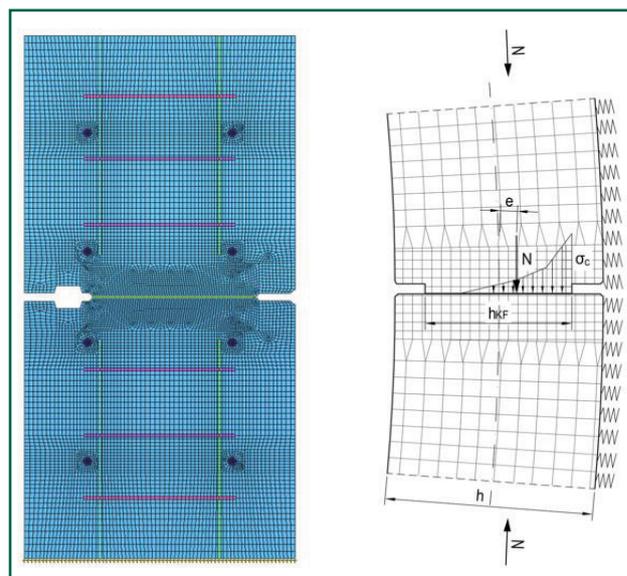
Hinsichtlich der numerischen Modellierung hat sich bislang noch kein spezifisches Modell durchgesetzt oder als besonders geeignet erwiesen. Die in **Abbildung 31** dargestellten Modelle für Längsfugen sind beispielhaft aufgeführt und weisen individuelle Vor- und Nachteile auf. Andere, geeignete Modelle können ebenfalls angewendet werden.

Den in **Abbildung 31** dargestellten Modellen ist gemein, dass die aus der Berechnung am Gesamtmodell bestimmten Schnittgrößen auf der Längsfuge als äußere Lasten aufgebracht werden und somit mit Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt werden können. Es wird empfohlen, bei nichtlinearen Berechnungen sämtliche Teilsicherheitsbeiwerte – d. h. die einwir-

kungs- und materialeitigen Beiwerte bzw. den Systembeiwert – gesamtheitlich auf die äußeren Lasten ( $\gamma_E$ ) anzuwenden. Dann können sämtliche Baustoffkennlinien (Spannungs-Dehnungs-Beziehungen) mit ihren charakteristischen Werten im Sinne von „tatsächlichen Größen“ angesetzt werden. Hiermit ist die Forderung der DIN EN 1992-1-1, Abs. 5.7 nach dem Ansatz realistischer Steifigkeiten erfüllt. Je nach Zielsetzung des Nachweises können ggf. die Lasten auch als charakteristischer Wert oder als Bemessungslast angesetzt werden.

Im Allgemeinen sollten nichtlineare Materialmodelle verwendet werden, da mit linearen Materialmodellen nur eingeschränkte Aussagen zum Fugenverhalten möglich sind. Die angesetzte Materialmodellierung muss aufgrund der mehraxialen Spannungszustände im Fugenbereich für die gewählte numerische Modellierung mit Kontinuums- oder Volumenelementen geeignet sein und der Ansatz von charakteristischem oder Bemessungsverhalten der Aufgabenstellung entsprechen. Dies gilt insbesondere für den Ansatz der Betonzugfestigkeit. Im Segment auftretende Zugbelastungen sollten im GZT möglichst vollständig einer Spaltzugbewehrung zugewiesen werden.

In den numerischen Modellen können die radiale Bewehrung und die Umfangsbewehrung als Zugglied z. B. mit Stabelementen abgebildet werden. Für das Verbundverhalten zwischen Bewehrung und Beton kann die Verbundfestigkeit  $f_{bd}$  gemäß DIN EN 1992-1-1, Abs. 8.4.2 angesetzt werden.



**Abbildung 31** Numerische Detailmodelle zum Nachweis des Nahbereichs von Längsfugen: doppelseitiges Blockmodell (links) und gekrümmtes doppelseitiges Modell mit Bettung (rechts)

### 5.7.10 Nachweise der Verbindungsmittel der Tübbingfugen

Im Montagezustand während des Ringbaus erfüllt die temporäre Verschraubung in den *Längsfugen* die Funktion, den Rückstellkräften des Dichtprofils entgegenzuwirken, bis der umgebende Boden, die Ringspaltverfüllung oder der Formschluss in Längsrichtung eine Fugenöffnung verhindern, vgl. hierzu **Kap. 3.3.4.**

Die Dimensionierung der Fugenverschraubung bzw. Dübel wird darauf ausgelegt, dass das Dichtprofil nicht über die zulässige Entspannung bzw. Fugenklaffung hinaus entlastet wird. Hierbei sind sowohl die Steifigkeit der Verschraubung bzw. der Dübel, das Rückstellkraft-Verformungs-Verhalten des gewählten Dichtprofils, sowie die geometrischen Randbedingungen (z. B. Neigung der Verschraubungen, Öffnungswinkel der Längsfugen) zu berücksichtigen. Hieraus ergibt sich die maximale rechnerische Kraft in der Achsrichtung des Verbindungsmittels.

Üblicherweise wird diese rechnerische Kraft mit einem pauschalen Erhöhungsfaktor von 2,0 beaufschlagt. Die Dimensionierung von temporären Schrauben oder Dübeln erfolgt dann ohne weitere materialeitige Sicherheitsfaktoren gegen die Fließgrenze. Im Sinne einer robusten Auslegung wird empfohlen, zusätzliche materialeitige Teilsicherheiten von 1,1 bei Stahlschrauben und von 1,25 bei Kunststoffdübeln vorzusehen. Die RiL 853.4005 (11) [1] sieht eine Erhöhung von 150 % (Faktor 1,5) und eine rechnerische Ausnutzung von maximal 80 % vor.

Werden die Traglasten der Verbindungsmittel nicht vom Hersteller/Lieferanten – in der Regel als Mittelwerte auf der Basis von Versuchen – angegeben, können sie auf Basis der einschlägigen Regelwerke ermittelt werden.

Die Sicherheitsbeiwerte für permanente Verschraubungen sind projektbezogen festzulegen; hierbei sind ggf. auch Kriechinflüsse von Kunststoffdübeln zu berücksichtigen.

Die Verwendung von permanent wirksamen Kunststoffdübeln sowie von permanenten Steckdübelverbindungen (in Tunnellängsrichtung) ist in Deutschland bisher nicht üblich.

### 5.7.11 Lastabtrag der Koppelkräfte in den Ringfugen

Koppelemente in der Ringfuge werden meist als Dübelverbindung, gelegentlich auch als Topf-Nocke-Konstruktion ausgeführt. Die früher üblichen Nut-Feder-Konstruktionen werden heutzutage nicht mehr angewendet. Bezüglich des Tragverhaltens ist zu unterscheiden in:

- **Konstruktive, zentrierende Koppelemente:** Derartige Elemente werden als konstruktive Elemente zur Montagehilfe oder zur Lagesicherung in Bau-

zuständen eingesetzt. Steckdübelverbindungen in den Ringfugen dienen zusätzlich häufig zur Aufnahme der Rückstellkräfte der Dichtprofile. Topf-Nocke-Verbindungen bewirken ausschließlich eine Koppelung in radialer Richtung. Als Bauteile werden Koppelemente geringer bis moderater Tragfähigkeit mit Bruchlasten pro Koppelpunkt bis ca. 300 kN, z. B. Topf-Nocke oder Kunststoffdübel, eingesetzt.

- **Lastabtragende Koppelemente:** Es handelt sich um statisch wirksame Elemente, insbesondere zur Lastübertragung der Ringdruckkräfte auf Nachbarringe (beispielsweise beim Öffnen von Querschlägen), oder zur Verformungskontrolle infolge der Steifigkeitserhöhung infolge der Ringkopplung. Für die Übertragung der Koppelkräfte sind statische Nachweise zu erbringen. Die Tragfähigkeit pro Koppelement ergibt sich aus statischen Erfordernissen und kann sehr groß werden (bis über 1000 kN); eingesetzt werden je nach Belastung überwiegend Stahldübel (ggf. Kunststoffdübel mit Stahlkern).

Zur Vermeidung von Zwängungen an eingebauten Koppelementen im Zuge des Ringbaus sollten die Koppelemente mit einem ausreichenden Spiel vorgesehen werden. Empfehlungen hierzu machen in der Regel die Hersteller des Koppelements. Das Spiel sollte in den statischen Berechnungen entsprechend berücksichtigt werden. Da das tatsächlich auftretende, von den lokalen Einbaubedingungen abhängige Spiel allerdings nicht bekannt ist, weisen die statischen Berechnungen in dieser Hinsicht eine unvermeidbare „Unschärfe“ auf.

Die Koppelemente werden meist als Koppel Federn mit nichtlinearer Federkennlinie rechnerisch simuliert. Einzelheiten zur Modellierung von Koppelementen mit Schlupf können [45] entnommen werden.

Wenn ein Spiel in der Koppelverbindung aus statisch-konstruktiven Gründen unzulässig ist bzw. begrenzt werden sollte (beispielsweise bei Querschlagöffnungen), sind bei größeren statischen Beanspruchungen in der Regel Sonderlösungen erforderlich. Ein Vergleich der Wirkung von verschiedenen Koppelementen an Querschlägen wird in [57] vorgenommen.

Die Aufnahme der Koppelkräfte in der Ringfuge ist sowohl für die eingebauten Koppelemente als auch für die Tübbing nachzuweisen. Die Ansätze hierzu sind rechtzeitig abzustimmen. Insbesondere bei größeren Koppelkräften ist ggf. die aufnehmbare Koppelkraft als „versuchsgestützte Bemessung“ über Bauteilversuche zu ermitteln.

Allgemeine Ansätze für die Nachweise der Lastabtragung im Tübbing werden in [31] und [32] gegeben. Bezüglich der Abschätzung der Tragfähigkeit von Dübelverbindungen (speziell mit

kleineren Abmessungen) wird auf die geplante STUVA-Empfehlung [44] und die Analogie von Scherbolzen gemäß [30] und [40] verwiesen. Dübel zur Querkraftübertragung werden gemäß [44] über Durchstanzen oder Druck- und Zugstrebenmodellen nachgewiesen. Die Tragfähigkeit von Topf-Nocke-Kopplungen kann nach [42] abgeschätzt werden. In der angegebenen Literatur sowie in [44] werden zudem Hinweise zu einer geeigneten Bewehrungsführung gegeben. Eine Rückhängung der in radialer Richtung übertragenen Koppelkräfte durch geeignete Bewehrung ist zwingend erforderlich (Abbildung 32).

Die Tragfähigkeit von Koppellementen sowie detaillierte Eingangswerte zum Verformungsverhalten (Kraft-Verformungs-Kennlinie) können aus analytischen oder numerischen Detailberechnungen abgeschätzt oder aus Herstellerangaben bzw. aus Versuchen ermittelt werden.

## 5.8 Nachverfestigung Tübbingbeton

Messungen an ausgeführten Tübbingsegmenten haben gezeigt, dass sich bei den hochwertigen Tübbingbetonen erhebliche Nachverfestigungen – auch als „Nacherhärtung“ bezeichnet – gegenüber der nominalen 28d-Festigkeit einstellen.

➤ **Hinweis:** Von der „Nachverfestigung“ zu unterscheiden ist eine planmäßige Überfestigkeit, beispielsweise um ein schnelles Ausschalen zu ermöglichen. Überfestigkeiten sind nicht Gegenstand des vorliegenden Kap. 5.8.

Die Nachverfestigung ist im Ansatz des Dauerstandsbeiwerts  $\alpha_{cc,EC2}$  der DIN EN 1992-1-1 als Kompensation des Abfalls der Tragfähigkeit bei länger dauernden Lasten bereits berücksichtigt (vgl. fib Model Code MC-2010 [19]). Eine rechnerische Berücksichtigung der Nachverfestigung ist deshalb in Analogie zu DIN

EN 1992-1-1, Abs. 3.1.2 (6) [7] im Regelfall nicht anzusetzen.

Auch bei temporären Belastungen sollte der Dauerstandsbeiwert in der Regel berücksichtigt werden, da Tübbingversuche gezeigt haben, dass schon bei kurzzeitigen Belastungsdauern im Bereich weniger Stunden Langzeiteffekte das Tragfähigkeitsvermögen beeinflussen können.

➤ **Hinweis:** In der DB-RiL 853.4005 [1] finden sich Hinweise für den Ansatz von 90d-Festigkeits bei späten Bauzuständen. Diese Regelungen stehen im Einklang zum vorliegenden Kap. 5.8.

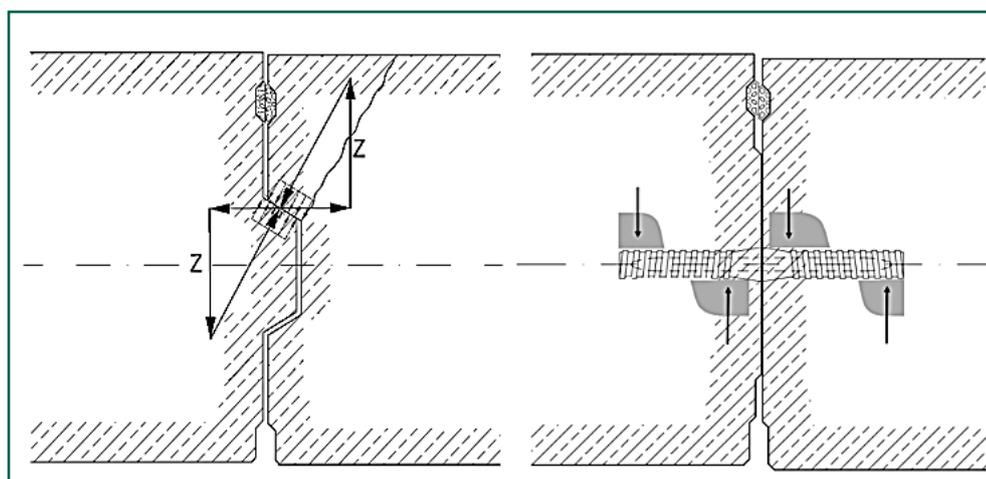
## 5.9 Weitere Hinweise für die konstruktive Ausbildung

### 5.9.1 Betondeckung

An den Oberflächen ist eine Mindestbetondeckung  $c_{min} = 40$  mm einzuhalten, an den Stirnflächen und in lokalen Bereichen (zum Beispiel Aussparungen und Einbauteilen) beträgt die Mindestbetondeckung  $c_{min,red} = 20$  mm.

Das Vorhaltemaß der Betondeckung  $\Delta c$  ist abhängig von den Herstellungsbedingungen und der Qualitätsüberwachung festzulegen. Als Richtwert kann bei entsprechender Qualitätssicherung bei der Tübbingproduktion und in Anlehnung an ZTV-ING Teil 7, Abs. 3-7.2.3.(2)  $\Delta c = 5$  mm angenommen werden. Besonderes Augenmerk ist auf die im Produktionsbetrieb oben liegende Außenseite der Tübinge zu legen; dort ist das Vorhaltemaß ggf. zu erhöhen.

Eine Erhöhung der Betondeckung kann aus Gründen der Dauerhaftigkeit (Expositionsklassen gemäß DIN EN 1992), oder aufgrund von Anforderungen des konstruktiven Brandschutzes erforderlich werden. Eine erhöhte Betondeckung sollte vom Entwurfsverfasser aufgrund der damit verbundenen konstruktiven Nachteile (u. a. geringere statische Nutzhöhe,



**Abbildung 32**  
Prinzipskizze zur Lastübertragung einer Topf-Nocke-Kopplung (links) und einer Dübelverbindung (rechts)

schlechtere Einfassung der Spaltzugkräfte) sorgfältig abgewogen und alternative Maßnahmen überprüft werden.

### 5.9.2 Bewehrungsabstand

Übliche Bewehrungsraster liegen in der Größenordnung zwischen 100 mm und 150 mm. Größere Stababstände sind möglich, wirken sich aber negativ auf die rechnerischen Rissweiten 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 bis 120 mm vorzusehen.

### 5.9.3 Mindestbewehrung

Als Mindestbewehrung für die Tübbinge wird im Allgemeinen eine Netzbewehrung  $\varnothing$  10 mm,  $a = 150$  mm empfohlen. Die ZTV-ING Teil 7 [2], Abs. 3-7.2.3.(1) fordert für Straßentunnel eine Mindestbewehrung von  $\varnothing$  10 mm,  $a = 100$  mm an allen Oberflächen der Tübbinge. Lokale Anpassungen in geringem Umfang sind unter Beachtung von Absatz 3-7.2.3.(3) möglich. In der RiL 853.4005 [1] wird für Bahntunnel eine Oberflächenbewehrung von mindestens 0,15 % der Betonquerschnittsfläche je Richtung an der Innen- und Außenseite gefordert. Für Tübbingdicken von 35 cm entspricht dies der im ersten Absatz genannten Forderung der ZTV-ING.

Die nach DIN EN 1992 geforderte Mindestbewehrung ist bei Tübbingungen aufgrund der Umlagerungsmöglichkeiten nach der Erstrissbildung und der geringen Zugbeanspruchungen aus Zwang in der Regel nicht anzuwenden.

## 5.10 Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

### 5.10.1 Rechnerische Lebenserwartung

Den vorliegenden Empfehlungen liegt die in Deutschland für Tübbingausbauten übliche „rechnerische Lebenserwartung“ von 100 Jahren zugrunde. Rechnerische Lebensdauerberechnungen sind in Deutschland nicht üblich. Für derartige Berechnungen sind zusätzliche Eingangswerte erforderlich, die standardmäßig nicht ermittelt werden (z. B. Chlorid- oder Karbonatisierungswiderstand des Betons). Lebensdauerberechnungen führen zudem in vielen Fällen zu rechnerisch erhöhten Betondeckungsanforderungen, die sich konstruktiv nachteilig auswirken können (vgl. Kap. 5.9.1).

### 5.10.2 Rechnerische Rissbreiten

Rechnerische Rissbreiten aus Gründen der Dauerhaftigkeit sind gemäß DIN EN 1992-1-1/NA, Tabelle NA 7.1 festzulegen. Im Allgemeinen kann für sämtliche

Expositionsklassen von einer rechnerischen Rissbreite von  $w_{cal} = 0,3$  mm für ständige Lasten ausgegangen werden.

Aus Gründen der Wasserundurchlässigkeit oder sonstiger funktionaler Anforderungen können vom Bauherrn weitergehende Rissbreiten- oder Dichtigkeitsanforderungen vorgegeben werden. Beispielsweise wird für Eisenbahn- und Straßentunnel in drückendem Wasser eine rechnerische Rissbreite von  $w_{cal} = 0,2$  mm bzw. 0,15 mm (Außenseite) gefordert. Bezüglich weiterer Einzelheiten wird auf die RiL 853.4005 und RiL 853.2001 [1] sowie ZTV-ING, Abs. 3-8, Teil 3, [2] verwiesen.

Die Rissbreitennachweise sind gemäß DIN EN 1992-2 zu führen. Die Ermittlung der Schnittgrößen in Lastfällen des GZG ist in Kap. 5.5 beschrieben.

Auch bei Einhaltung der rechnerischen Rissbreiten können einzelne Risse mit größeren Rissbreiten nicht ausgeschlossen werden. Für das Vorgehen bei Auftreten derartiger Risse sollten projektbezogene Verfahrensanweisungen festgelegt werden.

## 5.11 Stahlfasertübbinge

### 5.11.1 Allgemeines

Die Ausführung von Tübbingsegmenten mit einer Bewehrung ausschließlich aus Stahlfasern oder in Form einer „Hybridbewehrung“ in Kombination mit einer konventionellen Bewehrung gelangte in Deutschland bisher nur in Einzelfällen zur Anwendung; beispielsweise bei temporären Tübbingungen (Wehrhahnlinie Düsseldorf) oder bei zweischaliger Bauweise (Trinkwasserstollen Mangfalltal – München).

Diese Situation ist insbesondere durch formale Aspekte begründet, da die in Deutschland bauaufsichtlich eingeführte DAfStB-Richtlinie Stahlfaserbeton [15] – nachfolgend als DAfStB-RiL SFB bezeichnet – die spezifische Anwendung von Stahlfaserbeton (SFB) im Tunnelbau u. a. durch eine Begrenzung der Expositionsklassen deutlich einschränkt. Auch darüber hinausgehende nationale Regelwerke grenzen den Einsatz von Stahlfaserbeton im Tunnelbau ein. Beispielsweise sind Tübbinge aus Stahlfaserbeton im Bereich der DB AG gemäß der DB-Richtlinie 853.4005 [1] ein nicht geregeltes Bauprodukt und erfordern deshalb die Einholung einer Unternehmensinternen Genehmigung (UiG) sowie einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE).

Bei internationalen Projekten haben sich stahlfaserbewehrte Tübbinge dagegen bei geeigneten Randbedingungen vielfach als robuste und wirtschaftliche Bauweise bewährt, siehe beispielsweise [49] und [50]. Mit den vorliegenden DAUB-Empfehlungen wird die bestehende Lücke in den Anwendungsrichtlinien in Deutschland für Tübbinge aus Stahlfaserbeton geschlossen. Die Empfehlungen basieren im Wesent-

lichen auf der DAfStB-RiL SFB [15], berücksichtigen darüber hinaus aber auch die Besonderheiten der Tübbingbauweise im Tunnelbau, Erfahrungen mit dem Vorgängerregelwerk DBV-Merkblatt SFB [17] und die bei internationalen Projekten gemachten Erfahrungen.

Auf europäischer Ebene soll der Stahlfaserbeton durch die 2. Generation des Eurocodes 2 bauaufsichtlich eingeführt werden. Nach derzeitigem Stand soll darin die Bemessung von Stahlfaserbeton basierend auf Prüfungen der Nachrissfestigkeit nach EN 14651 [12] und einer Bewertung der Leistungsfähigkeit nach RILEM-Richtlinie [20] bzw. fib Model Code 2010 [19] geregelt werden. Einzelheiten zur geplanten durchgängigen Anwendung von Stahlfaserbeton für sämtliche Planungs- und Ausführungsphasen, einschließlich der Qualitätssicherung, liegen derzeit allerdings noch nicht vor. Deshalb hat der DAUB beschlossen, sich in den vorliegenden Empfehlungen ausschließlich auf die DAfStB-RiL SFB [15] zu beziehen. Auf das „Mischungsverbot“ mit anderen Regelwerken wird hingewiesen.

Die Technologie und Wirkungsweise von Stahlfaserbeton wird als bekannt vorausgesetzt und im Rahmen dieser Empfehlungen nicht beschrieben; hierzu wird auf die umfangreiche einschlägige Fachliteratur verwiesen; wie beispielsweise die Beiträge im Betonkalender 2011 [46] mit weiteren Literaturquellen.

### 5.11.2 Einsatz von Tübbing aus Stahlfaserbeton und Hybrid-Tübbing

Zu Projektbeginn sollte die technische und vertragliche Möglichkeit für den Einsatz von Stahlfasern geprüft und ggf. das Design des Einzeltübbings und des Gesamttrings, beispielsweise die Ringteilung, angepasst werden.

Insbesondere „extrem schlanke“ Tübbinge eignen sich in der Regel nicht für den Einsatz von Stahlfasern. Als Anhaltswerte können folgende Bogenmaß-/Dicken-Verhältnisse  $b/h$  des Tübbings verwendet werden:

- $b/h < 10$             meist geeignet für Stahlfasern
- $b/h = 10 - 14$         bedingt geeignet für Stahlfasern
- $b/h > 14$             eher ungeeignet für Stahlfasern

Relevant für die technische Machbarkeit von Tübbing aus Stahlfaserbeton sind neben dem Nachweis der Längsfugen im Endzustand, in vielen Fällen die Nachweise zur Bemessung der Bauzustände. Diese sollten deshalb besonders sorgfältig überprüft und nachgewiesen werden, insbesondere:

- das Ausschalen und Wenden,
- das Lagern und Stapeln,
- der Transport zur TBM bzw. zum Erektor,

- das Versetzen des Tübbings mit dem Erektor,
- die Ringspaltverfüllung und
- die Ein- und Durchleitung der TBM-Pressenkräfte in Tunnellängsrichtung.

Bei Erfordernis kann auch eine hybride Bewehrung, bestehend aus einer konventionellen Stabstahl- oder Leiterbewehrung zur Aufnahme der Spaltzugkräfte an den Tübbingfugen, in Verbindung mit einer reinen Stahlfaserbewehrung in der Tübbingfläche zur Aufnahme von Normalkraft-/Biegebeanspruchungen (N-M-Bbeanspruchungen), sinnvoll sein.

Die statischen Anforderungen an den Stahlfaserbeton werden gemäß der DAfStB-RiL SFB, Abs. R.3.6.1, als „Leistungsfähigkeit“ festgelegt. Ergänzend zur Festigkeits- und Expositionsklasse sind deshalb die für den Beton geforderten Leistungsklassen L1/L2 auf den Ausführungsplänen anzugeben. Die Leistungsklassen L1/L2 werden vom Tragwerksplaner im Rahmen der statischen Berechnungen der Tübbinge festgelegt. Es liegt dann im alleinigen Verantwortungsbereich des Betonlieferanten, eine geeignete Betonrezeptur, den Fasertyp und eine erforderliche Mindestdosierung der Stahlfasern zu wählen.

Üblicherweise werden reine SFB-Tübbinge mit einer Faserdosierung von etwa 30 bis 50 kg/m<sup>3</sup> Beton und bei hybrider Bewehrung zwischen 25 und 40 kg/m<sup>3</sup> Beton hergestellt. Es handelt sich hierbei in der Regel um unterkritische Fasergehalte, das heißt, dass die zentrische Nachrisszugfestigkeit  $f_{ct0}$  des Stahlfaserbetons geringer ist als die zentrische Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  des unbewehrten Betons. Trotz des unterkritischen Fasergehalts tritt bei Biegebelastung in der Regel kein Traglastverlust bei der Erstrissbildung auf, da durch Spannungsumlagerungen Traglastreserven im Nachrissbereich aktiviert werden können. In den letzten Jahren ist mit der Entwicklung neuer Hochleistungsfasern eine Tendenz zu überkritischen Fasergehalten zu beobachten gewesen [50]. Damit kann der Anwendungsbereich von SFB-Tübbing zukünftig erweitert werden.

Die Vorversuche und Prüfungen zum Nachweis der Leistungsklassen und zur Überwachung des Betons sind gemäß der DAfStB-RiL SFB, Teil 2, Anhang O an Biegebalken 150 × 150 × 700 mm im Vierpunktversuch durchzuführen. Demnach sind Prüfungen gemäß DIN EN 14651 (CMOD-Versuche) in Deutschland nicht vorgesehen. Die Anforderungen an die Prüfkörperabmessungen gemäß DIN EN 12390-1 sind einzuhalten.

Bezüglich weiterer Angaben zur Herstellung von Stahlfaserbetonen und SFB-Tübbing wird auf **Kap. 11.1.4** dieser Empfehlungen verwiesen.

### 5.11.3 Statische Nachweise von Tübbing mit Stahlfaserbewehrung

➔ **Hinweis:** Die Empfehlungen in diesem Kapitel sind mit dem DAfStB-UA SFB abgestimmt worden.

#### Grundlagen, Regelwerke

Mit der bauaufsichtlichen Einführung der DAfStB-RiL SFB [15] steht ein in sich konsistentes Regelwerk für die Bemessung von reinem Stahlfaserbeton oder Stahlfaserbeton in Kombination mit Stahlbeton zur Verfügung. Die DAfStB-RiL SFB bezieht sich auf die DIN EN 1992-1-1.

Die DAfStB-RiL SFB verfolgt einen vom Stoffverhalten bestimmten Ansatz: Das Materialverhalten von Stahlfaserbeton im Nachrissbereich wird anhand von kleinmaßstäblichen Versuchen ermittelt und daraus Grundkennwerte der Nachriss-Zugfestigkeit abgeleitet. Aus den Grundwerten werden die Rechen- und Bemessungskennwerte für definierte Spannungs-Dehnungslinien ermittelt. Diese Spannungs-Dehnungslinien finden Eingang in die übliche Bemessung von Stahlbetonkonstruktionen nach DIN EN 1992-1-1 im Sinne einer Verbesserung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit.

Der entwerfende Ingenieur legt als Ergebnis seiner statischen Berechnungen die erforderlichen Baustoffeigenschaften des Stahlfaserbetons durch Angabe der Betonfestigkeitsklasse sowie der Leistungsklassen L1 und L2, ggf. in Kombination mit konventioneller Bewehrung als Hybridtübblinge, fest.

Die DAfStB-RiL SFB ist primär auf die Belange des üblichen Hoch- und Industriebaus ausgerichtet. Für die speziellen Belange von Tübbing, unter Beachtung der im Tunnelbau hochgradig statisch unbestimmten Systemen, wird nachfolgend die DAfStB-RiL SFB spezifiziert und ergänzt. Die Empfehlungen beziehen sich insbesondere auf die derzeit üblichen Stahlfaserbeton-Tübbinge mit einem unterkritischen Fasergehalt.

Ein wesentlicher Anteil für die große Verbreitung rein stahlfaserbewehrter Tübbing im Ausland liegt auch an der Akzeptanz einer versuchsgestützten Bemessung in Verbindung mit hohen Anforderungen an die Leistungsklasse des Stahlfaserbetons. Die Möglichkeit einer „versuchsgestützten Bemessung“ wird deshalb für Tübbinge als alternative Nachweismethode explizit genannt.

#### 5.11.3.1 Ergänzende Empfehlungen für Tübbinge aus Stahlfaserbeton

Für die Berechnung von Tübbing mit statisch wirksamem Stahlfaserbeton (SFB) oder einer Hybridbewehrung aus Stahlfasern in Kombination mit konventioneller Bewehrung wird grundsätzlich die Anwendung der aktuell bauaufsichtlich eingeführten

DAfStB-RiL SFB [15] empfohlen. Dabei sind nachfolgend genannte Spezifizierungen und Ergänzungen zu berücksichtigen.

Nachfolgend genannte alternative versuchsgestützte Nachweismöglichkeiten beziehen sich auf eine „versuchsgestützte Bemessung“ gemäß EN 1990 [3], [4], Anhang D, in der Regel im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bzw. nach gesonderten Anforderungen der Aufsichtsbehörden.

- **Zu DAfStB-RiL SFB R.1.1.2, Abs. (1)P – Anwendungsbereich (Voraussetzungen):** Die genannten Voraussetzungen zur Anwendung von statisch wirksamem Stahlfaserbeton, das heißt die Möglichkeit der inneren oder äußeren Umlagerung, können bei üblichen Randbedingungen im Tunnelbau im Regelfall als erfüllt angesehen werden. In Ausnahmefällen, in denen eine äußere, lastseitige Umlagerungsmöglichkeit nicht oder nur untergeordnet gegeben ist (beispielsweise bei überwiegender Wasserdruckbelastung mit geringer Baugrundbettung), ist die Unschädlichkeit von mit den Umlagerungen verbundenen Verformungen, Plastifizierungen oder Rissbildungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) gesondert nachzuweisen.

- **Zu DAfStB-RiL SFB, R1.1.2, Abs. (4)P – Anwendungsbereich (Expositionsklassen):** In den Expositionsklassen XS2, XD2, XS3, XD3 darf die rechnerische Wirkung der Stahlfasern in den Nachweisen des GZT nur dann berücksichtigt werden, wenn für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) nachgewiesen wird, dass keine Einschränkung der Lebensdauer des Tübbingringes aus übermäßiger Rissbildung ( $w_{\max} = 0,2 \text{ mm}$ ) zu erwarten ist. Diese Nachweise können gemäß den untenstehenden Empfehlungen „zu DAfStB-RiL SFB, R.7.3.1 bis R.7.3.4 – Nachweise im GZG – Begrenzung der Rissbreiten“ geführt werden.

- **Zu DAfStB-RiL SFB, R.1.1.2, Abs. (4)P – Anwendungsbereich (Druckfestigkeitsklassen):** Stahlfaserbeton darf bei hochfesten Betonen der Druckfestigkeitsklassen ab C55/67 nur mit einer Zustimmung im Einzelfall eingesetzt werden.

- **Zu DAfStB-RiL SFB, R.3.6.3, Abs. (5)P – Festigkeiten (Faktor  $\kappa_{\text{G}}$  der Bauteilgröße):** Für alle Nachweise in Tunnellängsschnitten (bspw. N-M-Bearbeitungen, Spaltzugnachweise in der Längsfuge, nicht aber für Spaltzugnachweise in der Ringfuge) kann zur Ermittlung der gerissenen Querschnittsfläche  $A_{\text{ct}}^{\text{f}}$  als Bezugslänge in Tunnellängsrichtung die Ringbreite „l“ angenommen werden. Zur Vermeidung einer Iteration zur Ermittlung des Faktors  $\kappa_{\text{G}}$  wird als Erfahrungswert des DAUB für N-M-Bearbeitungen eine Näherung für die Zugzonenhöhe von  $0,75 \cdot h$  ( $h$  = Tübbingdicke) empfohlen. Dieser

Wert ist nach der Bemessung zu überprüfen und ggf. anzupassen.

- Zu DAfStB-RiL SFB, R.3.6.3, Abs. (5)P – **Festigkeiten (Faktor  $\kappa_F$  der Faserorientierung)**: Tübbinge sind für Biegenachweise (N-M-Beanspruchungen) als ebene, liegend hergestellte flächenhafte Bauteile im Sinne der DAfStB-RiL SFB anzusehen. Für die Spaltzugnachweise in den Ring- und Längsfugen ist  $\kappa_F = 0,50$  anzunehmen. Als Alternative zur Ermittlung der  $\kappa_F$ -Werte kann ein „versuchsgestützter Nachweis“ gemäß den Vorbemerkungen erfolgen.
- Zu DAfStB-RiL SFB, R.3.6.3, Tabelle R.3 – **Leistungsklassen L1 und L2 (Fußnote 2)**: Für Tübbing-Fertigteile liegen im Vergleich zum Hochbau i. a. günstigere Verhältnisse vor:
  - Produktion im FT-Werk mit kontinuierlicher Überwachung,
  - Verwendung von Fasern hoher Leistungsfähigkeit,
  - Hoher Standard in der Qualitätsüberwachung, beispielsweise hohe Testanzahl,
  - Höhere Betonfestigkeiten.

Deshalb ist es gerechtfertigt, dass für die Anwendung der Leistungsklassen 2,7 und 3,0 die Forderung der DAfStB-RiL SFB gemäß Fußnote 2 (zusätzliche abZ oder ZiE) entfallen kann. Diese Leistungsklassen sind in jedem Fall durch Versuche entsprechend der DAfStB-RiL, Anlage O, nachzuweisen; abweichend von der allgemeinen Regelung sind dabei mindestens  $n = 12$  Versuche durchzuführen.

- Zu DAfStB-RiL SFB, R.3.6.3, Tabelle R.3 – **Leistungsklassen L1 und L2**: Die Verwendung von Zwischenwerten der in Tabelle R.3 angegebenen Leistungsklassen in Stufen von jeweils  $0,1 \text{ N/mm}^2$  ist zulässig. Die tabellierten Grundwerte sind dann entsprechend zu interpolieren.
- Zu DAfStB-RiL SFB, R.6.5.1, Abs. (R.2) P – **Stabwerkmodelle (Allgemeines)**: Nachweise über Stabwerkmodelle werden in einer Tübbingstatik nur in seltenen Sonderfällen geführt, beispielsweise bei einer Lasteinleitung durch anbetonierte Konsolen. In der Regel ist dann nachzuweisen, dass die im Grenzzustand der Tragfähigkeit auftretenden Zugspannungen in den Zugstreben des Stabwerksmodells geringer sind als  $f_{ctd,u}$ .

➔ **Hinweis:** Die Spaltzugbeanspruchung unter Teilflächenbelastung gemäß R.6.7 ist nicht als Stabwerkmodell i. S. d. vorliegenden Absatzes zu verstehen.

- Zu DAfStB-RiL SFB, R.6.7, Abs. (4) – **Teilflächenbelastung**: Der Abs. R.6.7, Abs. (4) wird wie folgt ergänzt:
  - a) Wenn die Spaltzugbewehrung der Längsfugen ausschließlich aus Stahlfasern besteht, darf bei Teilflächenlasten der Entfall der Begrenzung der Lastausbreitung  $d_1 \leq 3 \cdot d_0$  gemäß **Kap. 5.7.2** nicht in Ansatz gebracht werden
  - b) Die idealisierte Spaltzugspannung bei Teilflächenlasten ergibt sich nach R.6.7, Bild R.5 als Spannungsbloc mit  $\sigma_{sz,d} = F_{z1,d} / 0,8 \cdot t_s$ . Hierin stellt  $F_{z1,d}$  den Bemessungswert der resultierenden Spaltzugkraft  $F_{z1}$  und  $t_s$  die Tiefe der Lastverteilungsfigur gemäß **Kap. 5.7.3** dar.

Alternativ zum Nachweisverfahren b) darf der Nachweis der Spaltzugspannungen bei Teilflächenlasten nach einem der nachfolgend genannten Verfahren c) bis f) erfolgen:

- c) Gemäß dem Verfahren von Mark-Schnütgen [35] sind die beiden Querdehnungen im Lasteinleitungsbereich auf maximal  $0,1 \text{ ‰} / \gamma_c$  zu begrenzen. Dabei ist rechnerisch ein gleichmäßiges, linear-elastisches Materialverhalten und eine Querdehnzahl  $\mu = 0,2$  für den Stahlfaserbeton anzusetzen.
- d) Es ist nachzuweisen, dass die Bemessungswerte der maximal auftretenden Hauptzugspannungen im Lasteinleitungsbereich aufgenommen werden können. Dies kann durch eine linear-elastische Berechnung erfolgen, in der die Maximalwerte der Spaltzugspannungen im GZT von der Zugfestigkeit des unbewehrten Betons  $f_{ctd}$  ohne rechnerische Berücksichtigung der Stahlfasern aufgenommen werden. Der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit ist gemäß DIN EN 1992-1-1, Abs. 3.1.6. zu  $f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk;0,05} / \gamma_{c,uB}$  festzulegen. Hierbei ist  $\alpha_{ct} = 0,70$  und der Teilsicherheitsbeiwert für unbewehrten Beton zu  $\gamma_{c,uB} = 1,8$  anzusetzen.
- e) Der Nachweis der Spaltzugspannungen im GZT kann mithilfe von nicht-linearen, numerischen Modellen analog zu **Kap. 5.7.9** geführt werden. Der Nachweis ist dann analog zur DAfStB-RiL SFB, Abs. R.6.7 unter Ansatz von DAfStB-RiL, Abs. R.3.6.5 (Spannungs-Dehnungs-Linien des Stahlfaserbetons) zu führen. Vereinfacht darf  $f_{ctd,u}$  angesetzt werden. Im numerischen Modell dürfen sich die Druckstreben nicht steiler als 2:1 ausbilden (zur Erläuterung des Winkels vgl. auch **Abbildung 27** in **Kap. 5.7.1**).
- f) Der Nachweis der Teilflächenbelastungen an den Tübbingfugen, einschließlich des Nachweises der Spaltzugspannungen, kann durch eine

versuchsgestützte Bemessung gemäß den Vorbemerkungen erfolgen.

In allen anderen Fällen ist zur Abdeckung der Spaltzugspannungen an den Tübbingfugen eine konventionelle Bewehrung gemäß **Kap. 5.7.3** vorzusehen (sog. „Hybridtübbing“).

- **Zu DAfStB-RiL SFB, R.7.3.1 bis R.7.3.4 – Nachweise im GZG – Nachweise der Rissbreitenbegrenzung:** Bei rein stahlfaserbewehrten Bauteilen mit unterkritischem Fasergehalt tritt rechnerisch keine Mehrfachrissbildung auf. Die in der DAfStB-RiL SFB, Abs. R.7.3.1 bis R.7.3.4 genannten Nachweiskonzepte zur Rissbreitenbegrenzung im GZG sind somit für übliche Stahlfaserbeton-Tübbinge nicht geeignet und können nicht angewendet werden.

Aufgrund der geringen Abmessungen der Tübbingsegmente und infolge der Vorspannung durch die äußeren Lasten und ggf. durch die Vortriebspressen können sich im Allgemeinen keine Zugspannungen aus Zwangseinwirkungen aufbauen. Rissbreitennachweise im GZG aus Zwangsbeanspruchungen brauchen deshalb bei Tübbing in der Regel nicht geführt zu werden. Die Praxiserfahrungen zeigen allerdings, dass bei rein stahlfaserbewehrten Tübbing eine Fortpflanzung von am Rand einmal aufgetretenen Rissen weiter in die Tübbingmitte nicht sicher ausgeschlossen werden kann. Bezüglich weiterer Diskussion dieses Aspekts wird auf die Ausführungen in **[38]** verwiesen.

In Ringrichtung kann ggf. eine Rissbreitenbegrenzung im GZG unter den auftretenden N-M-Beanspruchungen aus äußeren Lasten erforderlich werden, beispielsweise zum Nachweis der Dauerhaftigkeit gemäß Abs. R.1.1.2 (Anwendungsbereich bzgl. Expositionsclassen) oder der Wasserundurchlässigkeit bei WUBK-Anforderungen. Hierfür stehen derzeit keine geeigneten Nachweisverfahren für rein stahlfaserbewehrte Bauteile mit unterkritischem Stahlfasergehalt zur Verfügung. Es wird deshalb empfohlen, im Bedarfsfall zum Nachweis der Rissbreitenbegrenzung im GZG eines der nachfolgend genannten, alternativen Ersatznachweisverfahren anzuwenden:

- a) Sofern sich die Spannungsnulllinie der N-M-Beanspruchung im GZG rechnerisch im Querschnitt befindet, darf die rechnerische Rissbreite  $w_k$  vereinfacht gemäß der DAfStB-RiL SFB, Gl. (R.7.11) zu  $w_k = s_w^f \cdot \varepsilon_{ct}^f$  ermittelt werden. Hierbei ist für  $s_w^f$  die Zugzonenhöhe ( $h-x$ ) und für  $\varepsilon_{ct}^f$  die Randzugdehnung des Stahlfaserbetons aus den rechnerischen Nachweisen des GZG einzusetzen.

➤ **Hinweis:** Der Wert  $s_w^f$  ist nicht als Rissabstand zur Ermittlung von Rissbreiten aus Dehnungen, die in numerischen Berechnungen (FEM) ermittelt wurden, zu verstehen.

- b) Die Einhaltung der Rissbreitenanforderungen ist mithilfe geeigneter numerischer, nicht-linearer Berechnungsmodelle, die die rechnerische Ermittlung von Rissbreiten inkludieren, nachzuweisen.
- c) Es ist nachzuweisen, dass unter den Belastungen des GZG der untere Fraktilwert der Betonzugfestigkeit  $f_{ctk,0,05}$  des unbewehrten Betons gemäß DIN EN 1992-1-1, Tab. 3.1, nicht überschritten wird.

➤ **Hinweis:** Im Ausland ist es gebräuchlich, diesen Nachweis gegen die mittlere Betonzugfestigkeit  $f_{ctm}$  zu führen. Dieses Nachweisverfahren stellt keine sichere Rissbreitenbegrenzung dar, kann aber abhängig von den jeweiligen Projektanforderungen geeignet sein.

- d) Die Rissbreitennachweise können als „versuchsgestützte Bemessung“ gemäß den Vorbemerkungen erfolgen.

- **Zu DAfStB-RiL SFB, R.9.2.1.1 – Mindestbewehrung für duktilen Verhalten:** Tübbingtunnel gelten als umlagerungsfähige Systeme, die nach Erstrissbildung eine gesteigerte Systemtragfähigkeit ausbilden. Deshalb ist für Tübbinge keine Mindestbewehrung für duktilen Tragverhalten erforderlich.

### 5.11.3.2 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 gemäß der DAfStB-RiL SFB, Teil 2, Anhang O – Prüfung zur Ermittlung der Leistungsklassen.

Zur Ermittlung der Nachrisszugfestigkeit von Stahlfaserbeton sind mittlerweile international sog. CMOD-Versuche nach EN 14651 **[12]** und der RILEM TC 162 **[20]** üblich. Zudem liegen sowohl national wie auch international umfangreiche Versuchsergebnisse aus Prüfungen gemäß dem DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton **[17]** vor. Allerdings sind die hiermit erzielten Rechenwerte der Nachrissfestigkeiten aufgrund unterschiedlicher Versuchs- und Auswerterandbedingungen nicht vergleichbar mit den Leistungsklassen der DAfStB-RiL SFB. Konsequenterweise sieht die DAfStB-Richtlinie SFB in Abs. R.3.6.3 ein „Mischungsverbot“ vor.

- **Hinweis:** Die DAfStB-RiL SFB wird derzeit überarbeitet und wird in der kommenden Version voraussichtlich Dreipunktversuche berücksichtigen.

Falls in Ausnahmefällen die Nachrisszugfestigkeiten von Stahlfaserbeton nicht mit den Versuchen der DAfStB-RiL SFB ermittelt werden können – beispielsweise, weil die Prüflabore hierauf nicht eingerichtet sind – sind besondere Überlegungen zur Anwendbarkeit und Nachweisverfahren erforderlich; ggf. können dann gesonderte Kalibrierversuche sinnvoll sein. In diesem Fall wird die Einschaltung eines sachverständigen Gutachters empfohlen. Hinweise zur Umrechnung der Nachrisszugfestigkeiten von 3-Punkt und 4-Punkt-Biegeversuchen sind in [48] angegeben.

### 5.11.3.3 Produktionskontrolle

Für Stahlfaserbetontübbinge gelten die Regelungen zur Produktionskontrolle gemäß DAfStB-RiL SFB [15], Teil 2, Anhang Q und Teil 3 zu DIN 1045-3, Anhang NB.

Wenn die Annahmekriterien für das Ergebnis der Nachrissbiegezugprüfung gemäß Tabelle NB.4 nicht erfüllt sind, sind die entsprechenden Tübbinge auszusondern und nicht einzubauen. Alternativ können vor dem Einbau der Tübbinge weitere Vergleichsprüfungen der Nachrissbiegezugfestigkeit an zusätzlichen Rückstellproben oder Probekörpern, die aus Bohrkernen gewonnen werden, herangezogen werden. Alternativ sind ggf. rechnerische Nachweise für die entsprechend der Prüfergebnisse reduzierte Leistungsklasse durchzuführen.

## 6 Baulicher Brandschutz

### 6.1 Einführung

Erfordernis, Art und Umfang des baulichen Brandschutzes für eine Tunnelauskleidung sind stets im Zusammenhang mit den betrieblichen Schutzmaßnahmen (zum Beispiel Verkehrsführung und -steuerung, Einfahrmöglichkeiten in Sicherheits-/Evakuierungszonen, Fluchtwegekonzeption, Branderkennung, Entrauchung, Lüftung, Zusammenwirkung mit Rettungskräften) sowie der Gefährdung des Tunnelbauwerks im Brandfall gemäß den einschlägigen Regelwerken zu betrachten und entsprechend festzulegen.

Als zentrale Schutzziele des baulichen Brandschutzes im Tunnelbau werden in den einschlägigen Regelwerken DIN EN 1992-1-2 [8], DIN EN 1363 [21], RiL 853 [1] und ZTV-ING [2] die Sicherstellung einer ausreichenden Standsicherheit und ggf. auch der Gebrauchstauglichkeit (Dichtigkeit, Begrenzung bleibender Verformungen) während und nach einem Brandereignis genannt. Gegebenenfalls ist auch die

ausreichende Tragfähigkeit für den Zustand einer anschließenden Sanierung zu beachten.

### 6.2 Einwirkungen

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

Für die Beschreibung der thermischen Einwirkungen werden üblicherweise Temperatur-Zeit-Kurven für das Brandgasgemisch definiert. Die **Abbildung 33** zeigt Temperatur-Zeit-Kurven einschlägiger Regelwerke.

Für deutsche Straßentunnel wird üblicherweise die ZTV-ING Kurve (1) angesetzt. Für deutsche Eisenbahntunnel findet in der Regel die EBA-Kurve (5) Anwendung, die der international gebräuchlicheren EUREKA-Kurve entspricht.

Die RWS-Kurve (2) entstammt dem niederländischen Regelwerk und wird sowohl für Straßen- als auch für Eisenbahntunnel angesetzt.

Nach hinten offene Kurven (z. B. RWS) müssen für die rechnerische Anwendung der Abkühlungsphase definiert werden. Dies ist projektspezifisch vorzuziehen. Bei fehlenden Vorgaben ist eine Abkühlung nicht schneller als gemäß den Vorgaben der Kurven für (1) und (5) zu empfehlen.

### 6.3 Möglichkeiten zur Gewährleistung des baulichen Brandschutzes

Beton platzt bei hoher Erwärmung ab; die Bewehrung und auch der Beton verlieren aufgrund einer übermäßigen Erwärmung an Festigkeit sowie Steifigkeit. Nach DIN EN 1992-1-2 [8], Tab. 3.2a, tritt bei kaltverformten Baustählen ab einer Erwärmung von 300 °C und bei warmgewalzten Baustählen ab einer Erwärmung von 400 °C eine Reduktion der Festigkeit auf. Wird ein Anstieg der Temperatur in der regulären Bewehrungslage über diese Werte ausgeschlossen, kann in der Regel auch nach dem Brand von einer ausreichenden Tragfähigkeit ausgegangen werden. Erreicht der Stahl höhere Temperaturen, sind die reduzierten Eigenschaften des Stahls gegebenenfalls zu berücksichtigen. Brandversuche haben gezeigt, dass die Segmente nach dem Brand auch bei höheren Temperaturen im Bewehrungsstahl ausreichend tragfähig bleiben können.

Zur Gewährleistung des baulichen Brandschutzes stehen die im Folgenden aufgeführten Maßnahmen zur Verfügung:

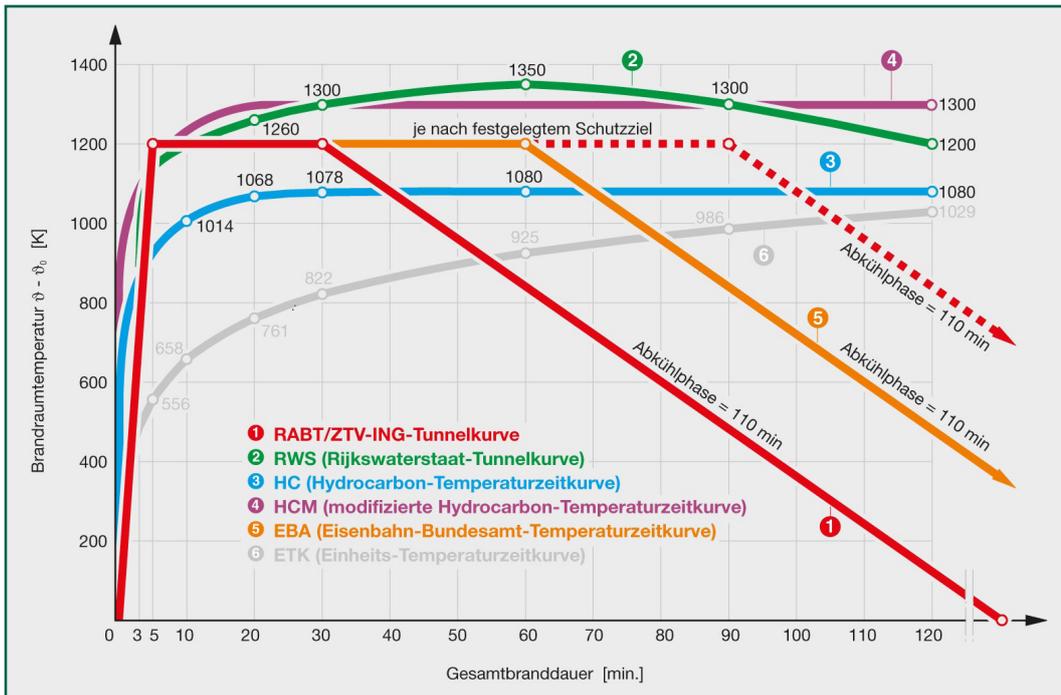


Abbildung 33  
Temperatur-Zeit-Kurven einschlägiger Regelwerke [54]

- Durch Bekleidungen mit Brandschutzplatten oder Brandschutzputzen, die wärmedämmend wirken, kann verhindert werden, dass Bewehrungslagen unverträglich erwärmt werden bzw. der Beton tiefgehend geschädigt wird.
- Durch Verwendung von Betonen mit hohem Brandwiderstand wirkt bei entsprechend kleinen Abplatzungen die verbleibende Betondeckung wärmedämmend für die Bewehrung und den sie umgebenden Beton. Ein erhöhter Brandwiderstand des Betons kann zum Beispiel mit einer optimierten Betonzusammensetzung mit Zugabe von PP-Fasern erreicht werden.

## 6.4 Brandschutzbekleidungen und Brandversuche

### 6.4.1 Brandschutzplatten

Bei einer Plattenbekleidung ist deren 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 wärmedämmenden Wirkung der Plattenbekleidung und der Tragfähigkeit der Befestigung sind Brandprüfungen erforderlich. Im Bereich von Tunnleinbauten müssen speziell angepasste Plattenbekleidungen vorgesehen werden.

Die Standzeit von Plattenbekleidungen ist begrenzt, sodass innerhalb der Nutzungsdauer des Tunnels die Bekleidung in der Regel erneuert wer-

den muss. Untersuchungen in [55] legen nahe, dass dies unter Umständen sogar mehrfach erfolgen muss. Besonderes Augenmerk ist auf die Befestigung der Brandschutzplatten unter dem Gesichtspunkt der Korrosionsbeständigkeit zu legen. Da Brandschutzplatten die darunter liegenden Betonflächen der Inspektion bzw. Bauwerksprüfung entziehen, kann ihre Anwendung durchaus kritisch gesehen werden.

### 6.4.2 Brandschutzputze

Brandschutzputze sind aufgrund ihres Fasergehaltes relativ weich und elastisch und wirken dadurch bedingt rissüberbrückend. Schädliche Risse im tragenden Beton können daher nicht auf die Putze übertragen und bei den regelmäßig durchzuführenden Bauwerksinspektionen dementsprechend nicht erkannt werden. Da Befestigungselemente für Beschilderungen, Tunnelleitsysteme etc., die schützende Putzbekleidung durchdringen müssen, werden in diesen Bereichen 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.

Wie bei Brandschutzplatten ist die Standzeit begrenzt. Dies ist einer der Gründe, warum sich Brandschutzputze bislang in der Praxis nicht durchgesetzt haben und in erster Linie als Sondermaßnahmen vorgesehen werden.

### 6.4.3 Beton mit hohem Brandwiderstand

In den letzten Jahren wurden zur Erhöhung des Brandwiderstandes und somit für einen ausreichenden baulichen Brandschutz dem Beton Polypropylenfasern (PP-Fasern) zugegeben. Diese Zugabe kann die Abplatzungen im Brandfall erheblich reduzieren und somit eine wärmedämmende Wirkung der Betondeckung erhalten. Dafür sollten mono- oder multifilamentale PP-Fasern mit rundem Querschnitt und glatter Oberfläche verwendet werden. Üblich sind Fasergehalte in der Größenordnung von 1,5 bis 2,0 kg/m<sup>3</sup>.

Aktuelle Erfahrungen mit optimierten Fasern haben gezeigt, dass auch geringere Fasergehalte bei gleicher Brandschutzwirkung verwendet werden können. Eine Möglichkeit, die Äquivalenz der dann verwendeten niedrigeren Fasergehalte nachzuweisen, besteht in der Durchführung von Vergleichsversuchen an Betonkörpern mit konventionellen PP-Fasern bei einem Fasergehalt von 2 kg/m<sup>3</sup>.

Der Nachweis des ausreichenden Brandwiderstandes ist durch großmaßstäbliche Brandversuche an einem repräsentativen Ausschnitt des Tunnelausbaus, durch rechnerische Standsicherheitsnachweise unter Berücksichtigung der im Brandfall zu erwartenden Abplatzungen – die im Regelfall aus Brandversuchen für die gewählte Betonrezeptur und Faserzugabe zu ermitteln sind – oder einer Kombination der beiden Möglichkeiten zu erbringen.

Bei Gewährleistung des baulichen Brandschutzes durch die tragende Konstruktion ergeben sich hinsichtlich der Bauwerksinspektionen und Erkennbarkeit von Rissen keine Einschränkungen. Der bauliche Brandschutz wirkt zeitlich unbegrenzt. Daher stellt der bauliche Brandschutz mit PP-Fasern derzeit den Regelfall dar.

### 6.4.4 Brandversuche

Zur Sicherstellung eines ausreichenden baulichen Brandschutzes sowie zur Ermittlung der tatsächlichen Abplatztiefen unter realen Bedingungen können vorlaufend Brandversuche an repräsentativen Ausschnitten der Tunnelschale durchgeführt werden.

In der Regel werden als Prüfkörper Tübbinge mit den Abmessungen und der Betonzusammensetzung wie im späteren Tunnel verwendet. Außerdem wird der prognostizierte Belastungszustand im Tübbing näherungsweise mit Hilfe von Horizontal- und Radial- bzw. Vertikalpressen eingestellt. Die Prüfkörper werden in einer Brandkammer mit dem anzusetzenden Temperatur-Zeitverlauf (vgl. **Kap. 6.2**) beaufschlagt. Bei kleineren Prüfkörpern und bei Prüfkörpern ohne Belastung können im Versuch deutlich geringere Abplatzungen auftreten, als sie in Wirklichkeit zu erwarten sind.

Ansonsten werden die Versuche in Anlehnung an DIN EN 1363 [21] Teile 1 und 2, sowie nach Schuck/Städling [53] durchgeführt.

Wenn die Tragfähigkeit im Großversuch erhalten bleibt, kann dies im Regelfall als Kriterium für einen ausreichenden baulichen Brandschutz angesehen werden. Für den kombinierten Nachweis von Versuch mit Berechnung können die im Versuch ermittelten Abplatzungen als Eingangswerte für die Berechnung herangezogen werden.

Empfehlenswert ist es, vorab zur Prüfung der Eignung der Betonrezeptur und zur Ermittlung einer indikativen Ist-Abplatztiefe Versuche mindestens als Kleinbrandversuche auszuführen. Die oben genannten Hinweise sind dabei zu beachten.

Projektspezifische Festlegungen werden empfohlen. Hierbei sind auch die erforderlichen Planungsvorläufe der Tübbingplanung einerseits und der Zeitbedarf zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Brandversuche andererseits zu berücksichtigen.

### 6.4.5 Fugen und Dichtigkeit

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die beim Brand entstehenden Heißgase in den Fugen aufgrund der begrenzten Spaltweite nicht zu einer kritischen Erwärmung einer außenliegenden Dichtung führen [47], [51]. Wenn es dagegen zu größeren Abplatzungen im Fugenbereich kommen sollte, dann könnte auch die Dichtigkeit des Bauwerks gefährdet werden. Bei realen Bränden, z. B. am Kanal-, Großer Belt- und Follo-Line Tunnel hat sich gezeigt, dass starke Abplatzungen gehäuft in der Tübbingmitte auftraten, wohingegen am Tübbingrand meist Stege verblieben sind oder höchstens vereinzelt sichtbare Schäden auch bis an die Tübbingfugen reichten [52], [51]. Somit kann davon ausgegangen werden, dass bei einer begrenzten Abplatztiefe auch ein ausreichender Schutz der Dichtungen in den Tübbingfugen vorliegt.

## 6.5 Rechnerische Untersuchungen

Die Tübbinge können mit Hilfe des allgemeinen Berechnungsverfahrens nach DIN EN-1992-1-2 [8] rechnerisch nachgewiesen werden. Dabei sind die folgenden Aspekte zu beachten.

Eine durch Brandversuche ermittelte, abgeschätzte oder vorgegebene Abplatztiefe ist in den thermischen und statischen Berechnungen zu berücksichtigen. Anhaltswerte für Abplatztiefen sind in der RiL 853 [1] enthalten. Auf der sicheren Seite liegend und aufgrund der in der Regel sehr früh auftretenden Abplatzungen erfolgt die rechnerische Annahme des Eintretens von Abplatzungen zum Zeitpunkt „Null“ der Berechnungen, d. h. unmittelbar zu Brandbeginn.

Mit einer vorangehenden thermischen Berechnung für die anzusetzende Brandtemperaturkurve werden die Temperaturverteilungen im Tübbingquerschnitt oder alternativ, sofern vorliegend, durch eine Auswertung von Temperaturmessungen in Brandversuchen ermittelt. Diese Temperaturverteilungen sind aufgrund ihres stark nichtlinearen Charakters für mehrere Zeitpunkte auszuwerten, die auch das Abklingen des Brandes bis in einen Zustand nach dem Brand berücksichtigen sollen. Für die thermischen Berechnungen können die temperaturabhängigen Parameter der DIN EN 1992-1-2 [8] verwendet werden.

Für die statische Berechnung kann das nichtlineare und temperaturabhängige Materialverhalten nach DIN EN 1992-1-2 [8] angesetzt werden. Es werden verschiedene Zeitpunkte des Brandes, für das Abklingen der Temperaturbelastung im Tübbing und für den Zustand nach dem Brand untersucht und jeweils die zuvor ermittelten Temperaturverteilungen im Querschnitt als Zwangsbelastung aufgebracht.

Die Belastungen sind aufgrund der temperaturabhängigen Steifigkeiten und Festigkeiten über die Zeit und die Querschnittshöhe sehr unterschiedlich, weswegen die Berechnung mit mehreren aufeinander aufbauenden Rechenschritten durchzuführen ist.

Die Zwangsbelastungen entstehen in den Tübbingringen einerseits in Umfangsrichtung aufgrund der behinderten Verformungen durch die Tunnelbettung, andererseits in Tunnellängsrichtung infolge der behinderten Ausdehnung entlang des Tunnels durch die benachbarten Ringe. Zur Erfassung der Zwängungen in Längsrichtung wird für den rechnerischen Nachweis des Brandfalls die Berechnung mit Schalenmodellen empfohlen.

## 7 Erdungsmaßnahmen in Tunneln

Aufgrund der Komplexität der Erdungsmaßnahmen sollte die Einbindung eines ausreichend qualifizierten und erfahrenen Elektroplaners frühzeitig im Rahmen der Rohbau- bzw. Entwurfsplanung stattfinden. Durch den Bauherrn sind eventuell Erdungsmaßnahmen in den Projektspezifikationen bzw. Ausschreibungen eindeutig zu benennen.

### 7.1 Bahntunnel

#### 7.1.1 Rückstromführung und Erdung bei Bahntunneln

Als normative Grundlage für den Eisenbahnbereich kann die EN 50122 [22] gesehen werden.

**Grundprinzip (Regelbetrieb):** Im Unterwerk wird der Strom in die Oberleitung eingespeist und vom

Verbraucher durch den Stromabnehmer entnommen. Der Bahnrückstrom muss anschließend wieder zur Einspeisequelle mittels Rückleitung zurückgeführt werden. Diese erweiterte Rückleitung nach EN 50122 [22] ist ein Teil des Bahnstromkreises und soll die durch den Boden zurückfließenden Ströme möglichst reduzieren. Elemente der Rückleitung können Fahr-schienen, Rückleiterstromschienen, Rückleiterseile usw. sein. Nachfolgend wird nur auf konventionelle Systeme mit Oberleitung bzw. Stromschiene zur Versorgung mit Traktionsenergie eingegangen.

Weiterhin ist die Rückleitung dadurch gekennzeichnet, dass bei Kontakt mit einem aktiven Teil der Leistungsschalter ausgelöst wird. Das bedeutet, dass im Fehlerfall beim Riss der Oberleitung ein Kurzschluss gewährleistet ist, um eine Abschaltung der Oberleitung aufgrund des hohen Stromflusses durch die niederohmige Verbindung zu erreichen.

Durch die Rückleitung mittels der Schienen ergibt sich zwischen den Schienen und der Umgebung (meist „Erde“, sprich Nullpotential) eine Potentialdifferenz, die eine Gefährdung für Menschen, Tiere und andere Objekte durch elektrischen Schlag darstellen kann. Zur Reduktion des Schienenpotentials wird die Bahnerde angewendet sowie möglichst viele Gleise und Rückleitungen verbunden. Die Erdung ist die elektrische Verbindung zwischen leitfähigen Teilen und einem im Kontakt mit der „Erde“ (Nullpotential) stehenden, leitfähigen Medium („Erder“).

Gleichzeitig kann es in jedem Betriebszustand zu Potentialdifferenzen – beispielsweise in Folge von induzierter Spannung in metallischen Bauteilen – kommen, die unverträglich für Menschen oder andere Bauteile sein können. Hierzu ist ein Potentialausgleich (leitende Verbindung) bzw. eine Bahnerdung erforderlich.

Elektrisch leitfähige Bauteile im Oberleitungsbe-reich – also dem Bereich, dessen Grenze ein gerissener Fahrdrabt oder ein gerissenes Längstragseil in der Regel nicht überschreitet, vgl. DIN 50122-1 [22] – sowie im Stromabnehmerbereich – dem Bereich, dessen Grenzen ein unter Spannung stehender Stromabnehmer auch bei Bruch oder Entgleisung in der Regel nicht überschreitet – sind zu erden.

Teilweise leitfähige Bauwerke (Stahlbeton) müssen nach DIN 50122-1 [22] Schutzmaßnahmen in Form des Anschlusses an die Rückleitung haben. Bauwerke ohne elektrisch durchgehende Bewehrung können beispielsweise folgende Vorkehrungen haben:

- Elektrische Verbindung zwischen den Bewehrungen aller Bauwerksteile und der Rückleitung,
- Installation von Leitern oder Maschen zur Verbindung aller Bauwerksteile,
- Verbindung einiger weniger Bauwerksteile mit der Rückleitung,

- Installation von Leitern zwischen den Bauwerksteilen, die mit der Rückleitung verbunden sind. Hierbei ist aber auf die Streustromproblematik bei Gleichstrombahnen nach DIN 50122-2 [22] zu achten.

Sind leitfähige oder teilweise leitfähige Bauteile vorhanden, die im Oberleitungsbereich liegen und die den Kurzschlussstrom für die Dauer der Schutzreaktion nicht tragen können, sind Prelleiter (als spezielle Form der Rückleitung) nach RiL 997.0223 [23] vorzusehen.

### 7.1.2 Wechselstrombahnen

Wechselstrombahnen sind alle 16,7 Hz/15 kV bzw. 50 Hz/25 kV Bahnen. In Deutschland ist das erstgenannte System im Fernverkehr sowie bis auf wenige Ausnahmen (S-Bahn Hamburg und Berlin) im öffentlichen Personennahverkehr gängig. U-Bahnen, z. B. U-Bahn Berlin, werden mit Gleichspannung von 750 V betrieben.

Die Erdung bei Wechselstrombahnen ist beispielsweise in RiL 997.0223 [23] geregelt. Für einschalig gedichtete Tunnel, meist in Form von Tübbingtunneln, sind

- eine Erdung zum Potentialausgleich mit dem Gebirge, sowie

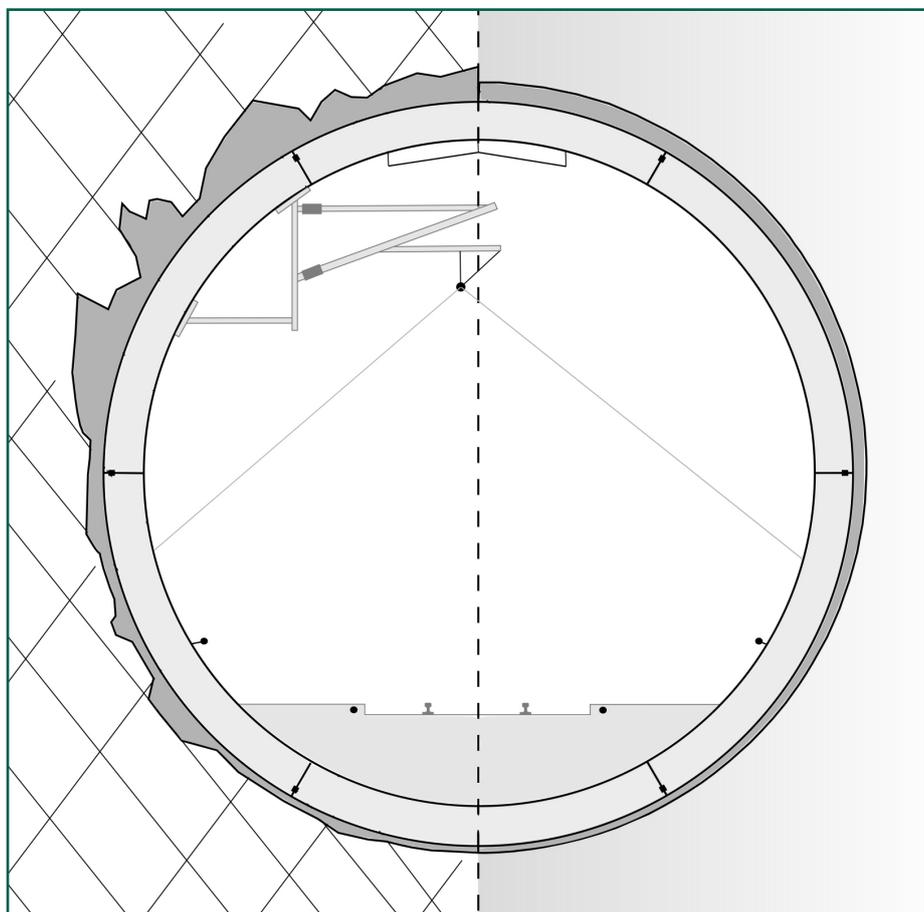
- Prelleiter zur Gewährleistung von Kurzschlüssen bei Kontakt des Tunnelbauwerks mit der gerissenen Oberleitung

zu berücksichtigen. Zusätzlich kann ein Rückleiterseil je Kettenwerk in Oberleitungsnähe zur Teilkompensation des Magnetfelds der Oberleitung und als Erd-sammelleitung zum einfachen Anschluss an bahnzu-erdende Teile der Oberleitung verwendet werden.

Grundsätzlich ist die schlaife Bewehrung bei Bauwerken aus Stahlbeton zum Potentialausgleich mit einer Rückleitung zu verbinden.

Bei den Prelleitern ist zwischen folgenden Anwendungen zu unterscheiden:

- Prelleiter in Höhe der Schienen zur Gewährleistung von Kurzschlüssen bei Fahrdratriss. Diese dienen zum Potentialausgleich für die Flucht- und Rettungswege als auch zum Schutz von Einbauten im Bankett. Werden Prelleiter im Bankett einbetoniert, ist eine maximale Betondeckung von 10 cm zulässig. Fahrschienen zählen auch zu dieser Art von Prelleitern.
- Prelleiter in halber Höhe zwischen gedachter Schnittlinie Oberleitungsbereich/Ulme und Flucht- bzw. Rettungswegebene.



**Abbildung 34**

Prelleiter im Rissbereich der Oberleitung (Bankette, Ulme, Gleis) sowie in der Firste im Bereich des Stromabnehmers in Form eines Seils

- **Hinweis:** Dies kann, sofern vorhanden, auch über einen entsprechenden Handlauf gewährleistet werden.

Die genannten Rückleiter sind über Blockfugen hinweg zu verbinden und alle ca. 250 m quer zu verbinden sowie an die Schienen anzuschließen.

### Besonderheiten bei Tübbingtunneln

Aufgrund der großen Anzahl an Einzelsegmenten beim Tübbingausbau hat sich die Verbindung der gesamten Bewehrung und somit aller Einzelsegmente zum Potentialausgleich als nicht praktikabel im Bau als auch in der Instandhaltung erwiesen. Hinzu kommt, dass aufgrund des direkten Kontakts der Segmente über das Ringspaltmaterial mit dem Baugrund, der Ausbreitwiderstand verglichen zu einer Abdichtung mittels KDB wesentlich niedriger bzw. die Erdfähigkeit (Güte der Erdung) höher ist und somit eine direkte Ableitung stattfindet.

Hierdurch ist auch die Anordnung von Streuerdern (Erder mit großen Längen in den Baugrund), z. B. im Bereich von Verbindungsbauwerken, bei Tübbingausbau häufig nicht erforderlich. Dies ist jedoch vor Projektbeginn mit dem Oberleitungsplaner unter Beachtung der im Einzelfall vorliegenden Randbedingungen abzustimmen. Auch sollten Versuche zur Bestimmung der Leitfähigkeit des Baugrunds im Rahmen der geotechnischen Erkundung bereits mit durchgeführt werden. Durch den Entfall der Möglichkeit von im Beton verlaufenden Prellleitern im Firstbereich wird oberhalb jeder Oberleitung ein innenliegendes Rückleiterseil in Zick-Zack-Anordnung ( $\pm 1,5$  bis 2 m) verlegt.

Auf Prellleiter im Bankettbereich kann aufgrund der hohen Spannungen bei vorhandenen Einbauten trotz der besseren Ableitung nicht verzichtet werden.

#### 7.1.3 Erdung und Potentialausgleich sonstiger elektrische Energieanlagen

Für Tunnel von Wechselstrombahnen sind neben der Bahnerdung auch Planungen des gesamten Erdungs- und Potentialausgleichsystems durchzuführen; hierzu siehe beispielsweise RiL 954.0101 [24] und RiL 954.0107 (speziell RiL 954.0107A01) [24]. Weitere Regelungen zu elektrotechnischen Einrichtungen des Notfallmanagements (z. B. Tunnelsicherheitsbeleuchtung und Elektranen) sind insbesondere in RiL 954.9107 [24] angeführt. Beispielhaft kann ein gesamtes Erdungskonzept dem Erdungshandbuch [25] entnommen werden.

#### 7.1.4 Gleichstrombahnen

Zur den Gleichstrombahnen (meist 600 V oder 750 V) zählen die meisten U-Bahnen, Straßenbahnen und im Sonderfall S-Bahnen (z. B. in Hamburg und Berlin). Diese unterscheiden sich beim Thema der Rückstrom-

führung und Erdung maßgebend von Wechselstrombahnen.

Als Rückstromführung der Traktionsenergie ist ausschließlich das Gleis oder eine Sammelschiene zu verwenden. Grund hierfür ist, dass Streuströme im Bereich von Gleichstrombahnen kritischer zu sehen sind als bei Wechselstrombahnen. Diese können zur Korrosion von metallischen Bauteilen führen. Regelungen hierzu sind in EN 50122-2 [22] enthalten. Bei allen Überlegungen zum Bauteilschutz geht jedoch der Schutz gegen elektrischen Schlag nach EN 50122-1 [22] in dieser Betrachtung immer vor.

Aufgrund der Streuströme ist die Rückleitung vom restlichen Tunnel isoliert auszuführen. Die geforderte Querverbindung aller Leiter (Potentialausgleiche) ist hier gemäß VDV 501-1, 2 [26] und DIN EN 50122-1, -2 [22] nicht zulässig.

Leitende, mit der Rückleitung in elektrischem Kontakt stehende Bauteile dürfen keine leitende Verbindung zu Bauteilen haben, die nicht gegen Erde isoliert sind. Ist eine Verbindung mit der Rückleitung zum Schutz gegen elektrischen Schlag unvermeidbar, müssen Maßnahmen nach EN 50122-2 [22] getroffen werden. Diese reichen von Spannungsbegrenzungseinrichtungen bis zur Isolation der Bewehrung des Bauwerks gegen Erde.

In DIN 50122-2 [22] sind Berechnungsbeispiele für die Abschätzung der Auswirkungen der Streustromkorrosion enthalten, jedoch wird aufgrund der Komplexität der Maßnahmen eine frühzeitige Einbindung eines Elektroplaners empfohlen.

## 7.2 Straßentunnel

Für Straßentunnel gilt in Bezug auf Blitz- und Überspannungsschutz die EABT-80/100 [27], wobei hierin auch der vorzunehmende Potentialausgleich innerhalb der Tunnelröhre beschrieben wird.

Bei Tübbingtunneln ist generell eine durchgehende Erdungsverbindung zwischen den einzelnen Segmenten aus diesen Regelungen nicht abzuleiten, und wird üblicherweise auch nicht ausgeführt.

Erdungen für den Anschluss von elektrotechnischen Installationen sind miteinander zu verbinden.

## 8 Dauerhaftigkeit

### 8.1 Anforderungen

Die Dauerhaftigkeit des Tunnelbauwerks setzt seine planmäßige Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit – unter angemessenem Instandhaltungsaufwand – über die gesamte Nutzungsdauer voraus. Für das

Tragsystem von Tübbingtunneln wird meist eine Lebensdauer von 100 Jahren vom Bauherrn vorgegeben.

Kontroll- und Instandhaltungsmöglichkeiten sind in der Regel nur in geringem Maße gegeben. Insbesondere können Änderungen am Betriebskonzept des Verkehrsträgers Anforderungen an den lichten Raum der Querschnitte verändern, die im Falle einer Instandsetzung dann zu berücksichtigen sind. Basierend auf den Life-Cycle Überlegungen werden jedoch in Anlehnung an DIN 31051 zunehmend Instandhaltungsstrategien entwickelt, um die Nutzungsdauer des Bauwerks zu verlängern. Der bei Bahntunneln vorgegebene bautechnische Nutzraum von 30 cm im Radius stellt eine gute Möglichkeit für spätere Instandsetzungen dar. Die erschwerten Kontroll- und Instandsetzungsmöglichkeiten gelten insbesondere für die nach Einbau nicht mehr zugänglichen erdberührten Flächen, Dichtungen und Seitenflächen. Gleiches gilt im Prinzip für Oberflächen, die beispielsweise durch Brandschutzbeplankung bedeckt sind. Dauerhaft erfüllt werden muss:

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

Die nachfolgenden Abschnitte beschränken sich dabei auf den Tübbingausbau mit Stahlbetontübbing. Bezüglich der besonderen Eigenschaften von Stahltübbing in Einbau, Korrosionsschutz, Übergängen usw. sei auf **Kap.10.2** und die weiterführende Literatur verwiesen. Die Dauerhaftigkeit der Fugenabdichtungen wird im **Kap. 4** behandelt. Bezüglich rechnerischer Nachweise der Dauerhaftigkeit wird auch auf **Kap. 5.10.1** verwiesen.

## 8.2 Alterungsmechanismen

Tübbinge sind einer fortwährenden Alterung aus beton- und stahlangreifenden Vorgängen ausgesetzt. Die Einzelmechanismen treten dabei meist in Kombination auf und können einander verstärken. Dazu gehören:

- Karbonatisierung der erdberührten Außenseiten bzw. der luftseitigen Flächen, welche dazu führt, dass die Bewehrung korrodiert,

- Sulfatangriff infolge sulfathaltiger Wässer bzw. sulfathaltigen Baugrunds mit lösender bzw. treibender Wirkung, welcher zu Sulfatkristallisation und Absanden der Oberfläche, Rissbildung und Abplatzungen an der Oberfläche, Rissen im Innern des Betongefüges und/oder Zerstörung des Betongefüges führt,
- Chloridangriff aus Tausalzen (zum Beispiel in Portalnähe), salzhaltigem Umgebungswasser, gegebenenfalls Brandeinwirkungen und dadurch ausgelöst Korrosion der Bewehrungsstähle,
- Mechanisch abrasive Verschleißbeanspruchungen der inneren Oberflächen und Kanten, auch unplanmäßiger Natur (z. B. auch durch Tunnelreinigungen),
- Unfälle mit oder ohne Brandentwicklungen, die zu partiellen bzw. bereichsweisen Schädigungen am Ausbau führen können,
- Degradationen aus thermischer Beanspruchung im klimatischen Wechsel wie Frost-Tau-Wechsel in Portalnähe,
- Kontaktkorrosion von Bewehrungsstahl mit Edelstahlbauteilen, u. a. bei einer dauerhaften Längverschraubung ist dies grundsätzlich möglich, in der Regel aber nicht von Bedeutung.

Unplanmäßige Rissbildungen und Abplatzungen aus Zwangswirkungen oder mechanischer Einwirkung wirken sich ungünstig auf die Alterungsvorgänge aus und sollten zu Gunsten eines geschlossenen Betongefüges mit geringer Porosität vermieden werden. Solche Fehlstellen können an Ecken, Kanten, den Ringfugenverzahnungen oder den Längsfugen auftreten. Mögliche Instandsetzungsmaßnahmen bei Abplatzungen bilden z. B. Oberflächenschutzsysteme und bei Rissen, abhängig von der Rissbreite und Art der Beanspruchung des Bauteils, Tränkungen und Injektionen mittels Epoxidharz, Polyurethan, Zementleim oder Zementsuspension.

Bei den für Tübbinge 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 chloridhaltigen Wässern mit für die Bewehrungskorrosion relevanter Chloridionenkonzentration auch merklich oberhalb klassischer Betondeckungswerte liegen, was im Tübbing-Design zu berücksichtigen ist.

## 8.3 Empfehlungen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit

Folgende Randbedingungen sind im Sinne einer verbesserten Dauerhaftigkeit für Tübbinge aus Stahlbe-

ton bzw. stahlfaserverstärktem Stahlbeton empfehlenswert:

- Ein robustes Design, bei dem nicht an die Grenze der Ausnutzung gegangen wird. Dazu gehören u. a.:
  - eine ausreichende Tübbingdicke,
  - eine ausreichende Breite der Kompressionsfugendichtung,
  - ein ausreichender Bewehrungsgehalt,
  - Verwendung eines normalfesten Betons an der oberen Grenze des Festigkeitsspektrums. 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 beim Einbau oder Transport sowie auch bei thermischen Einwirkungen 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, in der Regel 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 entmischem Oberflächenbeton).
- Einhalten von Ausschalfrieten.
- Schädigungsvermeidenden Transport, Lagerung und Einbau (Vermeiden von Rissbildungen und nachträglichen Instandsetzungen).
- Betondeckung gemäß Angabe in **Kap. 5.9.1**.
- Verwendung eines lagesicheren Bewehrungskorbs.
- 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 gemäß **Kap. 5.10.2**.

- Einbezug nachträglicher Einbauteile und Verankerungsanschlüsse (Verankerung von Leitungen, Einbauten, Elektrifizierung usw.) in die Planungen zur Dauerhaftigkeit.

- Verwendung weiterer Sonderkonstruktionen wie HD-PE-Betonschutzplatten, Polymermodifizierte Schutzschichten, Folien, etc.

## 8.4 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 darstellen, ist aber ansonsten unbedenklich.

Zur Verwendung von Stahlfasertübbing in aggressiver Umgebung (Expositionsklassen XS2, XD2, XS3, XD3) wird auf **Kap. 5.11.3** verwiesen.

## 9 Nachhaltigkeit, CO<sub>2</sub>-Bilanz

### 9.1 Einführung

Im Kampf gegen den Klimawandel wird in allen Bereichen eine Klimaneutralität und als Zwischenziel eine starke Einschränkung der Treibhausgas-Emissionen angestrebt. Um dieses Ziel zu erreichen, kann der Tunnelbau ein wichtiges Instrument sein, da nachhaltiges Bauen insbesondere auf Themen wie Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung setzt. Unterirdische Bauwerke schonen die Umwelt, da sie beispielsweise dazu beitragen, die Flächenversiegelung zu reduzieren und somit den Boden und das Grundwasser schützen, als Wärmespeicher oder als Schutzräume für Naturkatastrophen bzw. als Lagerstätten für Abfälle dienen.

Bei Tunnelbauwerken wird das Thema Nachhaltigkeit erst in den letzten Jahren verstärkt aufgegriffen und bearbeitet. Unterschiedliche Herangehensweisen und Bewertungen prägen dabei die Diskussion. Insbesondere bei der Bewertung von Tunnelbauwerken hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Zielgrößen, die die ökologische, ökonomische, soziokulturelle und funktionale Qualität des Bauwerks beschreiben, einzubeziehen.

Eine definierte und einheitliche Bewertungsgröße oder ein Bewertungsschema für Tunnelbauwerke existiert außerhalb der bisherigen öffentlichen Genehmigungsverfahren in der Praxis noch nicht. Aus diesem Grund konzentrieren sich aktuell die Diskussionen in der Regel auf die in der öffentlichen Wahrnehmung präzise „CO<sub>2</sub>-Emissionen“ bei der Herstellung der Bauwerke. Nicht weniger bedeutsam ist jedoch auch der Ressourceneinsatz. Primärressourcen sind mehrfach einzusetzen und zu schützen. Hier besitzt der Tunnelbau enorme Reserven, da er z. B. bereits heute Ausbruchmaterial so weit wie möglich wiederverwendet.

Im Tunnelbau werden aufgrund komplexer Boden-Bauwerks-Interaktionen und hoher Anforderungen an die Langlebigkeit der Konstruktionen beträchtliche Materialmengen verbraucht, deren Produktion mit ausgeprägten CO<sub>2</sub>-Emissionen und Ressourcenverbräuchen einhergeht. Hinzu kommen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Materiallogistik, die bei Streckenbauwerken zwangsläufig anfallen. Trotz dieser enormen Umweltwirkungen stehen ressourcenverbrauchsoptimierte und CO<sub>2</sub>-arme Bauweisen im Tunnelbau – und hier insbesondere im maschinellen Tunnelbau – bisher nur vereinzelt im Fokus.

Da das Thema Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung gewinnt, soll es erstmals in dieser Empfehlung adressiert werden. Die Empfehlung beschränkt sich hierbei auf die Minimierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Beurteilung der Nachhaltigkeit anhand weiterer Kriterien unter Beachtung des funktionalen Äquivalents (Funktionales Äquivalent = Technische Eigenschaften eines Bauwerks, die alle untersuchten Nachhaltigkeitsvarianten erfüllen müssen, z. B. Querschnittsgröße, Abstand Fluchtstollen, Rissweiten, etc.) ist jedoch dringend geboten. Für den Tübbing relevant sind in diesem Zusammenhang die anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Material, der Logistik und der Produktion.

Die Bewertung der Nachhaltigkeit erfolgt am gesamten Ingenieurbauwerk über den Lebenszyklus hinweg. Dies stellt eine vollständige Betrachtung sicher. In begründeten Fällen können jedoch auch funktionale Einheiten oder Bauteile aus dem Gesamtprojekt herausgelöst werden, sofern eine Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Bauvarianten gewährleistet ist. Die hier wiedergegebenen Empfehlungen sind daher stets am spezifischen Projekt zu hinterfragen und ggf. anzupassen. Insbesondere soziokulturelle Aspekte gewinnen in der Gesellschaft zunehmend an Bedeutung und fließen in der Frühphase der Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen mit ein. Hierzu zählt z. B. der Aspekt der Flächenversiegelung, die in urbanen Räumen gestoppt und durch grüne Zonen ersetzt wird. Häufig sind Tunnel die einzige Möglichkeit, die gewünschte Mobilität und Lebensqualität zu verbinden.

Insbesondere der maschinelle Tunnelbau mit seinem hohen Potential an Automatisierungslösungen im Hinblick auf Tübbingvorfertigung und Produktionsoptimierung ist eine Schlüsseltechnologie für moderne Verkehrsprojekte und deren nachhaltige Umsetzung.

## 9.2 Material

Weltweit werden Tübbinge mit CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. 700 bis 1000 kg CO<sub>2</sub>/(m<sup>3</sup> Tübbing) auf Basis von Portlandzementbetonen als Standard identifiziert. Projekte u. a. in Großbritannien verfolgen alternative Ansätze, verstärkt Portlandzemente durch Hochofenzemente zu ersetzen. Auch eine Substitution der Bewehrung durch Fasern stellt eine Möglichkeit dar, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren.

Eine signifikante CO<sub>2</sub>-Reduzierung durch Materialveränderung im Bereich des Zementes führt aber auch zu veränderten Herstellprozessen infolge längerer Ausschulfristen und veränderter Materialeigenschaften. Eine genaue Quantifizierung dieser Auswirkungen durch belastbare Erfahrungswerte ist momentan noch nicht möglich. Unbestritten ist allerdings, dass nur durch einschneidende Materialveränderungen der Betonzuschlagsstoffe bzw. deren Produktion eine CO<sub>2</sub>-Reduktion in nennenswerter Höhe erreicht werden kann. Die Reduktion bzw. Substitution der eingesetzten Portlandzemente ist dabei eine Möglichkeit, die in Projekten bereits in Betracht gezogen werden kann.

Dabei ist anzumerken, dass insbesondere die Wiederverwendung des Ausbruchmaterials, z. B. in der Betonproduktion, ein beträchtliches Potential für ein nachhaltiges Projekt hat und zukünftig als Teil der Kreislaufwirtschaft verstärkt genutzt werden sollte.

## 9.3 Logistik

Infolge notwendiger Transportprozesse auf Tunnelbaustellen entstehen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die, wenn möglich, begrenzt werden sollten. Eine lokale Tübbingproduktion unter Einbeziehung von Tunnelausbruchmaterial als Zuschlagsstoff würde z. B. zu einem geringeren Transportvolumen beitragen.

Die Betrachtung weiterer Emissionen aus dem Bauprozess kann ggf. relevant sein, um aus einer Auswahl mehrerer Bauvarianten die nachhaltigste identifizieren zu können: Mobilisierung, Demobilisierung, Gerätebetrieb, Geräteabnutzung.

## 9.4 Abschließende Überlegungen

Eine echte Alternative zur Nutzung von Beton im Tunnelbau besteht aktuell nicht. Zur Erhöhung der Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken können aber nicht

nur ein ressourcenschonenderer und CO<sub>2</sub>-Emissionen-minimierender Materialeinsatz beitragen. Beton hat eine hohe Dauerhaftigkeit. Eine materialgerechte Planung sowie eine möglichst lange Nutzung des Bauwerks (ggf. Umnutzung ermöglichen) tragen ebenfalls zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken bei. Aktuelle Materialentwicklungen zeigen das Potential neuartiger Betone auf.

Tunnelbauwerke adressieren viele weitere Aspekte der Nachhaltigkeit und sollten im Vergleich der Konstruktionen immer ganzheitlich betrachtet werden. Der DAUB hat sich entschieden, dem Thema einen breiteren Raum zu geben und im Rahmen eines Arbeitskreises „Nachhaltigkeit“ Empfehlungen für den Tunnelbau zu erarbeiten. Aktuell wurde ein Grundlagenpapier [60] verabschiedet, das alle wesentlichen Aspekte adressiert und als Teil der zukünftigen Empfehlung des DAUB den Rahmen vorgibt.

## 10 Sonderkonstruktionen – Querschläge, Stahltübbinge, Übergang offene Bauweise

### 10.1 Querschläge

#### 10.1.1 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 Pannenbuchten sowie Pumpensümpfen auf.

#### 10.1.2 Anordnung der Querschlagöffnung

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 des Tübbingtunnels liegen. Günstig ist, wenn die Höhen-

lage der Querschlagsachse in etwa mit der Höhenlage der Tunnelachse des Tübbingtunnels zusammenfällt.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Sondertübbingringe mit Stahltübbing im Querschlagsbereich vorzusehen oder Stahlbetontübbinge mit Regelgeometrie einzubauen, letztere allerdings häufig mit verstärkter Bewehrung und zusätzlichen Verschraubungen/Verdübelungen. Aus diesen Sondertübbingringen wird die Querschlagöffnung entnommen oder herausgesägt.

Werden Sondertübbingringe vorgesehen, ist es vorteilhaft, die Anordnung von Querschlägen im Bereich von Parallelringen mit einheitlicher Breite vorzusehen. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn im Bereich der Querschläge Einbauteile vorgesehen werden und die Ringstellung damit vorgegeben ist. Bei keilförmigen Ringen sind die Lage und Reihenfolge der Ringe vorab festzulegen bzw. einzuschränken. Der Schlussstein weist besondere geometrische Verhältnisse auf und wird zur Vereinfachung häufig auf der Gegenseite der Querschlagöffnung angeordnet. Um die Zahl von Sondertübbingungen zu reduzieren, ist eine spiegelbildliche Anordnung der Tübbinge im Querschlagsbereich in beiden Tunnelröhren anzustreben. Es ist zu beachten, dass dadurch in beiden Röhren im Bereich der Sondertübbinge 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 Vereisungslanzen bei der Ausbildung des Querschlags und der Tübbinge sowie etwaige auf den Tübbingtunnel wirkende Vereisungsdrücke in den statischen Nachweisen zu berücksichtigen.

#### 10.1.3 Abfangung der Tübbinge

Die Tübbingringe werden im Bereich der Querschlagöffnung bleibend unterbrochen. Die Normalkräfte werden im Endzustand in der Regel über einen Ortbetonrahmen oder einen Rahmen aus Stahltübbing abgetragen. Die in der Vergangenheit verwendeten Gusstübbinge sind nicht mehr gebräuchlich.

Da ein Ortbetonrahmen erst nach Ausbruch der Querschlagöffnung hergestellt werden kann, erfordert diese Lösung zusätzlich eine temporäre Abfangung der Tübbinge im Bauzustand. Diese kann durch Stahlringe, Profilträgerböcke oder Rahmen quer zur Tunnelachse erfolgen („Igel“). Möglich ist auch eine Verschraubung oder Verdübelung der Tübbinge in den Ringfugen mit Hilfe von speziellen Verbindungsstrukturen in den Betontübbingungen. Auch Kombinationen mehrerer Maßnahmen sind möglich, wobei in diesem Fall die realistische Aufteilung der Lasten auf die einzelnen Bauteile entsprechend der jeweiligen Steifigkeiten besonders beachtet werden muss.

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. Verbindungselemente zwischen den Tübbingringen, die dauerhaft statisch wirksam bleiben sollen, benötigen die entsprechenden Zulassungen dafür.

Wird der gesamte Kreuzungsbereich umlaufend 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 Tübbinge 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 eine Bettung nicht mehr vorhanden sind, wodurch das Tragsystem des Tübbingrings gestört ist, Asymmetrien aufweist und Transversalverschiebungen zwischen den Ringen auftreten. Diese müssen durch geeignete Maßnahmen auf ein verträgliches Maß reduziert werden. Es empfiehlt sich, ggf. vorhandene Wasserdrücke beidseitig der Tunnelröhre während der Bauphase so weit wie möglich zu reduzieren.

#### 10.1.4 Stahltübbingrahmen

In der Vergangenheit wurden im Bereich von Querschlägen häufig Stahltübbinge eingesetzt, die um die zu erstellende Querschlagöffnung herum zu einem steifen Rahmen miteinander verschraubt wurden (**Abbildung 37**). Da diese Lösung jedoch vergleichsweise teuer und als wenig nachhaltig anzusehen ist, haben sich in letzter Zeit alternative Lösungen durchgesetzt.

Sondertübbinge aus Stahl müssen die Ringbreite der Standardtübbinge haben, ggf. sind kleinere Tübbinge durch zusätzliche Sonderelemente zur vollen Ringbreite zu ergänzen. Die Verschraubung der Ring- und Längsfuge muss mit den Betontübbingkorrespondieren. Auch die Längsfugen sind auf die Betontübbinge abzustimmen. In Verlängerung der TBM-Pressen sind die Stahltübbinge entsprechend auszusteifen. Der Außendurchmesser der Sondertübbinge 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, vgl. **Kap. 6**. Für den Korrosionsschutz sind Beschichtungen, ein Dickenzuschlag bei der Blechstärke oder eine Betonummantelung gebräuchlich. Für den Brandschutz kommen Spezialputze, Brandschutzplatten oder eine Betonummantelung mit PP-Faserbeton in Frage. Um das Lichtraumprofil nicht einzuschränken, wird bei einer

Ausführung mit Betonummantelung und/oder Brandschutzplatten meist der Innendurchmesser der Sondertübbinge vergrößert (vgl. **Kap. 6**).

Bei Tunneln für elektrisch betriebene Bahnen sind für Stahltübbinge auch Fragen der Erdung und elektrischen Durchverbindung vorab zu klären.

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

Die Stahltübbingrahmen 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 Übergangsrahmens und der anstehenden Geologie abhängig.

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

#### 10.1.5 Verschraubung oder Verdübelung in den Ringfugen

Bei Anordnung von Sondertübbing lassen sich die Tübbinge oberhalb, unterhalb und neben der Querschlagöffnung in den Ringfugen kraftschlüssig verschrauben oder verdübeln (**Abbildung 35**). 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 Tübbinge 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 Betontübbinge üblicherweise besondere Vorkehrungen zu treffen und die Bewehrung entsprechend auszubilden. Die Belastung dieser Sondertübbinge 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. Letzteres bestimmt häufig die Grö-



**Abbildung 35** Sondertübbingring mit Dübel zur Querkraftübertragung (links) und Verschraubungslösung (rechts)

Bei der Tragfähigkeit und somit die Einsatzmöglichkeit einer solchen Konstruktion.

Für weitere Hinweise zur Koppelkraftübertragung wird auf **Kap. 5.7.11** verwiesen.

#### 10.1.6 Innenliegende Stahlkonstruktionen

Stahlrahmen um eine Querschlagöffnung werden in der Regel entweder innerhalb des Haupttunnelquerschnitts (**Abbildung 36**) oder in der Mittelfläche der Tübbingschale (vgl. **Kap. 10.1.4**) angeordnet.

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

#### 10.1.7 Ortbetonrahmen

Ortbetonrahmen am Übergang zwischen Tübbingtunnel und Querschlag werden häufig als endgültige Abfangung der Tübbingröhre verwendet. Maßgebend für die konstruktive Ausbildung ist die Höhenlage und Tübbingteilung der Haupttröhre 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 in den Querschlag geführt werden und die untere Konsole schwächen.

Für Stahl-tübbingrahmen dient der Ortbetonrahmen zusammen mit der Innenschale des Querschlags als unnachgiebige Bettung.

Beim zweischaligen Ausbau des Tübbingtunnels genügt oft die vorab hergestellte Ortbetoninnenschale mit Öffnungen als bauzeitliche und ggf. auch endgültige Abfangung der Tübbingröhre im Querschlagbereich.



**Abbildung 36** Stahlrahmenkonstruktion Katzenberg-Tunnel



**Abbildung 37** Stahl-tübbingring als Teil der Querschlag-abfangung

### 10.1.8 Querschlagöffnung herstellen

Meistens wird die Öffnung in der Tübbingröhre mit Hilfe von tangierenden Kernbohrungen und/oder Sägeschnitten entlang der Öffnungskontur realisiert. Es können aber auch Füllelemente verwendet werden, die die spätere Querschlagöffnung während des Vortriebs verschließen und die anschließend entfernt werden. Bei der Planung einer Querschlagöffnung ist bereits der Ausbau der Füllelemente zu berücksichtigen.

### 10.1.9 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 zusätzlicher Abdichtung mittels Kunststoffdichtungsbahnen (KDB).

Eine technische Möglichkeit des Abdichtungsanschlusses ist das Ankleben der Kunststoffdichtungsbahn des Querschlags auf die entsprechend vorbereitete Außenseite der Tübbingringe außerhalb der Querschlagöffnung. Auch Befestigungen mittels Los-Festflanschkonstruktionen kommen zum Einsatz.

Diese Lösungen haben bei Betontübbingden den Nachteil, dass die Tübbingaußenseite meist rau und in einer Richtung gewölbt ist und die Anschlusskonstruktion 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. Für weitere Details und Lösungsmöglichkeiten sei auf die Fachliteratur zum Thema verwiesen (siehe z. B. [61]).

Sind rund um die Querschlagöffnung Stahltübbinge angeordnet, so kann auch auf der Tübbingaußen- oder Stirnseite nachträglich ein Losflansch mit Fugenband oder ein abstehender Stahlflansch angebracht werden. Los- und Festflanschkonstruktionen können allgemein nur für Wasserdrücke bis ca. 3,5 bar eingesetzt werden.

Zwischen Haupttunnel und Querschlag sind im Allgemeinen Setzungsunterschiede möglich, die oft aber sehr klein sind. Die Dehnfuge zwischen Haupttunnel und Querschlag wird bei Ausbildung eines Stahlbetonrahmens vorteilhaft als Pressfuge zwischen diesem und dem Regelquerschnitt des Querschlags angeordnet.

### 10.1.10 Sicherheitsverschlüsse

Sicherheitsverschlüsse der Querschlagöffnungen gegen Wassereinbruch während der Bauzeit werden teilweise von Bauherren gefordert und sind sehr aufwändig. 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 selbst erzeugt. Ausgeführt wurden seitlich verschiebbare Notschotte oder oberhalb der Öffnung angeordnete Klapp- bzw. Falltore.

## 10.2 Stahltübbinge

### 10.2.1 Einführung

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

### 10.2.2 Ausbildung

Aus Walzblechen verschweißte Stahltübbinge bestehen in der Regel aus einem außen liegenden Mantelblech, welches die dichte Hülle des Tunnelausbaus bildet. Auf der Innenseite sind Stegbleche in Umfangs- und in Tunnellängsrichtung angeordnet, so dass eine Art Kassettentübbing 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, zum Beispiel aus den Pressenkräften der TBM. Bereichsweise können die Kassetten auch ab Werk mit schwindfreiem Beton gefüllt werden, um die Durchleitung von Druckkräften zu verbessern.

Sowohl in den Längsfugen als auch in den Ringfugen werden die Stahltübbinge 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 Stahlbetontübbinge durch Stahltübbinge ersetzt werden (siehe **Kap. 10.1.4**) oder der gesamte Ring kann aus Stahltübbingden ausgebildet werden.

### 10.2.3 Herstellung

Verfahrensbedingt ergeben sich bei der Herstellung der Stahltübbinge Randbedingungen, die bereits bei der Planung zu berücksichtigen sind.

Die einzelnen Bleche werden zunächst geschnitten und anschließend zu Tübbing zusammengeschweißt. Durch das Schweißen ergeben sich Spannungen und Verzug in den Blechen und den gesamten Tübbing. Daher wird die endgültige Außenkontur erst nach dem Schweißen durch Fräsen ausgebildet. Die Tübbinge 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 Tübbinge ausreichend maßhaltig sind und exakt zusammenpassen.

Bei der Wahl der Blechdicken müssen 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.

### 10.2.4 Einbau

Der Einbau von Stahltübbing stellt sich gegenüber dem Einbau von Stahlbetontübbing deutlich aufwändiger 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 Stahltübbinge mit dem Erektor sind meist spezielle Adapterplatten erforderlich.

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

### 10.2.5 Brandschutz

Um im Endzustand den Brandschutz zu gewährleisten, besteht die Möglichkeit, die Stahltübbinge etwas dünner als den Stahlbetonregeltübbing auszubilden und eine Beplankung mit Brandschutzplatten oder einen Brandschutzputz vorzusehen. Siehe auch **Kap. 6** (Brandschutz).

## 10.3 Übergang zu offenen Bauweisen

### 10.3.1 Einführung

Stationen, Portale und andere Sonderbauwerke werden in der Regel als Ortbetonkonstruktion in offener Bauweise 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 dauerhaft zugänglich und auswechselbar, oder ob diese in der Ortbetonkonstruktion integriert und nicht mehr zugänglich sein soll.

### 10.3.2 Auswechselbare Dichtungskonstruktionen

Dauerhaft zugängliche und auswechselbare Dichtungskonstruktionen lassen sich nur mit Hilfe einer Klemmkonstruktion und einem Omega-Fugenband bewerkstelligen. Hierzu sind aufwändige 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 aufwändig sind und in der Regel keine Verformungen zwischen Anschlussblock und Tübbingtunnel zu erwarten sind, wird meist darauf verzichtet.

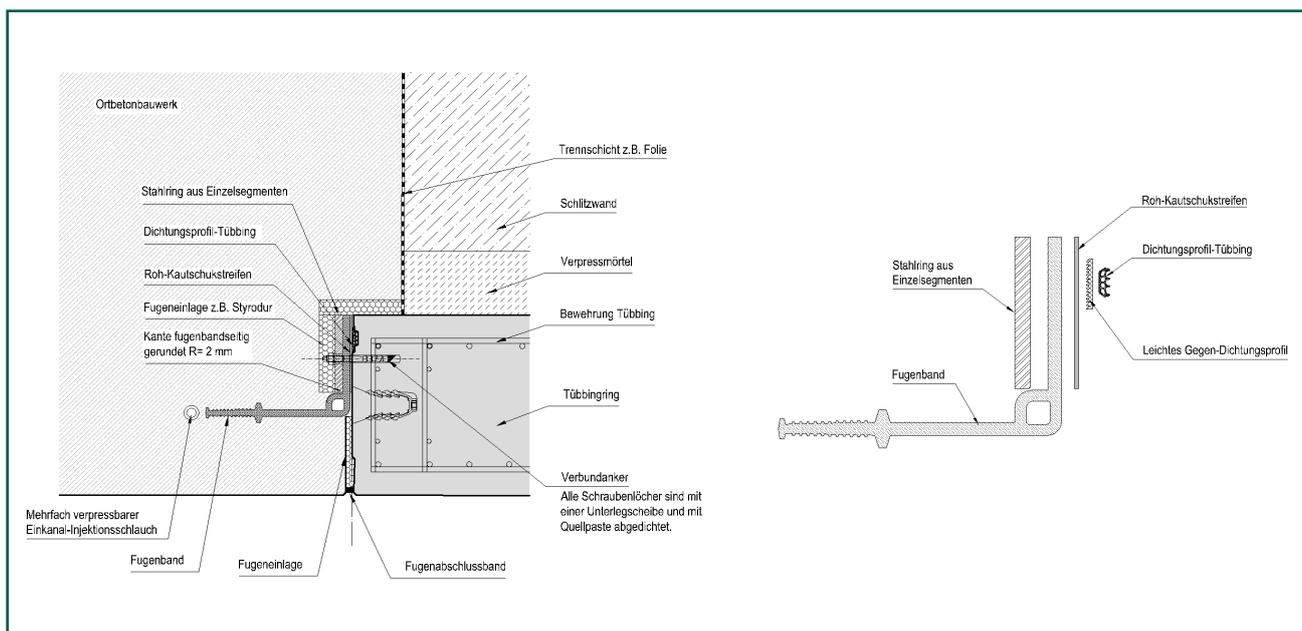
Aus brandschutztechnischen Gründen ist meistens das Fugenband mit Hilfe von geeigneten Brandschutzvorkehrungen (Brandschutzmatten) vor Brandeinwirkungen zu schützen.

### 10.3.3 Nicht auswechselbare Dichtungskonstruktionen

Weniger aufwändig sind Konstruktionen, bei denen ein Fugenband direkt in die Ortbetonkonstruktion einbindet (**Abbildung 38**). Auf der Seite des Tübbingausbaus sollte die Dichtungskonstruktion auf den Dichtungsrahmen des angrenzenden Tübbingringes geflanscht werden. Dabei hat es sich bewährt, zusätzlich eine umlaufende Einlage aus Rohkautschuk zwischen dem Tübbingdichtungsrahmen und dem Dichtflansch vorzusehen. 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 Abdichtungsbahn 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.

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



**Abbildung 38** Übergangskonstruktion mit Winkelfugenband und Rohkautschuklage (links) sowie Abfolge der Dichtelemente (rechts)

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

## 11 Tübbingherstellung und Einbau

### 11.1 Hinweise zur Herstellung von Tübbing im Fertigteilwerk

#### 11.1.1 Umlauf-/Standfertigung

In der Fertigung von Tübbing haben sich zwei Produktionsformen – Standfertigung und Umlaufanlage – etabliert.

Bei der Standfertigung werden die Tübbingschalungen fest an einem definierten Platz in der Produktionshalle aufgestellt. Dabei empfiehlt es sich, die Schalungen mittels eines Elastomerlagers von der Betonbodenplatte zu trennen, damit die Vibrationsenergie der Rüttler vollständig über den Schalboden in den frischen Beton eingetragen werden kann. Am Fundament fixierte Klammern verhindern ein Abheben der Schalung beim Ausheben des Tübbings. Bei dieser Produktionsweise werden alle Verbrauchsstoffe (Bewehrung, Einbauteile, Trennmittel, Beton) zur Schalung gebracht. Der Einbau des Betons kann über Kübel oder mittels direktem Auslass aus dem Fahrmiß erfolgen. Zur Optimierung der Erhärtung des Betons werden Heizleitungen unter den Schalungen ausgelegt. Diese Produktionsart sollte gewählt werden, wenn z. B.

- ein schneller Start der Produktion erforderlich ist,
- die Produktionsdauer kurz ist (1 – 1,5 Jahre),
- nur für ein einzelnes Projekt Tübbinge gefertigt werden müssen,
- der vorhandene Hallengrundriss nur diese Produktionsart zulässt.

Die Standfertigung zeigt sich in der Regel personalintensiver als die Umlauffertigung.

Bei der investitionsintensiveren Umlaufanlage werden die Schalungen auf Gleisen durch ein Antriebssystem bewegt. Dieses sollte durch frequenzgesteuerte Antriebstechnik die Schalungen möglichst ruckelfrei bewegen. Folgende Bereiche/Arbeitsschritte sind typisch für eine Umlaufanlagenfertigung:

- a) Arbeitslinie – hier werden alle erforderlichen Arbeitsschritte zum Ausschalen, Reinigen, Bewehren und Betonieren durchgeführt.
- b) Querverschub – die Schalungen werden auf einem Wagen alternierend auf die Linien des Härtetunnels verschoben.
- c) Härtetunnel (oft auch Wärmetunnel genannt) – die Schalungen werden vom Querverschubwagen in den Härtetunnel geschoben. Im Härtetunnel werden üblicherweise 3 Zonen mit unterschiedlichen Temperaturen angelegt.

- d) Querverschub – die Schalungen werden alternierend aus dem Härtetunnel auf den Querverschubwagen gezogen und zurück zur Arbeitslinie gebracht.

Bei Umlaufanlagen wird meist von einer Zykluszeit gesprochen. Diese beschreibt die Zeit, die pro Arbeitsstation inkl. der Verschubzeit bis zum Erreichen der nächsten Arbeitsposition benötigt wird.

Eine Umlaufanlage erlaubt in der Regel zwei vollständige Umläufe pro Arbeitstag. Das heißt jede Schalung wird pro Tag zwei Mal betoniert. Die Produktionsleistung wird hier üblicherweise durch die Anzahl der verfügbaren Schalsätze und die Aushärtezeit bestimmt.

Bei einer Standfertigung sind ebenfalls zwei Belegungen pro Arbeitstag möglich. Jedoch kann im Gegensatz zur Umlaufanlage die Anzahl der Schalsätze jederzeit erhöht und dadurch eine höhere Produktionsleistung erzielt werden.

### Automatisierung/Robotereinsatz

Bei beiden Produktionsformen sind Automatisierungsmöglichkeiten vorhanden, die sich bereits in der Praxis bewährt haben. Diese sind u. a.:

- Hydraulisch öffnende und schließende Schalungen: Hierdurch können der Zeit- und der Personalbedarf signifikant reduziert werden. Zudem ist durch die Anlagentechnik eine Fehlbedienung der Schalung ausgeschlossen.
- Roboter zum Reinigen der Schalung: Stationäre oder auf Lineareinheiten montierte Roboter reinigen schnell und sicher die Schalung und bereiten sie auf den nächsten Einsatz vor. Ebenso übernehmen diese Roboter auch das Ausblasen von Restbeton und das Einölen der Schalung.
- Roboter für das Oberflächenfinish: Stationäre oder auf Lineareinheiten montierte Roboter glätten die Oberfläche des frisch betonierten Tübbings.

Weitere Automatisierungsmöglichkeiten (vollautomatische Ausschallportale, semiautomatisierte Betoniereinrichtungen, Einsatz von bildverarbeitenden Kamerasystemen, etc.) sind ebenfalls möglich und bereits im Einsatz.

### 11.1.2 Beton: Herstellung und Überwachung

Die Festigkeitsklasse des Betons ist nach DIN EN 206 im Vorfeld zu definieren und spätestens zu einem vorgegebenen Zeitpunkt nachzuweisen. Gemäß ZTV-ING, Teil 7 Tunnelbau, Abschnitt 3, Ziffer 7.2.2.1 ist eine Mindestdruckfestigkeit für das Abheben von  $15 \text{ N/mm}^2$  gefordert. Bei verankerten Dichtrahmen wird zur Vermeidung des Herausziehens der Dichtung eine Mindestdruckfestigkeit von  $18 \text{ N/mm}^2$  emp-

fohlen. Sollte ein Ausschalen bei einer geringeren Druckfestigkeit geplant sein, so ist auch hierfür ein statischer Nachweis zu führen. Die Bedingungen der Tübbingproduktion (insbesondere die Art des Hebe- geräts) sind dabei zu berücksichtigen. Die Frühfestigkeit kann in der Regel erst am ausgehobenen Tübbing im Reifelager ermittelt werden. Eine Ermittlung der Frühfestigkeit, die einmal je Produktionsschicht empfohlen wird, erfolgt an der Tübbingoberfläche. Diese Werte liegen gegenüber den Festigkeiten im Kern auf der sicheren Seite.

Tübbinge erfahren oftmals durch eine Wärmebehandlung eine Abweichung gegenüber der normenkonformen Lagerung der Probekörper in Form einer erhöhten Temperatur während der Aushärtung. Der Nachweis der Festigkeit sollte daher ebenfalls an wärmebehandelten Probekörpern aus Stahlformen erbracht werden. Die Kerntemperatur des Tübbings soll eine Betontemperatur von  $55 \text{ °C}$  nicht überschreiten. Es wird eine Frischbetontemperatur zwischen  $18 \text{ °C}$  und  $25 \text{ °C}$  empfohlen. Frischbeton mit Temperaturen von über  $30 \text{ °C}$  sollte nicht verwendet werden.

Am fertigen Tübbing kann im Bedarfsfall mittels zerstörungsfreier Prüfung (z. B. Rückprallhammer) der Festigkeitsnachweis auf Grundlage der DIN EN 12504-2 erbracht werden.

Die Prüfungen zur Überwachung des Betons sind i. d. R. gem. DIN EN 206 und DIN EN 13369 durchzuführen.

Bei Faserbeton mit erhöhtem Brandschutz ist für die PP-Fasern die DIN EN 14889-2 heranzuziehen. Für die Bestimmung des Fasergehaltes wird auf die ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton“ und die ZTV-ING, Teil 7 Tunnelbau, Abschnitt 1, Anhang B verwiesen. Grundsätzliches zum baulichen Brandschutz findet sich in **Kap. 6**.

### 11.1.3 Bewehrung: Herstellung, Einbau, Lage-sicherheit

Es wird empfohlen, bei der Tübbingfertigung geschweißte Körbe zu verwenden, da sich hierdurch die Übergreifungs- und Verankerungslängen reduzieren lassen, was zu einer Verringerung des Bewehrungsgehaltes führt. Weiterhin ergibt sich eine erhöhte Maßhaltigkeit und eine verformungsarme Lagerungsmöglichkeit der Körbe. Auch teilgeschweißte Körbe sind möglich.

Für die Herstellung der geschweißten Körbe werden heute zunehmend Schweißroboter eingesetzt. Diese bieten den Vorteil einer hohen zeitlichen Verfügbarkeit und ermöglichen hinsichtlich der Qualitätssicherung eine Nachvollziehbarkeit bei den einzelnen Schweißverbindungen (Schweißdauer, Stromaufnahme). Zu beachten sind die hohen Anforderungen an die Lage der zu verschweißenden Kreuzungspunkte.

te, insbesondere bei Schweißungen am Gesamtkorb, damit diese eine Verschweißung überhaupt zulassen. Des Weiteren sind im Vorfeld bei der Bewehrungsplanung die aus der automatisierten Herstellung resultierenden Anforderungen aus Mindestabständen und Herstellertoleranzen abzustimmen und entsprechend zu berücksichtigen.

Bei der Herstellung der Bewehrung ist auch hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Tübbinge besonderes Augenmerk auf die Maßhaltigkeit zu legen. Bei einer statisch erforderlichen Kraftübertragung von Schweißverbindungen ist der jeweilige Scherfaktor (z. B. SF 50) für die betreffenden Verbindungen anzugeben. Die Einhaltung der Vorgaben ist in regelmäßigen Abständen nachzuweisen. Es sind nur Schweißer mit entsprechenden Befähigungsnachweisen gemäß EN ISO 17660 einzusetzen.

Es wird empfohlen, bei Schweißverbindungen von tragenden zu konstruktiv verschweißten Stäben maximal einen Durchmesserprung einzuhalten.

Für die Bewehrung ist schweißgeeigneter Betonstahl B500 B gemäß DIN EN 10080 zu verwenden.

Bei geschweißter Bewehrung ist die EN ISO 17660 -1, -2 (Schweißen von Betonstahl) anzuwenden.

Die Anzahl und Position der Betonabstandhalter sind in Abhängigkeit der Geometrie des Bewehrungskorbes zu wählen. Bei leichten und labilen Körben ist die Anzahl der Abstandhalter zu erhöhen (auch abweichend von der Norm).

In der Tübbingproduktion haben sich punktförmige Abstandhalter aus Gieß- oder Faserbeton bewährt, die auf den Kreuzungspunkten der Matten montiert werden. Abstandhalter aus Kunststoff werden vom Auftraggeber oft nicht zugelassen.

Im Zuge der Qualitätssicherung ist besonderes Augenmerk auf die Kontrolle der Betondeckung zu legen. Dafür haben sich zerstörungsfreie Messmethoden bewährt. Es empfiehlt sich, die anzuwendende Messmethode zwischen den Vertragspartnern vorab abzustimmen.

#### 11.1.4 Bewehrung: Verwendung von Stahlfasern

Neben der Bewehrung der Tübbinge mit konventionellem Bewehrungsstahl werden auch Stahlfasern eingesetzt. Die Stahlfasern müssen nach der DIN EN 14889 zertifiziert sein.

Gemäß DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [15] legt der Planer im Rahmen der Bemessung die Leistungsklasse des Stahlfaserbetons fest, siehe hierzu auch **Kap. 5.11**. Die Betonzusammensetzung einschließlich Faserart und -menge wird durch den Hersteller des Stahlfaserbetons festgelegt. Die erforderliche äquivalente Biegezugfestigkeit wird anhand von Vorversuchen, gemäß Anforderung aus DIN EN 12390-1, mit der avisierten Betonrezeptur und verschiedenen Stahlfasergehalten bestätigt. Es werden Gesteinskör-

nungen mit einem Größtkorn von 16 mm beim Rundkorn und 22 mm bei gebrochenem Korn empfohlen. Die Länge der Stahlfasern sollte das 1,5-fache des Größtkorns nicht unterschreiten. Je höher der angestrebte Fasergehalt ist, desto geringer sollte der Anteil an groben Gesteinskörnungen sein.

Die Zugabe der Stahlfasern zur Frischbetonmischung erfolgt in der Regel über eine Dosieranlage mit Vibrationseinrichtung zur Vereinzelung der Fasern. Diese wird mit Stahlfasern aus Big-Bags befüllt. Damit es nicht bereits im Vorfeld zu einem feuchtigkeitsbedingten Zusammenkleben der Faserpakete kommt, sollten diese Anlagen eingehaust und vor feuchter Witterung geschützt installiert werden. Die gewünschte Zugabemenge je Charge in kg wird auf dem Wäginstrument oder im Mischcomputer eingestellt. Die Fasern werden zu den Zuschlagstoffen auf den Abzugsbändern, in den Schrägaufzugkübel, in den Wägebehälter oder direkt in den Mischer zugegeben. Eine Vermischung der Faser mit Gesteinskörnung vor Bindemittelzugabe begünstigt das Aufbrechen der Faserpakete und trägt zur Verringerung der Igelbildung im Frischbeton bei.

Die Einhaltung einer Mindestmischdauer in der Mischanlage je Charge nach Zugabe aller Stoffe wird wie folgt empfohlen:

- bei besonders guter Mischwirkung (Doppelwellenzwangsmischer, Tellermischer mit Wirbler): eine Minute,
- bei allen anderen Betonmischem: zwei Minuten.

Auch eine Zugabe in den Fahrmischer ist möglich. Bei einer möglichst kontinuierlichen Zugabe der Fasern und höchster Umdrehung der Trommel wird eine Mischzeit von mindestens fünf Minuten nach Zugabe der Stahlfasern empfohlen. Die Mischzeit je Kubikmeter Frischbeton in der Trommel sollte dabei nicht unter einer Minute liegen.

Die exakte Menge ( $\pm 1-2$  % Abweichung) an Stahlfasern wird über eine Negativverwägung ermittelt.

Während der Produktion sollten folgende Tests in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden:

- Festigkeitsbestimmung am Biegebalken,
- Auswaschversuch,
- Probekörper zur Ermittlung der Faserverteilung im Querschnitt,
- Rückstellproben.

Der Einfluss der Stahlfaserzugabe auf das Verdichtungsverhalten des Tübbingbetons beim Vibrieren ist vernachlässigbar. Ein übermäßiges Verdichten ist zu vermeiden, da es sonst zu einer ungleichmäßigen Stahlfaserverteilung kommen kann.

Um neben dem Fasergehalt auch die Verteilung und Ausrichtung der Fasern zu ermitteln, wurde als

zerstörungsfreier Test die „Inductive Method“ [20] entwickelt.

### 11.1.5 Betonieren: Rütteln, Verdichten, Nachbehandlung

Bei der Betonage und dem Verdichten von Tübbing sind zwei Prozesse zu berücksichtigen:

- Einbau und Verteilen des Betons: Durch die gegebene Form und die vorhandenen Deckel muss der Beton in der Regel zentral in der Schalung eingebaut und dann durch die Rüttelenergie in alle Bereiche, insbesondere die Ecken transportiert werden.
- Füllen der Schalung und Verdichten (Entlüften) des Betons: Lagenweises Einfüllen des Betons bei hoher Verdichtungsenergie und Entlüften.

Bei den meisten Tübbingschalungen kommen Außenrüttler zum Einsatz. Diese werden an der Unterseite des Schalbodens angebracht. Ein Anbringen der Außenrüttler an den Seitenschalungen wird nicht empfohlen, da dies zu Toleranzüberschreitungen in der Tübbingbreite führt. Üblicherweise werden Druckluftfrüttler eingesetzt. Es hat sich gezeigt, dass diese Rüttler für die beiden obigen Prozesse ausreichend geeignet und schonend für die Konstruktion der Stahlschalung sind. Bei Tübbing mit großer Länge und großer Dicke ( $>0,5$  m) werden häufig Elektrorüttler eingesetzt, da durch die steuerbare Verdichtungsfrequenz ein gezieltes Verteilen und Verdichten auch bei diesen großen Abmessungen möglich ist.

Die Verdichtungsrüttler sollten stets in Gruppen ansteuerbar sein, damit eine optimale Verdichtung des Betons in allen Bereichen und Füllzuständen möglich ist.

Rüttelzeit und Intensität sollten stets vom Betonmeister aufgezeichnet werden.

Der Einsatz von Rütteltischen ist ebenfalls möglich, jedoch bislang nur sehr selten ausgeführt.

### Nachbehandlung

Der Tübbingbeton ist mindestens so lange nachzubehandeln, bis die Würfeldruckfestigkeit des Betons mindestens 60 % der mittleren Würfeldruckfestigkeit der Konformitätsprüfung beträgt oder eine Würfeldruckfestigkeit von  $30 \text{ N/mm}^2$  überschreitet, wobei der höhere Wert maßgebend ist.

Sollten Nachbehandlungsmittel zum Einsatz gelangen, ist hinsichtlich der Wirksamkeit auf einen ausreichend hohen Sperrkoeffizienten zu achten. Die Verträglichkeit mit einer evtl. nachfolgenden Beschichtung ist zu untersuchen.

Der junge Tübbing ist gegen eine zu rasche Abkühlung zu schützen; die Abkühlgeschwindigkeit an der Oberfläche sollte max.  $10 \text{ K/h}$  betragen. Bei der Auslagerung ins Freilager sollte die Temperaturdiffe-

renz zwischen Oberfläche und Umgebungstemperatur maximal  $25 \text{ K}$  betragen.

### 11.1.6 Ausschalen

Nach dem Erreichen der Ausschalfestigkeit kann der Tübbing aus der Schalung ausgehoben werden. Bevorzugt wird hierbei das Verwenden einer Vakuumsaugplatte. Diese ermöglicht ein schonendes und sicheres Ausschalen und Transportieren.

Kran und Vakuumsaugplatte sind so zu konstruieren, dass ein Ausheben des Tübbings erst nach vollständigem Erreichen des Vakuums möglich ist. Neben den konstruktiven Sicherheitsfaktoren muss die Saugplatte auch einen Test bestehen, der einen Stromausfall und somit einen Stopp der Vakuumpumpe simuliert. Gemäß DIN EN 16191 Tunnelbaumaschinen ist hier ein Halten des Vakuums von mindestens 20 Minuten nach Ausfall der Energieversorgung bzw. Ausfall der Vakuumpumpe nachzuweisen.

Zusätzliche Sicherheit bieten Anbringmöglichkeiten von Gurten oder der Einsatz von Sicherheitsarmen, die nach dem Ausschalen unter den Tübbing greifen und somit ein Herunterfallen verhindern.

Bei der Dimensionierung der Vakuumsaugplatte und des Ausschalkrans sollte stets die Abhebekraft addiert werden. Diese zusätzliche Kraft entsteht meist durch ein Anhaften des Tübbings an der Schalung. In der Regel sollte mindestens 30 % des Gesamtgewichts aus Tübbing und Hebegerät addiert werden. Gemäß DIN EN 13155:2020 müssen Vakuumsaugheber so bemessen sein, dass sie am Ende des Arbeitsbereichs bzw. am Anfang des Gefahrenbereiches noch mindestens die 2-fache Tragfähigkeit halten.

Beim Einsatz einer Vakuumsaugplatte muss der Einsatzort bereits in der Konstruktionsphase des Gerätes berücksichtigt werden. So sind z. B. bei einer Verwendung in geographisch höher gelegenen Produktionsstätten zusätzliche Sicherheiten einzurechnen.

Eine Reduzierung der Saugfläche ist bei der Dimensionierung dann zu bedenken, wenn die Saugfläche durch das Abdecken von Einbauteilen, z. B. Ankerschienen, weiter eingeschränkt wird.

Es sollte auch Augenmerk auf die Ebenheit der Außenfläche (Bergseite) gelegt werden. Größere lokale Absätze verhindern den Aufbau des Vakuums und beeinträchtigen dadurch die Funktionsfähigkeit und/oder reduzieren die Sicherheit.

### Mechanische Greifsysteme

Bei kleineren Tübbing, in der Regel bei einem Segmentgewicht von unter  $4 \text{ t}$ , können auch mechanische Greifer eingesetzt werden. Hierfür werden die Seitenschalungen etwas weiter geöffnet und der Greifer klemmt das Segment zwischen Gummi oder Kunststoff-Pratzen. Als Zentrierung für das Greifersystem werden oft die Dübelöffnungen in der Ring-

fuge verwendet. Das Ausheben hingegen geschieht durch reine Reibkraft und ist somit durch die zur Verfügung stehende Fläche und die Betondruckfestigkeit limitiert.

Vorteilhaft bei diesem System ist die Integrierung einer einfachen Wendeeinrichtung. Somit kann der Tübbing, falls erforderlich, gleich nach dem Ausschalen in die spätere Einbaulage gewendet werden.

### 11.1.7 Ausrüstung

Für alle Einbauteile des Tübbings sind die Toleranzvorgaben zu beachten und laufend zu kontrollieren.

Bei den wesentlichen Ausrüstungsteilen, wie z. B. dem Dichtungsrahmen sind besonders hohe Anforderungen an die Beschaffenheit des Betonkörpers zu stellen. So ist auf die maßhaltige Herstellung der Dichtungsnut und deren Lunkerfreiheit vor der Dichtungsmontage zu achten. Nutquerende Risse müssen, sofern diese zugelassen sind, vorher instandgesetzt werden.

Für eine zuverlässige Verklebung der Dichtung in der Nut ist vor dem Auftrag des Klebers die Nut mit einer harten Bürste auszubürsten und mit ölfreier Druckluft auszublasen. Für die Erzielung einer gleichmäßigen Fixierung des Dichtrahmens ist der Einsatz eines Pressrahmens zu empfehlen.

Bei der Verwendung von verankerten Dichtrahmen ist zu empfehlen, in wiederkehrenden Zeitabständen an Ausschusstübbingen Abschnitte der Dichtung zu entfernen, um eine Information über die Beschaffenheit (vor allem das Vorhandensein von Lunkern) der verdeckten Bereiche zu erhalten.

Sollte der Einsatz von Fugenzwischenlagen geplant sein, ist auf einen gleichmäßigen Kleberauftrag zu achten; der Einsatz selbstklebender Zwischenlagen ist zu empfehlen. Die eingesetzten Materialien müssen für einen ausreichend langen Lagerungszeitraum der Tübbinge unempfindlich gegen Witterungseinflüsse sein oder sollten andernfalls erst zu einem späteren Zeitpunkt aufgebracht werden. Selbstklebende Kunststoffplatten stellen eine gute Alternative zu den meist aus quellfähigen Holzwerkstoffen bestehenden Zwischenlagen dar.

Aktuell nimmt der Anteil an Baustellen zu, die beim Tübbingausbau gänzlich auf die Verwendung von Zwischenlagen verzichten. Eine Erhöhung von Fehlstellen, die auf die fehlenden Zwischenlagen zurückzuführen sind, ist wenn überhaupt, nur in geringem Umfang zu beobachten.

Bei der Verwendung von Führungsstäben (Guiding Rods) in den Längsfugen ist eine werksseitige Montage mit Pins statt Kleber zu bevorzugen. Pins sind kleine Ankernägel, die in der Stirnschalung befestigt und dann in das Segment einbetoniert werden. Nach dem Ausschalen kann man den Guiding Rod, der be-

reits Löcher für die Pins hat, dann an diesen befestigen. Das Kleben entfällt.

Im Falle von innenseitig einbetonierten Ankerschienen sind für Vakuumhebergeräte der Innenseite entsprechende Vorkehrungen, z. B. Abdecken der Ankerschiene innerhalb der Saugschale mittels Schaumstoffpad, für einen sicheren Vakuumaufbau zu treffen.

### 11.1.8 Vermessung

Zur Feststellung der Einhaltung der Herstelltoleranzen sind zusätzlich zu den notwendigen Messungen am Einzeltübbing auch Messungen am kompletten Tübbingring sinnvoll. Im Bauvertrag sollte der Messort vorgegeben werden.

#### Probering, virtueller Testring und virtueller Ringbau

Häufig wird nach der Herstellung des ersten Schalsatzes ein Probeabguss gemacht und hieraus ein einlagiger oder doppelter Probering gebaut. Der Probering sollte ohne die EPDM-Dichtung aufgebaut werden, da sich die Dichtung nicht durch die Verschraubung oder das Verspannen des Rings komprimieren lässt. Nach dem Aufbau wird der Ring vermessen (Innendurchmesser, Außenumfang). Weitere Dimensionen können nur bedingt oder gar nicht geprüft werden.

Die Toleranzwerte (siehe **Kap. 3.5.2**) gelten für Messungen am jungen Tübbing. Bei der Kontrollmessung sind Bauteil- und Umgebungstemperatur festzuhalten und bei der Auswertung der Messergebnisse zu berücksichtigen.

Alternativ und deutlich aussagefähiger ist die Erstellung eines virtuellen Teststrings. Hierbei können die Vermessungsdaten der Schalung oder auch eines Tübbings verwendet und virtuell zu einem Ring zusammengesetzt werden. Hier lassen sich exakt Abweichungen am Ring erkennen. Zudem können auch aus mehreren Schalsätzen die Messergebnisse verwendet und zu mehreren Ringen zusammengesetzt werden. Auch die Erfassung und Auswertung der Lage der Einbauteile ist möglich.

Der virtuelle Ringbau kann auch eingesetzt werden, um hergestellte und vermessene Tübbingsegmente mit Toleranzabweichungen zu einbaubaren Tübbingringen zusammenzustellen.

#### Schalung vor dem ersten Einsatz

Der Schalungsbauer erstellt bei der Herstellung der Schalung ein 3D-Zertifikat für die Werksabnahme. Nach dem Transport und dem Aufbau auf der Baustelle bzw. im Fertigteilwerk sollte erneut eine 3D-Vermessung durchgeführt werden. Grundsätzlich sollte seitens des Schalungsherstellers konstruktiv eine Möglichkeit der Nachjustierbarkeit vorgesehen werden.

### Häufigkeiten

Nach der Erstvermessung auf der Baustelle bzw. im Fertigteilwerk sollten die Tübbinge in regelmäßigen Abständen vermessen werden. Eine erneute Schalungsvermessung sollte nur dann durchgeführt werden, wenn sich bei der Tübbingvermessung größere Abweichungen mehrfach zeigen. Die Messintervalle nach 1, 5, 50 und dann nach allen weiteren 100–250 Schalungsbelegungen haben sich als praktikabel erwiesen. Wenn bei einer Messung Herstellungstoleranzen überschritten sind, sollten die betroffenen Tübbinge stichpunktartig rückschreitend bis zur letzten Messung mit eingehaltenen Toleranzen nachgemessen werden. Die Tübbinge mit Toleranzüberschreitung müssen gesondert betrachtet werden.

### Art der Vermessung

Verschiedene Messdienstleister bieten 3D-Laser-Tracker Vermessungen an. Die Art der Messung (Geräte, Anzahl der Messpunkte, etc.) und Auswerte-Software ist nicht standardisiert. Unterschiedliche Mess- und Auswertetechniken haben Einfluss auf die Messergebnisse. Es sollte vor Beginn der Schalungs- und Tübbingherstellung ein von allen Parteien akzeptiertes Messregime festgelegt werden.

### Stangenmikrometer, Schablonen

Während der Produktion ist ein regelmäßiger Schnell-Check der Segmentlänge in der Schalung durch Stangenmikrometer sinnvoll. Diagonalen können mittels Präzisionsbandmaß geprüft werden. Diese Messmethoden genügen nicht dem Anspruch einer 3D-Vermessung, dennoch lässt sich schnell eine etwaige Abweichung erkennen. Schlagmarken im Stoßbereich der Seitenschalungen geben Auskunft darüber, ob die Schalung richtig geschlossen ist.

Zusätzlich können 3D-Schablonen eingesetzt werden, die lokal die Abweichungen der Seiten und Stirnschalungen mittels Messfühler ermitteln können. Da diese Ergebnisse aber keine Aussage im geometrischen Raum erlauben, verzichten heutzutage Tübbingproduzenten auf diese Schablonen und verwenden bevorzugt die 3D-Laser-Tracker Methode.

### 11.1.9 Transport und Lagerung

Während des Produktionsprozesses werden Tübbinge bereits in frühem Betonalter mehrfach bewegt. Schonende Verfahren wie z. B. der Einsatz von Vakuumhebern haben sich in der Vergangenheit bewährt. Auch mit Gummipuffern versehene Greifer sind in der Lage, die jungen Fertigteile schadensfrei zu bewegen.

Beim Einsatz von mechanischen Tübbingzangen oder Staplergabeln sind zur Vermeidung von Abplatzungen Vorkehrungen zu treffen. Entsprechend sind

z. B. nachgiebige Auflagen oder Polyamid-Auflager zu verwenden.

Die Ränder und Kanten der zu bewegendes Tübbinge sind lastfrei zu halten. Entsprechende Randabstände der Lastaufnahmeplätze bei den Hebegevätern sind vorzusehen.

Um die Dichtung nicht zu beschädigen, sollte die Lagerung von Tübbing mit Dichtrahmen in der Regel liegend erfolgen. Tübbinge ohne Dichtrahmen können auch auf der Ringfuge stehend gelagert werden.

Bei gestapelten Tübbing ist neben einem ausreichend tragfähigen Untergrund darauf zu achten, dass die Lagerblöcke des Stapels möglichst exakt übereinander angeordnet sind. Eine Verlegesablone oder Markierungen am Tübbing sind hierbei hilfreich. Bei größeren Segmenten und höherer Stapelung wird eine 3-Punkt Lagerung empfohlen.

### 11.1.10 Dokumentationen bei Herstellung

Zur eindeutigen Identifikation eines Tübbings wird ein Negativabdruck in der Schalung eingeschweißt, üblicherweise auf dem Schalboden. In der Regel werden der Schalungstyp und die Satznummer in den Beton geprägt. Es sind aber auch auswechselbare Matrizen einsetzbar, die auch das Produktionsdatum und die Seriennummer des Segmentes enthalten.

### Zentrale Datenbank

Grundsätzlich empfiehlt sich ein Data-Management-System. Kernstück des Systems ist ein zentraler Rechner/Server, auf dem alle Produktionsdaten gesammelt und ausgewertet werden können. Moderne Management Systeme arbeiten hier mit Echtzeitdaten.

### Dokumentation Produktionsschritte

Die Dokumentation der einzelnen Prozessschritte erfolgt mittels eines Scanners mit Bedienoberfläche. Der Verantwortliche loggt sich mit Namen oder Kennung ein und wählt den Prozessschritt, der dokumentiert werden soll, beispielsweise beim Einlegen des Bewehrungskorbes. Hier wird zuerst die Schalung gescannt (mittels Strich- oder QR-Code) und dann der Code am Bewehrungskorb. Das System kontrolliert, ob der richtige Korb gewählt wurde und dokumentiert den Einbau. Schalung bzw. das entstehende Betonsegment und Bewehrungskorb werden hierdurch verbunden. Ein anderes Beispiel ist die Dokumentation des Prozessschritts „Ausschalen“. Beim Ausschalen wird die Schalung gescannt und dadurch wird der Ausschalzeitpunkt und so das Betonalter beim Ausschalen dokumentiert. Nach dem Ausschalen erhält der Tübbing einen oder mehrere Barcode-Aufkleber, die neben der Seriennummer auch das Produktionsdatum beinhalten.

### Dokumentation Abnahme-Prozesse

Nach dem Ausschalen werden die jungen Tübbinge einer Qualitätsprüfung unterzogen. Mit Unterstützung des aufgeklebten Barcodes können Schäden dokumentiert werden, ebenso die Reparatur des Schadens. Zugehörige Fotos werden ebenfalls diesem Datensatz angehängt.

Die Messergebnisse aus den Routinemessungen können über die auf dem Barcode enthaltene Seriennummer dem Tübbing eindeutig zugeordnet werden.

Sollten Segmente nicht den Qualitätsanforderungen entsprechen, können sie systemtechnisch auch für den Einbau im Tunnel gesperrt werden.

### Dokumentation Beton-Chargen mit Bauteilzuordnung

Zur eindeutigen Nachverfolgbarkeit müssen die verwendeten Betonchargen den jeweiligen Tübbing zugeordnet werden. Hierfür sollten die Daten der Mischanlage bzw. der jeweiligen Liefercharge über die Seriennummer dem Segment zugeordnet werden. In manchen Fällen ist es auch hilfreich, wenn auf dem Betonlieferschein ein individueller Strichcode oder QR-Code abgedruckt ist, der dann an der Einbaustelle mit der Schalung und somit mit der Seriennummer des Tübbings verbunden werden kann.

### Ein- und Auslagerungszeitpunkt

Durch das Sammeln der Produktionsdaten und dem Verwenden einer Segment-Identifikationsnummer können das Auslagern des Segments aus der Halle und das Einlagern im Außenlager dokumentiert werden. Dadurch wird auch eine Prüfung des Betonalters vorgenommen und nur Tübbinge, welche das entsprechende Alter erreicht haben, werden zur Auslieferung freigegeben.

Eine einfache Lagerhaltung ist mit einem Black-Box-Lager möglich. Hier wird nur der Ein- und Ausgang der Segmente im Lager dokumentiert.

Es sind jedoch auch komplexere Lagerhaltungsprogramme verfügbar, die neben Ein- und Auslagerzeitpunkt auch den Lagerort und die Stapelung dokumentieren. Der Kranbediener erhält hier auch Angaben über den als nächstes auszulagernden Stapel nach dem Prinzip First-in/First-out oder nach der entsprechenden Kranposition, um unnötige und lange Kranfahrwege zu vermeiden.

Unverzichtbar sind diese Lagerhaltungsprogramme, wenn viele unterschiedliche Segment- bzw. Ringtypen vorhanden sind, beispielweise Ringe mit unterschiedlicher Bewehrung oder Betongüte.

### Einbau im Tunnel mit Ringnummer, Ringstellung und Positionszuordnung

Die Segment-ID auf dem Barcode kann in Verbindung mit einem Scanner auch beim Ringbau im Tunnel ge-

nutzt werden. Ringnummer, Ringstellung etc. können in Verbindung mit geologischen, hydrologischen und Vortriebsmaschinen Daten kombiniert und im digitalen Bauwerksbuch festgehalten werden.

Auch bei späteren Schäden können diese Daten von hohem Interesse sein.

Die Aufnahme der Daten kann auch automatisiert durch an der Erektorsaugplatte befestigte Lesegeräte durchgeführt werden. Gleiches gilt für alle Transportmittel (Zangen, Krane, MSV etc.).

### Tracking RFID-Tags

Neben den aufklebbaren Barcodes werden auch RFID-Tags (diese werden hierfür meist in Plastikschilder integriert) verwendet, die dauerhaft im Beton, sichtbar auf der Tübbinginnenseite, verankert werden können. Der Vorteil ist hier, dass auch zu einem späteren Zeitpunkt eine Segmentidentifikation mittels Lesegerät möglich ist. Hierdurch kann auch eine einfache Verbindung zur Datenbank und der Segment- bzw. Tunnelhistorie hergestellt werden.

Das Identifizieren einzelner Tübbingsegmente durch Auslesen der RFID-Tags ist im Tunnel in der Regel nur dann möglich, wenn man sich im Nahbereich des jeweiligen Segmentes befindet. Für das Auslesen der Tags an Tübbing in der Tunnelrinne wird in einem solchen Fall der Einsatz einer Arbeitsbühne erforderlich.

## 11.2 Tunnelvortrieb und Ringbau

Ein Tunnelbauhandbuch gemäß ZTV-ING, Teil 7, Abschnitt 3 beschreibt die Vortriebsarbeiten samt Ringbau. Zur Aufnahme in dieses als Leitfaden dienende Dokument werden nachfolgend Ausführungsempfehlungen gegeben. Üblicherweise erfolgt der Ringbau nach kompletter Fertigstellung des Vortriebs und Erreichen der für den Ringbau erforderlichen Pressenausführung. Neue Entwicklungen zeigen, dass bei entsprechender Ausrüstung der TBM mit verlängertem Schildschwanz und Vortriebspresen auch ein Einbau der Segmente während des Vortriebs möglich ist. Dabei werden während des Vortriebs einzelne Vortriebspresen zurückgezogen und ein neues Segment eingebaut. Die neben dem neu einzubauenden Segment liegenden Tübbinge werden dabei auf diesen Zustand mit erhöhten Pressenkräften und fehlender seitlichen Bettung bemessen.

### 11.2.1 Ringtyp und Ringbauposition

Die Wahl des einzubauenden Ringtyps (beispielsweise Regelring, Links-/Rechtsring, Sonderring mit Einbauteilen etc.) basiert auf der Projektplanung und dem jeweiligen Vortriebsstand der TBM. Von der TBM aus wird eine Bestellung an das Zwischenlager ausgelöst, von wo aus die entsprechenden Segmente verladen

und angeliefert werden. Beim Einsatz der Hebezeuge und bei der Beladung der jeweiligen Transportfahrzeuge ist durchgängig auf die richtige Stapelfolge der Segmente zu achten. Beim Transport im Tunnel und beim Abladen auf den Segmentfeeder der TBM sind die Segmente in der für den Ringbau erforderlichen Reihenfolge zu platzieren, was aufgrund der beengten Platzverhältnisse mit erhöhter Vorsicht geschehen sollte.

Die zulässigen Ringbaufolgen und Ringstellungen sind im Rahmen der Projektplanung zu definieren. Der Tunnelausbau folgt grundsätzlich der Tunnelbohrmaschine, welche wiederum der Vortriebstrasse folgt. Damit die Tübbingröhre der Tunneltrasse folgen und auch Steuerbewegungen ausgleichen kann, sind die Ringe in der Regel konisch ausgebildet und werden verdreht gegeneinander eingebaut. Bei der Bauausführung wird die optimale Ring- bzw. Schlusssteinposition in der Regel durch die automatische Ringfolgeberechnung der Navigationssoftware der TBM vorgeschlagen. Hierbei finden die Parameter Soll-Vortriebstrasse, TBM-Ist-Position und -Ab-lage, Pressenvorlaufdifferenzen sowie die Luftmaße zwischen letztgebautem Ring und Schildschwanz Berücksichtigung. Die endgültige Entscheidung über die einzubauende Ringposition trifft in der Regel der verantwortliche Schichtingenieur.

### 11.2.2 Ringbau

Vor Beginn des Ringbaus soll der Schildschwanz soweit gereinigt sein, dass ein sicherer und einwandfreier Ringbau erfolgen kann. Weiterhin ist sicherzustellen, dass insbesondere an den Kontaktbereichen zwischen den Tübbing, an den Dichtungen und auch im Kontaktbereich zwischen Tübbing und Erektor keine Verschmutzungen vorhanden sind. Bei der Verwendung von Vakuumsaugplatten müssen die Eingriffslöcher des Erektors von Wasser und Eis frei sein. Außerdem ist zu prüfen, ob die Vakuumwirkung in Zusammenhang mit der Meereshöhe am Einsatzort ausreichend ist.

Beim Ringbau ist darauf zu achten, dass die Tübbinge schwebend mit ausreichend Schildschwanzluft eingebaut werden und nicht am Schildschwanz oder auf der Abweisleiste anliegen. Der Tübbing soll versatzfrei in Längs- und Ringfuge eingebaut werden. Kollisionen mit Nachbartübbing sind zu vermeiden.

Markierungen auf der Tübbinginnenseite im Bereich der Ringfugen, z. B. in Form von Kerben, erweisen sich hierbei als hilfreich. Ebenso haben sich Zentrierhilfen aus Kunststoff in den Längs- und insbesondere in den Ringfugen in der Praxis bewährt (siehe **Kap. 3.3**).

Weiter ist zu beachten, dass der Ringspiegel der pressenzugewandten Ringfuge eben ist, um punktuellen Zwangsbeanspruchungen und damit Rissbil-

dungen oder Betonabplatzungen vorzubeugen. Einen guten Indikator für die Ebenheit der Ringfuge stellen die Vorlaufmaße der Vortriebspresen dar, aus denen sich die Ebenheit durch einen Überkreuzvergleich errechnen lässt.

Um ein Verziehen der Dichtungen in den Längsfugen zu verhindern, können die Dichtrahmen in der Längsfuge mit einem dauerhaft für diese verträglichen Material vor dem Einbau eingeseift werden. Dabei ist zu verhindern, dass Schmiermittel auf die Beton-Kontaktflächen gelangt, insbesondere beim Schlussstein. Das Zusammenfahren der Tübbinge in der Längsfuge sollte so weit wie möglich ohne Kontakt der Dichtrahmen zueinander erfolgen.

#### Komprimierung in der Längsfuge

Der Erektor muss in jeglicher Ringstellung ausreichend stark sein, die Rückstellkraft des Dichtprofils zu überdrücken. Die Verschraubung durch die Längsfuge muss anschließend ein Aufatmen des Dichtprofils verhindern.

Die temporäre Verschraubung in der Längsfuge kann erst ausgebaut werden, wenn das umgebende Ringspaltverfüllmaterial in der Lage ist, die für die Komprimierung des Dichtungsprofils minimale Flächen-spannung in das Gebirge zu übertragen.

Der früheste Zeitpunkt zum Ausbau der Verschraubung ist folglich abhängig von der Festigkeitsentwicklung des Ringspaltverfüllmaterials und nicht abhängig von der je Zeiteinheit aufgefahrenen Vortriebsstrecke.

#### Komprimierung in der Ringfuge

In der Regel übersteigt der Vortriebspresendruck den Ringbaudruck. Deshalb ist es erforderlich, bei der Verwendung von Tübbingschrauben diese während des folgenden Vortriebshubes nachzuziehen. Bei der Verwendung von Steckbolzen ist sicherzustellen, dass die aufgebrachten Kräfte ausreichend groß sind, damit der Dübel einrastet.

Der Ringspiegel des zuletzt gebauten Ringes sollte bei der Ausführung regelmäßig, maximal jeden 10. Ring, aufgemessen und Abweichungen von der Ebene ermittelt werden. Abweichungen von der idealen Ebene von ca. 1–2 mm können – insbesondere bei ausreichend weichen Fugeneinlagen – häufig noch durch den Ringbau ausgeglichen werden; bei stärkeren Abweichungen sind besondere Maßnahmen zur Erzeugung der idealen Ebene der Ringfuge erforderlich. Das früher übliche Einlegen von Zwischenlagen hat sich nur bedingt bewährt, da der vergrößerte Fugenspalt zu Problemen der Dichtigkeit führen kann, falls die Dichtprofile hierauf nicht ausgelegt sind; diese Maßnahme sollte daher nur als Notlösung zur Anwendung kommen und nicht den Regelfall darstellen.

### Schlusssteineinbau

Von Beginn des Ringbaus an ist auf einen maßhaltigen Einbau zu achten. In Abhängigkeit der Größe des Schlusssteins empfiehlt sich die Verwendung von Schablonen.

Der Schlusssteineinbau muss zur Vermeidung von Schäden zwängungsfrei erfolgen, jedoch sollte das Einbaumaß auch nicht zu groß sein. Von einer Verwendung von Schmierseife lediglich auf den Dichtrahmen zur Unterstützung des zwängungsfreien Einsatzes ist umso mehr abzuraten, je größer die Gefahr ist, dass der Schlussstein nach innen rutschen kann. Maßgeblichen Einfluss hierauf hat die radiale Neigung der Längsfuge. Die Gefahr des Herausrutschens des keilförmigen Schlusssteins ohne Ringfugenverschraubung nach hinten wird umso größer, je kleiner der Schlussstein und je größer der Winkel der Längsfugenkonizität sind.

### 11.2.3 Vortrieb

#### Lage der Vortriebspresen

Bei der Lage der Vortriebspresen auf den Tübbing ist insbesondere auf die Positionierung und Ausrichtung der Pressenschuhe in tangentialer und radialer Richtung zu achten. Die im Vorfeld definierten zulässigen Vorgaben für etwaige Verrollungen zwischen Tübbingring und Schild bzw. Pressenschuh sind zu beachten. Gleiches gilt für die im Rahmen der Planung berücksichtigten radialen Ausmitten der Pressenschuhe. Rechtzeitig vor Erreichen der maximal zulässigen Verrollung sind Gegenmaßnahmen einzuleiten, um den Lasteintrag der Vortriebspresenkräfte in den dafür vorgesehenen Kontaktflächenbereichen der Ringfugen weiterhin sicherzustellen.

Üblicherweise wird die maximale Verrollung auf etwa 2° begrenzt. Mit entsprechend erhöhtem Aufwand beim Vortrieb kann eine Begrenzung auch auf ca. 1° realisiert werden.

Bei Einzelpresen ist darauf zu achten, dass der Pressenschuh nicht verdreht auf die Tübbingfugen aufgesetzt wird.

Für den Ringbau-Regelbetrieb ist darauf zu achten, dass niemals alle an einem einzelnen Tübbing anliegenden Vortriebspresen gleichzeitig abgezogen werden.

#### Vorschub und Ringspaltverpressung

Mit der Wiederaufnahme des Vortriebs nach erfolgtem Ringbau erfahren die letztgebauten Ringe zuerst Beanspruchungen aus den Vortriebspresenkräften in Tunnellängsrichtung und danach zusätzlich durch die Ringspaltverpressung von außen in radialer Richtung. Die Ringspaltverpressung ist Teil der Ringspaltverfüllung (Definition aus RiL 853.4006). Die Ringspaltverpressung hat beim Vortrieb kontinuierlich zu erfolgen

und ist so zu steuern, dass die Bettung des Ringes, der den Schildschwanz verlässt, schnellstmöglich sichergestellt werden kann.

Bei der Ringspaltverpressung ist darauf zu achten, dass es nicht zu übermäßigen Ringverformungen und auch nicht zu einem Aufschwimmen der Tunnelröhre kommt. Die Rezeptur des Ringspaltverfüllmaterials und auch die maschinentechnische Steuerung der Ringspaltverpressung sind daraufhin entsprechend auszulegen.

Erfahrungsgemäß kommt es zu den größten Verformungen des Tübbingausbaus in der frühen Phase nach erfolgtem Ringbau bis zum Abbinden der Ringspaltverfüllung mit Sicherstellung der Tübbingbettung. Da gerade aus größeren Ringverformungen Zwangsbeanspruchungen resultieren können, ist insbesondere zu Projektbeginn zu empfehlen, den Bereich der letztgebauten Ringe zur Dokumentation des Systemverhaltens einzumessen. Bewährt haben sich neben Konvergenzmessungen zusätzliche Fugenversatz- und Fugenöffnungsmessungen während der ersten 3 bis 5 Vortriebe nach erfolgtem Ringbau. Des Weiteren sind Firstnivelements hilfreich, um etwaige Aufschwimmeffekte messtechnisch schnell erfassen zu können.

## 11.3 Tübbingschäden und Instandsetzung

### 11.3.1 Mögliche Tübbingschäden

Viele Ursachen für mögliche Tübbingschäden sind bekannt und sollten daher bereits in der Entwurfs- und Planungsphase und später bei der Herstellung und in der Einbau-/Ausführungsphase Berücksichtigung finden.

In der Entwurfs- und Planungsphase ist auf ein robustes Tübbingdesign zu achten, u. a.

- im Hinblick auf die Tübbinggeometrie (z. B. spitzwinklige Ecken), auf die Positionierung von Einbauteilen (z. B. Dichtrahmen zu nah an der Tübbingaußenseite), auf die Belastung (z. B. unnötig hohe Rückstellkraft des Dichtrahmens), auf die Bewehrungsführung (z. B. im Bereich von Schraubentaschen, Einbauteilen).

Bei der Tübbingherstellung

- ist u. a. die Maßhaltigkeit regelmäßig zu prüfen, um z. B. Lastspitzen beim Tübbing infolge Toleranzüberschreitungen zu vermeiden,
- ist auf die Vermeidung von Lunkern zu achten,
- ist die Nut für den Dichtrahmen bei Erfordernis nachzuarbeiten,
- sind Fehlstellen nachzuarbeiten, wenn das zulässige Maß überschritten ist,

- ist darauf zu achten, den Dichtrahmen in den Ecken nicht zu überdehnen.

In der Einbau-/Ausführungsphase kann u. a.

- durch entsprechendes Monitoring (Mörteldruck, Mörtelvolumen, Kontrollbohrungen) eine unzureichende Bettung mit damit einhergehender Ringverformung/Ovalisierung und daraus resultierenden Rissen, Abplatzungen, Undichtigkeiten und Versätzen verhindert werden,
- durch entsprechende regelmäßige Kontrollen der Abmessung der Tübbingzwischenlagen das Risiko von Tübbingschäden reduziert werden,
- durch eine regelmäßige Kontrolle des Ringspiegels eine Rissbildung wegen Hohl- oder Sattellage benachbarter Tübbinge vermieden werden.

### 11.3.2 Schadenskatalog

Für die Tübbingherstellung ist, wie auch in ZTV-ING, Teil 7, Abschnitt 3 gefordert, ein Schadenskatalog zu erstellen, in dem unterschiedliche Schadenskategorien und -szenarien sowie der jeweilige Umgang mit diesen eindeutig dargelegt werden. Es sind Definitionen zulässiger sowie instandsetzbarer und nicht instandsetzbarer Schäden zu erstellen. Bei Beschädigungen ist zumindest zu unterscheiden nach Nestern, Lunkern, Rissen, Abplatzungen, Schäden an Betonkontaktflächen und/oder an der Dichtungsnut sowie Beschädigungen an Einbauteilen.

Des Weiteren sind Instandsetzungsmöglichkeiten, -prozeduren und -materialien festzulegen. Hierbei sind die Anforderungen aus ZTV-ING, Teil 3, Abschnitte 4 und 5 zu beachten.

Zusätzlich sind Vorgaben für den Umgang mit möglichen Schäden aus den Phasen Transport, Ringbau und Vortrieb zu erstellen.

### 11.3.3 Ursachenanalyse

Treten Schäden am Tübbingausbau auf, so gilt es mit Hilfe einer Ursachenanalyse festzustellen, ob es sich um ein singuläres Ereignis oder ein systematisches Problem handelt. Eine Ursachenanalyse kann nur dann erfolgreich sein, wenn sie auf einer hinreichenden Datenbasis beruht. Dazu empfiehlt es sich, eine umfassende Dokumentation zum Tübbingausbau zu führen.

Neben der Herstellungshistorie empfiehlt sich bei der Ursachenanalyse insbesondere die Beanspruchungs- und die Verformungshistorie hinsichtlich etwaiger Auffälligkeiten detailliert auszuwerten.

TBM-Datenmanagementsysteme ermöglichen die Herstellung einer Verknüpfung von TBM-Daten und Angaben zum Tübbingausbau, um auf diese Weise die ingenieurmäßige Ursachenanalyse zu Tübbingschäden zu unterstützen.

### 11.3.4 Abnahmen, Instandsetzung

Zusätzlich zur Abnahme nach Ankunft der Tübbinge auf der Baustelle sind diese auch vor und nach dem Einbau auf etwaige Beschädigungen hin zu überprüfen und abzunehmen. Auf der Baustelle und im Tunnel betrifft dieses insbesondere die Beton-Kontaktflächen, die Tübbingecken sowie die Bereiche der Tübbingdichtungen.

Für die Erfassung der Segmente in allen Phasen und auch zur Dokumentation etwaiger Instandsetzungsmaßnahmen inklusive sämtlicher Abnahmen und Freigaben empfiehlt sich der Einsatz von Scannern und einer Tracking-Software, mit der diese Informationen direkt in das Datenmanagementsystem exportiert werden können, siehe hierzu auch **Kap. 11.1.10**.

Werden Beschädigungen noch vor dem Einbau festgestellt, ist zu prüfen, ob die betroffenen Segmente eingebaut oder instandgesetzt werden können bzw. ausgetauscht werden müssen. Segmente, die die Ausführungsanforderungen nicht erfüllen, dürfen nicht eingebaut werden.

Wird während der Vortriebsarbeiten oder beim Ringbau ein Schaden an einem Tübbing festgestellt, muss entschieden werden, ob baubetriebsbedingt, maschinentechnisch und basierend auf den vorab im Instandsetzungskonzept definierten Schadenskriterien dieses Segment rückgebaut und ausgetauscht werden kann. Bei einer Instandsetzung sind die Vorgaben und Anforderungen aus dem Instandsetzungskonzept einzuhalten und die Umsetzung entsprechend zu dokumentieren. Vor Wiederaufnahme des Vortriebs ist eine Abnahme durchzuführen. Der Austausch eines beschädigten Tübbings ist einer Instandsetzung vor Ort nach Möglichkeit vorzuziehen.

Im eingebauten Zustand werden die Tübbinge einer Schadensaufnahme unterzogen und eventuelle Schäden vorab definierten Schadenskategorien zugeordnet. Die Schadensaufnahme erfolgt insbesondere in Hinblick auf Undichtigkeiten und Abplatzungen sowie auf Rissweiten. Die Schadenskategorisierung ermöglicht eine Zuordnung zum Instandsetzungskonzept.

In der Regel erfolgen Rissinjektionen bei wasserführenden Rissen und bei allen Rissen mit Rissweiten > 0,3 mm. Undichtigkeiten im Bereich der Dichtrahmen werden durch Schleierinjektionen oder mittels Injektionen nach Herstellung von Schrägbohrungen im Fugenbereich oder direkt durch den Dichtrahmen abgedichtet (vgl. **Kap. 4.12**).

Versätze zwischen benachbarten Tübbingungen werden beim einschaligen Tübbingausbau in der Regel nicht bearbeitet.

In Abhängigkeit der Ausmaße und Lage einer Abplatzung erfolgt deren Instandsetzung gemäß einem vorab festgelegten Instandsetzungskonzept.

## 12 Regelwerke, Normen und Publikationen

### 12.1 Regelwerke, Normen und Richtlinien

- [1] Deutsche Bahn AG: Richtlinie Eisenbahntunnel planen, bauen und in Stand halten, RiL 853, 9. Aktualisierung, gültig ab 01.09.2018
- [2] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln (ZTV-ING), Teil 7, Tunnelbau, Abschnitt 3 Maschinelle Schildvortriebsverfahren, Hrsg.: Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022
- [3] DIN-EN-1990 (Eurocode 0): Grundlagen der Tragwerksplanung: 2010-12
- [4] DIN EN 1990/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, 2010-12
- [5] 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
- [6] DIN EN 1991-1-2 (Eurocode 1): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Dezember 2010
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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
- [10] DIN EN 1997-1 (Eurocode 7): Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, 2009-09
- [11] 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
- [12] DIN EN 14651:2007-12 (2007): Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Deutsche Fassung EN 14651:2005+A1:2007, Beuth Verlag, Berlin
- [13] DIN 4020, Ausgabe 12.2010, Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2 (mit einem Beiblatt)
- [14] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Leonhardt, Reimann; Betongelenke. Versuchsbericht, Vorschläge zur Bemessung und konstruktiven Ausbildung, DAfStB, Heft 175, Berlin, 1965
- [15] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStB-Richtlinie Stahlfaserbeton, Berlin, Ausgabe 06-2021
- [16] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: „Hilfsmittel zur Berechnung von Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken“, DAfStB, Heft 240, Berlin, 3. Auflage 1991
- [17] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein: DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton, Oktober 2001, Berlin
- [18] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Hilfsmittel zur Schnittgrößenermittlung und zu besonderen Detailnachweisen bei Stahlbetontragwerken; DAfStB-Heft 631, Beuth-Verlag GmbH, 1. Auflage 2019
- [19] fib Model Code 2010, Model Code for Concrete Structures, Fédération international du béton (fib), Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2013
- [20] RILEM TC-162-TDF Test and design methods for steel fibre reinforced concrete,  $\sigma$ - $\epsilon$ -design method, Final Recommendation, Materials and Structures, Vol. 36, October 2003, pp. 560-567
- [21] DIN EN 1363: Feuerwiderstandsprüfungen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren
- [22] DIN EN 50122: Erdung
- [23] Deutsche Bahn AG, Richtlinie 997 Oberleitungsanlagen, RiL 997.01 Oberleitungsanlagen, gültig ab 17.10.2022
- [24] Deutsche Bahn AG, Richtlinie 954 Erdung
- [25] Erdungshandbuch der DB Netz AG
- [26] VDV 501, Elektrische Energieanlagen, Vorschrift des Verbands Deutscher Verkehrsbetriebe, 04/1993

- [27] EABT-80/100 – Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h (EABT-80/100). Ausgabe 2019. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), Köln, FGSV Verlag (FGSV, 339/1)
- [28] Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Dichtungsprofile (TL/TP-DP), TL/TP-ING, Teil 7, Abschnitt 3, Hrsg.: Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Stand 2022/01
- [29] Merkblatt „Tübbingtoleranzen – Herleitung und Anwendung“, Herausgabe März 2020, Österreichische Bautechnik Vereinigung
- [30] Leonhardt, F.: Vorlesungen über Massivbau, zweiter Teil, Sonderfälle der Bemessung im Stahlbetonbau, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1986
- [31] Duddeck, H.: Empfehlung zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein. Herausgegeben vom Arbeitskreis „Tunnelbau“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. Die Bautechnik 10/1980 S. 349-356
- [32] Dahl, J., Nußbaum, G.: Neue Erkenntnisse zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit von Tübbings im Bereich der Koppelfugen, Taschenbuch für den Tunnelbau 1997, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 291-319
- [33] Tirpitz, E.-R.: Zur Biegesteifigkeit von Tunnelröhren aus Stahlbetontübbings am Beispiel der 4. Röhre des Elbtunnels, Hamburg, 1. Dresdner Baustatik-Seminar, 1997
- [34] Janßen, P.: Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbings, Bericht Nr. 83-41 aus dem Institut für Statik der Technischen Universität Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. H. Duddeck, 1983
- [35] Mark, P., Schnütgen, B.: Grenzen elastischen Materialverhaltens von Beton, Beton- und Stahlbetonbau 96 (5), 2001, S. 373-378
- [36] Behnen, G.; Nevrlly, T.; Fischer, O.: Bettung von Tunnelschalen, Taschenbuch für den Tunnelbau 2013, VGE Verlag, Essen, S. 235-304
- [37] Gehwolf, P.; Schulte-Schrepping, C.; Behnen, G.; Camòs-Andreu, C.; Hammer, A.-L.; Zougou, D.; Breitenbücher, R.; Fischer, O.; Thewes, M.: Erfahrungsstand zur Ringspaltverfüllung bei einschaligen Tunneln mit Schwerpunkt deutsche Eisenbahntunnel, Taschenbuch für den Tunnelbau 2022, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 53-136
- [38] Behnen, G.; Fischer, O.; Schmidt-Thrö, G.: Scheibenbeanspruchung der Pressenkraftdurchleitung bei TVM-Vortrieben; Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), Heft 11, S. 694-705
- [39] Schreyer, J.; Winselmann, D.: Eignungsprüfungen für die Tübbingauskleidung der 4. Röhre Elbtunnel, Forschung + Praxis Nr. 37, STUVA-Tagung 1997, S. 58-62
- [40] Paschen, H.; Schönhoff, T.: Untersuchungen über in Beton eingelassene Scherbolzen aus Betonstahl, und Bemessungsvorschläge für Bolzenverbindungen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 346; S. 105-155; Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1983
- [41] Schmidt-Thrö, G.: Zum Tragverhalten der Tübbinglängsfuge, Dissertation am Lehrstuhl für Massivbau (Prof. Dr.-Ing. O. Fischer) der Technischen Universität München, 2019
- [42] Behnen, G.; Hestermann, U.: Tragverhalten von Tübbingkopplungen, Tunnel 3/2006, Bauverlag, S. 34-42
- [43] Schmidt-Thrö, G.; Tabka, B.; Smarslik, M.; Scheufler, W.; Fischer, O.; Mark, P.: Experimente zur Teilflächenpressung mit vorwiegend ebener Lastausbreitung, Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), Heft 2
- [44] STUVA-Empfehlung Einbauteile für Tübbinge (derzeitig in Bearbeitung)
- [45] Winselmann, D.; Städing; Babendererde; Holzhäuser: Aktuelle Berechnungsmethoden für Tunnelauskleidungen mit Tübbings und deren verfahrenstechnische Voraussetzungen, in: Vorträge der Baugrundtagung 2000 in Hannover, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V., 2000, S. 327-334
- [46] Betonkalender 2011: Beiträge Faserbeton (Falkner, Grunert), Teil 1, Seite 1 und Baukonstruktionen aus Faserbeton (Empelmann, Teutsch, Wichers), Teil 2, S. 89, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011

- [47] STUVA/PSP: Gutachten „Einschaliger/zweischaliger Ausbau mit Tübbings für vier eingleisige elektrifizierte Eisenbahntunnel in Berlin-Mitte (Zentraler Bereich)“, 1994
- [48] Weber, F.; Andres, S.: Vergleich von 3-Punkt und 4-Punkt-Biegezugversuchen zur Bestimmung der Nachrissbiegezugfestigkeit; Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021), Sonderheft Stahlfaserbeton, S. 48-58
- [49] Schulte C.; Zimmermann, C.; Koester A.; Larson M.: Erfolgreicher Einsatz von rein stahlfaserbewehrten Tübbing im Projekt Cityringen, Branch Off to Nordhavn, Taschenbuch für den Tunnelbau 2019, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 237-266
- [50] Mayer, P.-M.; Hörrle, D.; Niklasch, C.: Anwendung von Stahlfasern im maschinellen Tunnelbau, 26. Münchener Massivbau Seminar, Technische Universität München, 25.11.2022
- [51] Ring, B.; Comulada, M.; Perez Horas, E.; Gollegger, J.: Effects of a Fire during Construction of the Follo Line Tunnels – Investigation into the Damages of the Segmental Lining, Stability Analyses and Repair Procedures, Forschung + Praxis Nr. 53, STUVA-Tagung 2019, S. 183-189
- [52] STUVA/iBMB/D+P: Gutachten: Sicherheitstechnische Beurteilung und Anforderung an den baulichen Brandschutz in Eisenbahntunneln mit Tübbingauskleidung, 2008
- [53] Schuck, W., Städing, A.: Bemessung von Eisenbahntunneln auf der Grundlage des Teilsicherheitskonzepts nach der RiL 85, Taschenbuch für den Tunnelbau 2006, VGE Verlag, Essen, S. 93-141
- [54] Tunnelbrandkurven; [https://de.wikipedia.org/wiki/Brandschutz\\_in\\_Tunneln#/media/Datei:Tunnelbrandkurven.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Brandschutz_in_Tunneln#/media/Datei:Tunnelbrandkurven.jpg); von Andreas Schlüter. CC BY-SA 4.0; via Wikimedia Commons
- [55] Leucker, R.; von Stieglitz, Ch.; Gielnik, B.: Ergebnisse einer Wirtschaftlichkeits- und Folgekostenuntersuchung zum Einsatz von Brandschutzplatten bei Tunnelbauwerken. Forschung + Praxis Nr. 53, STUVA-Tagung 2019, S. 404-409.
- [56] STUVA: Forschung + Praxis 54: Empfehlung für Dichtungsrahmen in Tübbingauskleidungen, 2019
- [57] Ring, B.: Comparison of Shear Elements for Cross Passagers in TBM-Tunnels. Proceedings of the World Tunnelling Congress 2016, San Francisco, USA.
- [58] Ring, B.; Berger, A.; Witzlinger, K.; Garcia, I.: Segmental lining design for long TBM tunnels in hard rock – Case study Follo Line Tunnels, Proceedings World Tunnel Congress 2020, 15. bis 21.05.2020, Kuala Lumpur, Malaysia
- [59] Ring, B.; Maidl, U.: Stahlfaserbeton oder konventionelle Bewehrung für Tübbings – ein Vergleich der Anwendung. Taschenbuch für den Tunnelbau 2015, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 257-287
- [60] Ehrbar, H.: Nachhaltigkeit im Untertagebau – Grundlagen und Zielsetzung für die künftigen Empfehlungen“, DAUB-AK „Nachhaltigkeit“, Grundlagen-Papier, Forschung + Praxis Nr. 59, STUVA-Tagung 2023, S. 75-81
- [61] Schälicke, H.; Gerstewitz, T.: Klebeanschluss von KDB-Abdichtungen an Tübbingröhren als Alternative zum Klemmanschluss, Taschenbuch für den Tunnelbau 2014, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 227-260

