

Aktuelle Berechnungsmethoden für Tunnelauskleidungen mit Tübbing und deren verfahrenstechnische Voraussetzungen

Dr.-Ing. D. Winselmann, Dr.-Ing. A. Städing
Ing.-Büro Prof. Duddeck und Partner GmbH, Braunschweig

Dipl.-Ing. L. Babendererde, Dr.-Ing. J. Holzhäuser
Babendererde Ingenieure GmbH, Lübeck-Travemünde

Im statischen Modell werden Tübbingauskleidungen durch miteinander gekoppelte Ringe als gebetteter Stabzug diskretisiert. Koppelkräfte behindern bei einer Nut- und Feder-Ringfuge die Verformungen der Tübbingringe und können die Grenztragfähigkeit erhöhen. Im Gebrauchszustand ist dies jedoch oft nur bei einem Seitendruckbeiwert $K < 0,5$ relevant. Als Montagehilfe ist die Nut- und Feder-Fuge nur eingeschränkt wirksam, denn wenn beim Versetzen der Tübbinge die Fugenflanken in Kontakt kommen, können durch die Vorschubkräfte Abplatzungen entstehen. Durch eine vollständige und druckkonstante Verpressung der Schildschwanzfuge kann der Seitendruckbeiwert dauerhaft auf $K > 0,6$ erhöht werden, wodurch die Verformungen und die Biegebeanspruchung der Tübbinge vermindert werden. Ring- und Längsfugen können dann eben mit z.B. Steckdübeln als Montagehilfe ausgebildet werden. Reserven zur Verhinderung gegenseitiger Verschiebungen der Tübbingringe in der Ringfuge sind hierbei durch die Scherfestigkeit der Ringspaltverpressung vorhanden.

1 Einleitung

Schildvorgetriebene Tunnel mit einer Tübbingauskleidung aus Stahlbeton sind in den letzten Jahren mit immer größeren Durchmessern und in zunehmend schwierigerer Geologie ausgeführt worden. Beispiele hierfür in Deutschland sind u. a. die 4. Röhre Elbtunnel mit dem z. Zt. weltweit größten Durchmesser und der Wesertunnel, der in z. T. nur wenig tragfähigen Böden aufgeföhren wird. Um die Tiefenlage der Tunnel klein zu halten, erfolgt die Ausführung unter Flußläufen oft mit minimaler Überdeckung. Weitere Beispiele in Norddeutschland sind die U-Bahn und die 2 x 4 Tunnelröhren für die Fernbahn, die z. Zt. noch in Berlin aufgeföhren werden.

2 System der Tunnelauskleidung mit Tübbing

Die Tübbingauskleidung eines schildvorgetriebenen Tunnels im Lockergestein besteht aus einzelnen im Schutze des Schildmantels zu Ringen zusammengesetzten Tübbingsteinen (Bild 1). Hintereinanderliegende Ringe sind in der Regel um einen halben Stein versetzt. Die Steine sind

untereinander nur während der Montage verschraubt. Die Verschraubung ist so dimensioniert, daß der Anpreßdruck des Fugenbandes gewährleistet ist. Zum eigentlichen Tragverhalten leistet die Verschraubung keinen Beitrag. Ihre Stabilität erhalten die Ringe erst durch die Ringnormalkraft in den Längsfugen und die stützende Wirkung der Schildschwanzverpressung und des umgebenden Bodens. Die Schildschwanzverpres-

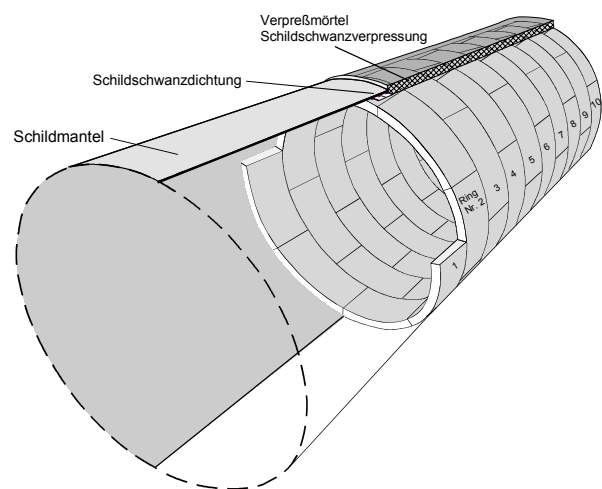


Bild 1: Tunnelröhre mit Tübbing

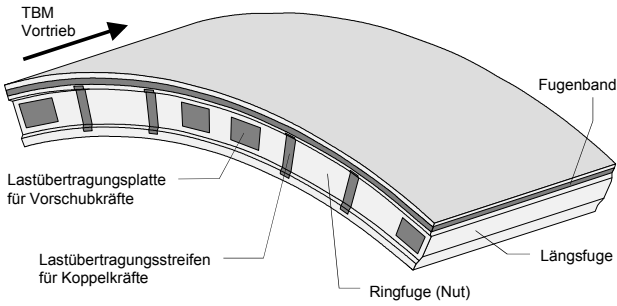


Bild 2: Tübbing mit Lastübertragungsflächen

sung muß gewährleisten, daß der Boden sich nicht auflockert und der Ansatz der Bodensteifigkeit sowie der daraus abgeleiteten Bettung gerechtfertigt ist. Um eine Montage mit hoher Einbaugenauigkeit und korrekter Lage der Fugenbänder zu erzielen und um die Grenztragfähigkeit zu steigern, sind die einzelnen, hintereinander liegenden Tübbingringe bei den oben genannten Beispielen in der Ringfuge durch eine Nut und Feder Konstruktion miteinander verzahnt (Bild 3). Die Längsfugen werden überwiegend als ebene Fugen ausgebildet. Die Tübbinge müssen während der Bauphase in der Lage sein, die großen Vortriebskräfte aufzunehmen. Zum Zwecke einer definierten Kraftübertragung in Tunnellängsrichtung werden daher an den Stirnflächen der Tübbinge in der Ringfuge Lastübertragungsplatten aus Kautschuk-Bitumen oder Hartfasern angeordnet (Bild 2).

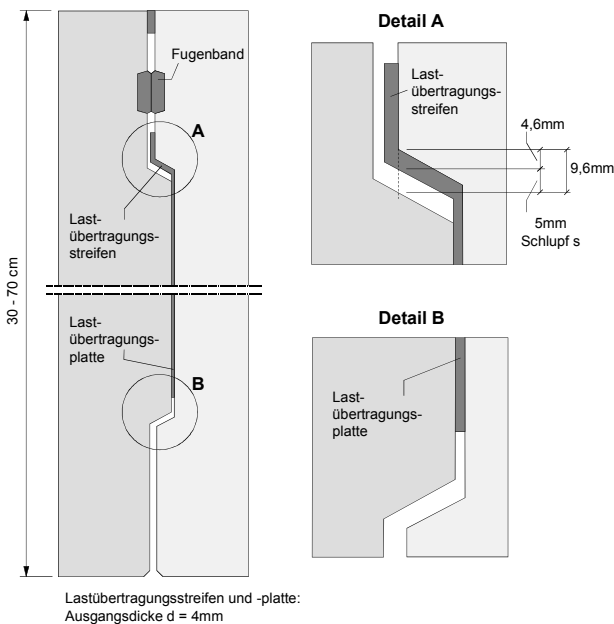


Bild 3: Fugendetail: Ringfuge mit Nut und Feder

3 Aktuelle statische Modellierung von Tunnelauskleidungen mit Tübbing

3.1 Tragwirkung in Ringrichtung

Für die Standsicherheitsuntersuchung der Tübbingröhre sind im wesentlichen zwei statische Systeme denkbar:

1. Jeder Tübbingring wird einzeln als für sich standsicher nachgewiesen. Es wird angenommen, daß keine Kraftübertragung zwischen den Ringen stattfindet.
2. Die Auskleidung wird durch mindestens zwei hintereinanderliegende, miteinander gekoppelte Ringe als gebetteter Stabzug diskretisiert.

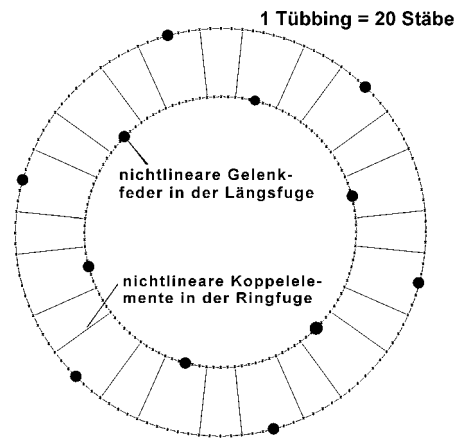


Bild 4: Statisches System zur Modellierung der Tragwirkung in Ringrichtung mit zwei gekoppelten Ringen

Beim ersten System als Einzelring wird oft ein biegesteifer gebetteter Stabzug gerechnet und die Wirkung der Gelenke in den Längsfugen pauschal durch Abminderungsfaktoren der Biegesteifigkeit nach z. B. Muir Wood (5) erfaßt. Alternativ ist auch hier eine explizite Abbildung der Verdrehsteifigkeit in den Längsfugen möglich.

Bei den aufwendigeren Rechenmodellen mit zwei oder mehreren gekoppelten Ringen werden die einzelnen Tübbinge diskretisiert und die Kontaktstellen in den Längsfugen als Gelenke mit definierter nichtlinearer Verdrehsteifigkeit simuliert. Die stützende Wirkung der einzelnen Ringe untereinander wird über eine radiale Kopplung an den Stellen des möglichen Kontaktes in der Nut und Feder durch Koppelstäbe abgebildet. Bild 4 zeigt das statische Modell mit zwei Ringen. Für die Berechnung können sie je nach Programmsystem räumlich als hintereinanderliegende Ringe oder, einfacher, als Ringe in einer Ebene mit nahezu identischen Durchmessern abgebildet

werden. Für die bessere Darstellung ist hier ein Ring aufgeweitet. Die Berechnung in einer Ebene hat bei identischen Ergebnissen den Vorteil, daß kein räumliches Berechnungsprogramm mit entsprechend aufwendigen Vorgaben nötig ist.

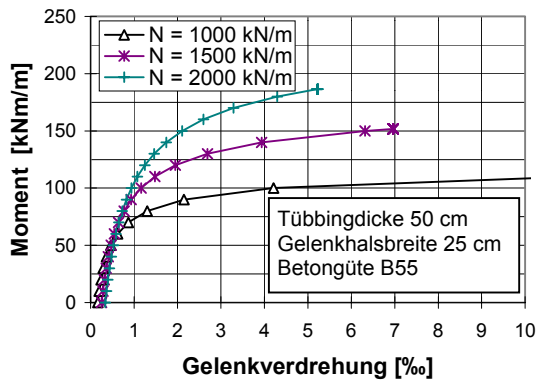


Bild 5: Momenten-Verdrehungsbeziehung für die Längsfugensteifigkeit nach Heft 175 DAfStb (Dauerlast)

Mit den immer größer werdenden Abmessungen der Tunnelröhren und den statischen Anforderungen in nur wenig tragfähigen Böden – wie z.B. Kleiböden und Sedimenten mit hohen organischen Anteilen und bei Sonderlastfällen wie z.B. Wracklasten kombiniert mit relativ geringer Überdeckung - sind auch die Anforderungen an die statische Modellierung gestiegen. Für die großen Tunnelquerschnitte wird daher das detailliertere Nachweisverfahren angewandt. Dabei werden sowohl das Tragverhalten in den Längsfugen, wie auch die Aktivierung der Koppelkräfte zwischen den einzelnen Ringen durch nichtlineare Federkennlinien abgebildet. Bild 5 und 6 zeigen Beispiele für diese Federkennlinien.

Üblicherweise wird die Federkennlinie, die die Verdrehsteifigkeit in der Längsfuge angibt, nach Leonhardt/Reimann (3) bestimmt. Diese Zusammenhänge wurden ursprünglich für Brückenlager entwickelt. Ihnen liegen Versuche für relativ kleine Lastübertragungsflächen zugrunde. Für den Wesertunnel und den Elbtunnel wurden daher Versuche zur Ermittlung der Verdrehsteifigkeit mit Tübbing im Maßstab 1:1 durchgeführt (6). Diese Versuche belegen, daß das Verhalten mit den Kurven nach Leonhardt/Reimann im Rahmen der Grenzen einer statischen Modellbildung gut angenähert wird.

Auffällig ist, daß die aufnehmbaren Momente in den Versuchen größer als in den Herleitungen nach Leonhardt/Reimann sind. Ergänzende Versuche, die bei der STUVA im Rahmen der Eignungsversuche für die 4. Röhre Elbtunnel durchgeführt wurden, haben gezeigt, daß ein

Grund hierfür die extrem hohe Exzentrizität der Normalkraft in der Ringfuge ist, die noch ohne Schäden aufgenommen werden kann. So wurde z.B. eine Normalkraft von 4.000 kN bei einem 1 m breiten Versuchsstein (planmäßig B 45) noch auf einer Druckzonenhöhe von nur ca. 2 cm schadlos abgetragen. Dies entspricht schon bei Ansatz konstanter Pressung einer mittleren Spannung von 200 MN/m² in der Druckzone und zeigt, daß bei der allgemein üblichen Geometrie der Längsfuge mit einer gering erhöhten Kontaktfläche (Gelenkhals), die rechnerischen Werte der Teilflächenpressung nach DIN 1045 weit auf der sicheren Seite liegen.

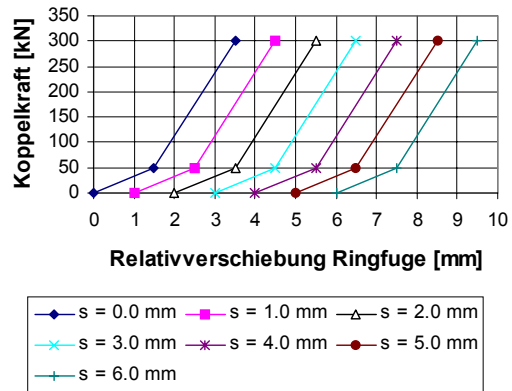


Bild 6: Zusammenhang zwischen Koppelkraft und Relativverschiebung in der Nut- und Feder-Ringfuge

Die ebenfalls nichtlineare Federkennlinie der Kopplung in den Ringfugen wird durch die Größe des Spiels der Nut und Feder, durch die Nachgiebigkeit des Kaubitstreifens und durch den Betonkontakt bestimmt. Die Anteile haben rechnerisch stark unterschiedliche Steifigkeiten. Besonders im Grenzbereich des Betonkontaktes sind häufig aufwendige Iterationen erforderlich. Zur Verbesserung der Konvergenz können die Übergangsbereiche ausgerundet werden. Die Nachgiebigkeit des Kaubits wurde in Versuchen ermittelt.

Koppelkräfte entstehen, wenn bei Verwendung einer Nut- und Feder-Ringfuge die Tunnelauskleidung aufgrund von äußeren Lasten und aufgrund der äußeren Bettung der Tübbinge eine Verformung erfährt, die in zwei benachbarten Tübbingringen infolge des Längsfugenversatzes zwischen den Ringen unterschiedlich ist und durch den Schlupf zwischen den Fugenflanken begrenzt ist. Nur wenn die Relativverschiebung zwischen den Tübbingringen so groß ist, daß sich

die Fugenflanken im Bereich der Kaubitstreifen berühren, werden Koppelkräfte geweckt. Der Vorteil der Nut- und Feder-Fuge liegt darin, daß die Koppelkräfte die Verformungen behindern und die Grenztragfähigkeit erhöhen können. Ein Risiko besteht allerdings, wenn beim Versetzen der Tübbinge die Fugenflanken in Kontakt gebracht werden und durch die Vorschubkräfte Abplatzungen entstehen können.

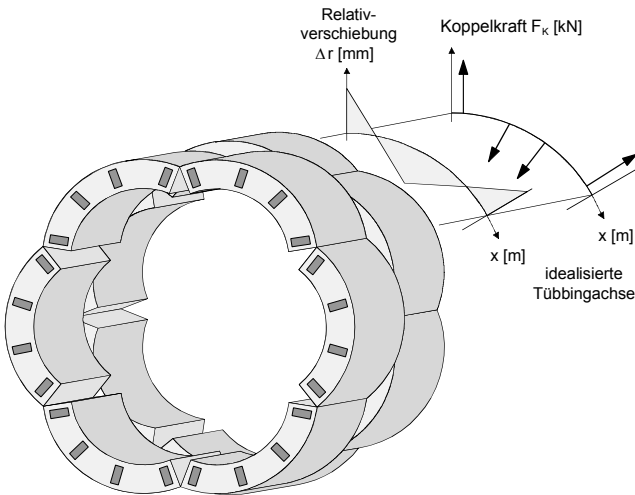


Bild 7: Entstehung von Koppelkräften

3.2 Berechnungsbeispiel

Die statischen Auswirkungen des Schlupfes der Nut- und Feder-Konstruktion und des Seitendrucks werden anhand der Ergebnisse einer Tübbingberechnung mit gekoppelten Ringen für das in Bild 8 dargestellte Beispiel eines Tunnels mit 10 m Durchmesser und 50 cm Tübbingstärke aufgezeigt. Die Ausbildung der Ringfuge entspricht der in Bild 3 gezeigten Konstruktion. Die Bodenparameter entsprechen typischen Randbedingungen in Norddeutschland.

Die einzelnen Tübbingringe bestehen aus 6 großen und einem kleinen Schlußstein. Da der Schlußstein in seiner Breite weniger als 20 % der Länge der normalen Tübbinge mißt, wird er nicht gesondert diskretisiert. Das statische System ist in Bild 4 dargestellt. Die Zusammenfassung der beiden Fugen neben dem Schlußstein zu einem Gelenk ist aufgrund des kleinen Abstandes und wegen der schrägen Fugen des Schlußsteins, die eine versteifende Wirkung haben, zulässig. Dies bestätigen Vergleichsuntersuchungen und die Großversuche zur 4. Röhre Elbtunnel im Maßstab 1:1 (6).

Das Bild 9a zeigt exemplarisch die Momentenverteilung für den Gebrauchslastfall mit voller

Überdeckung und einen Wasserstand 5 m über der Firste. Entsprechend den Randbedingungen

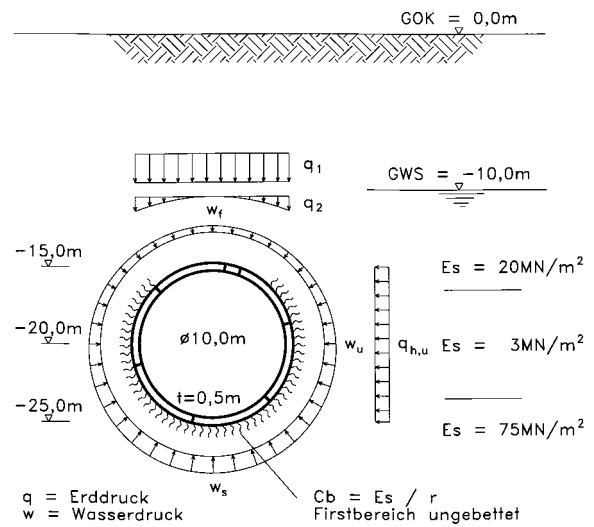


Bild 8: Beispiel Tunnelring

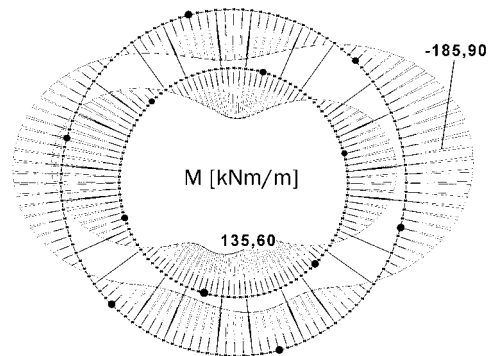


Bild 9a: Biegemomente - Gebrauchszustand

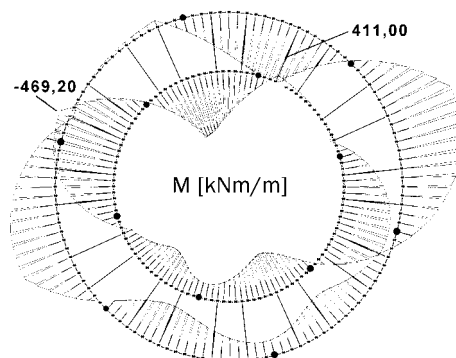


Bild 9b: Biegemomente - Katastrophen-Lastfall (Tunnel geflutet)

bei der Herstellung des Tunnels werden die tangentialen Last- und Bettungsanteile wegen der Ringspaltverpressung nicht berücksichtigt.

Im Bild 9a, das die Momentenverteilung im Gebrauchszustand darstellt, tragen die beiden Ringe bei einem Seitendruckbeiwert von $K = 0,5$ und einem Schlupf in der Ringfuge von 5 mm je für sich allein, die Kopplung zwischen den Ringen wird nicht aktiviert. Die Form der Momentenlinien entspricht üblichen Ergebnissen einer Tunnelberechnung. In der Sohle machen sich die Auswirkungen der Lage der Längsfugen durch die Begrenzung der übertragbaren Ringbiegemomente bemerkbar.

Das Bild 9b zeigt exemplarisch die entsprechenden Ergebnisse für den Nachweis eines Katastrophen-Lastfalles, wenn z.B. infolge eines Deichbruches der Tunnel geflutet würde und der innere Wasserdruck dem äußeren entspricht. Als Folge nimmt die Ringnormalkraft deutlich ab und mit ihr verringert sich auch das in der Gelenkfuge übertragbare Moment.

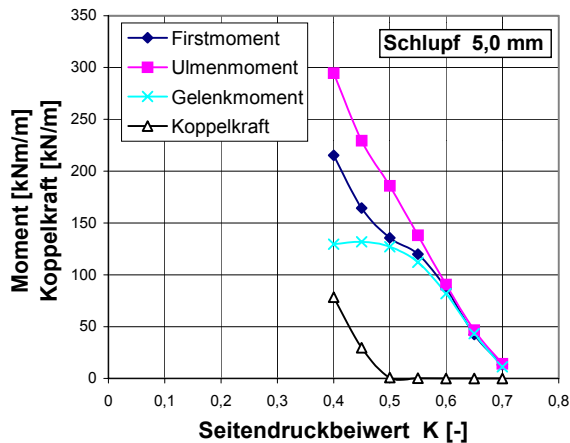


Bild 10a: Gebrauchszustand - Schnittgrößen bei Variation des Seitendruckbeiwertes K

Für diesen Katastrophen-Lastfall wird der Schlupf in der Ringfuge so groß, daß sich die Fugenflanken berühren und danach Koppelkräfte übertragen.

Die Ergebnisse der Beispiele zeigen, daß im Gebrauchszustand bei Seitendruckbeiwerten $K > 0,5$ keine Koppelkräfte übertragen werden (Bilder 10a-c). Im Katastrophenlastfall mit geflutetem Tunnel fehlt die vorspannende Ringnormalkraft und die äußere Gesamtbelastung auf den Tunnel aus Erd- und Wasserdruck ist aufgrund des fehlenden Wasserüberdruckes von außen etwas ungleichmäßiger verteilt als im Gebrauchszustand.

Daher sind auch die Biegemomente und die Verformungen größer und es werden rechnerisch

Koppelkräfte bei einem bei Seitendruckbeiwert $K < 0,75$ geweckt (Bild 11).

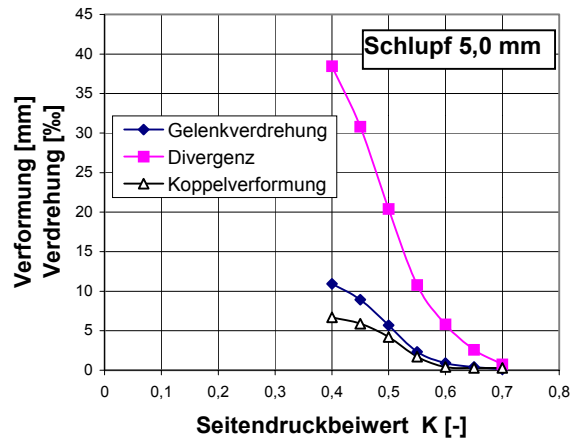


Bild 10b: Gebrauchszustand, Verformungen bei Variation des Seitendrucks

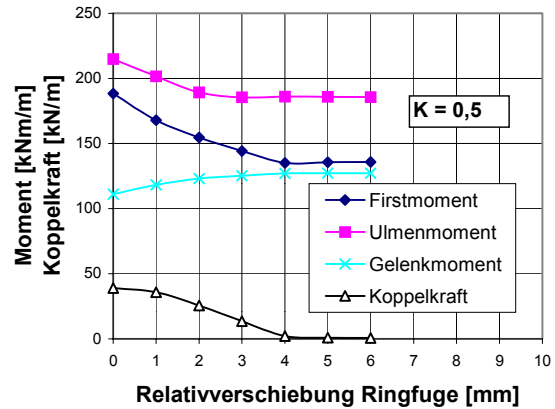


Bild 10c: Gebrauchszustand, Schnittgrößen bei Variation des Schlupfes in der Ringfuge

Statische Wertung Nut und Feder

Die Ergebnisse zeigen, daß für übliche Maße des Schlupfes in Nut und Feder mit ca. 5 mm im Gebrauchszustand bei Seitendruckbeiwerten $K < 0,5$ die rechnerischen Nachweise möglich sind, ohne daß Koppelkräfte geweckt werden.

Für Sonderlastfälle (Wrack, Flutung) ist dies anders. Hier kann die Tragfähigkeit des Einzelringes mit diesen Ansätzen für den Seitendruck z.T. nicht mehr nachgewiesen werden und die Kopplung muß rechnerisch Tragreserven aktivieren.

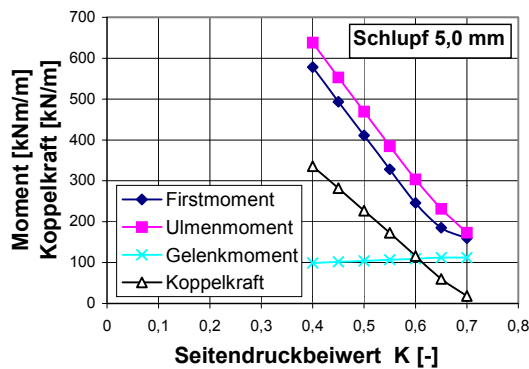


Bild 11: Katastrophenlastfall, Schnittgrößen bei Variation des Seitendrucks

Eine wesentliche Voraussetzung für den gewählten Last- und Bettungsansatz ist eine einwandfreie Verpressung der Schildschwanzfuge. Ein Verzicht auf die Kopplung wäre hier möglich, wenn durch eine zuverlässige Ringspaltverpressung sichergestellt ist, daß aufgrund der Verpreßdrücke und des Bodenverhaltens rechnerisch ein höherer Seitendruck berücksichtigt werden könnte.

4 Verfahrenstechnische Voraussetzungen der Berechnungsmethoden

4.1 Ringmontage

Beim Zusammensetzen des Tübbingringes ist vom Ringbau-Personal größte Präzision gefordert. Im Schutze des Schildschwanzes müssen die zum Teil mehr als 10 t schweren Einzel-Tübbings mit Hilfe des Erektors millimetergenau positioniert werden und werden dann durch die Vortriebspresen in ihrer Lage fixiert. Häufig werden für den Ringbau keine besonderen Einbauhilfen verwendet. Die Positionierung ist allein den visuellen Kontrollen des Ringbau-Personals überlassen, das in der Regel den radialen Versatz in den Fugen manuell mit einem Kantholz oder Zollstock überprüft.

Die Nut- und Feder-Ausbildung der Ringfuge stellt nur eine eingeschränkte Einbauhilfe dar, indem sie die Mannschaft zur genauen Montage zwingt, aber größere Versatzmaße durch Führung nicht ausgleichen kann.

Als geeignete Montagehilfe bei ebenen Fugen haben sich konisch geformten Steckdübel in den Ringfugen bei zahlreichen Projekten bewährt (4). Wird der Tübbing mit einem Versatz zum letzten Ring eingebaut, der das Spiel zwischen Nut und Feder übersteigt, so schließt sich in den schrägen Fugenflanken der Betonkontakt und bei Belas-

tung der Tübbinge durch die vergleichsweise großen Vortriebskräfte können Beton-Abplatzungen an der Nut auftreten (Bild 12).

Die Tübbingkanten sind für diese große Beanspruchung nicht ausgelegt und Schäden - wie sie in Abplatzversuchen nachvollzogen wurden (6) - können auftreten.

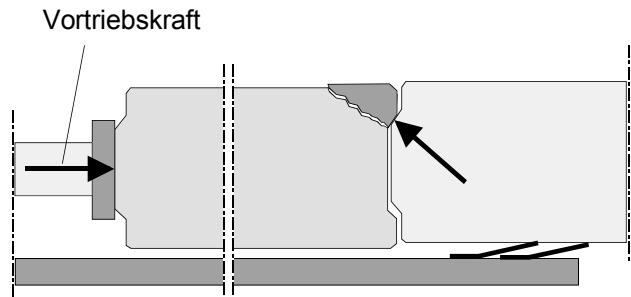


Bild 12: Abplatzungen bei einer Nut- und Feder-Fuge infolge Montageungenauigkeit

4.2 Übertragung der Vortriebskräfte

Die größte Beanspruchung in Längsrichtung wirkt auf die Tübbing-Auskleidung ein, wenn sie durch die Vortriebskräfte belastet wird, die zum Vorschub der TBM nötig sind. Für das Beispiel in Abs. 3 sind dies max. ca. 25 MN (2.500 t). Bei 6+1 Tübbing je Ring werden bei gleichmäßiger Pressenkraftverteilung ca. 450 t je Tübbing eingeleitet. Dabei werden lokale Unebenheiten der Betonoberfläche z.B. durch Platten aus einer vergleichsweise weichen und viskosen Kautschuk-Bitumen-Mischung mit integriertem Polyester-Gewebe ausgeglichen und ein direkter Kontakt zwischen den Betonoberflächen vermieden, der sonst zu örtlichen Betonabplatzungen führen würde. Die wichtigste Aufgabe der Fugeneinlagen ist es jedoch, die Herstellungstoleranzen der Tübbinge auszugleichen, um eine möglichst gleichmäßige und definierte Auflagerung der Tübbinge zu erzielen.

Tritt in der Ringfuge ein Versatz Δx in Tunnel-längsrichtung auf, der nicht mehr durch die Fugeneinlagen ausgeglichen wird (Bild 13), so fehlen einzelne Auflagerpunkte, der Tübbing Nr. C kragt aus und bei Belastung durch die Vorschubkräfte sind Biegerisse in Tunnel-längsrichtung unvermeidlich, die durch den gesamten Tübbingquerschnitt verlaufen. Zum Ausgleich der Herstellungstoleranzen der Tübbinge in Tunnel-längsrichtung sind Hartfaserplatten besser geeignet, da sie vergleichsweise steif sind und auch bei großer Druckbeanspruchung noch eine ausreichende Materialdicke verbleibt. Zudem er-

möglichen sie die Übertragung von Schubkräften in der Ringfuge. Bei einer Ringfuge mit Nut und Feder-System sind an den Auflagerpunkten zur Übertragung der Koppelkräfte in den schrägen Fugenflanken die Kaubit-Streifen aufgrund ihrer Flexibilität vorteilhaft.

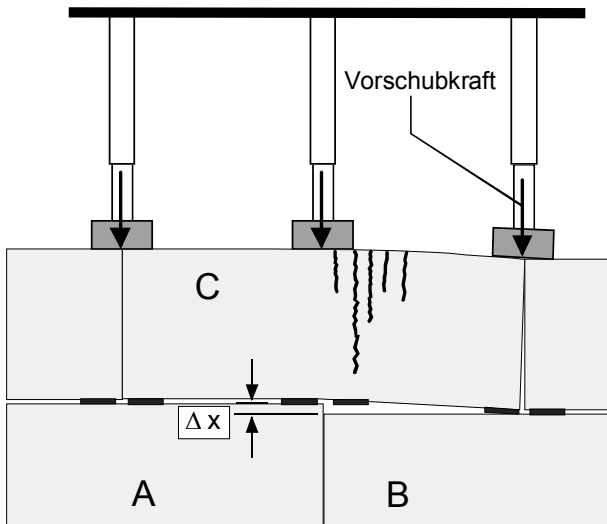


Bild 13: Biegerisse infolge Versatz Δx in Tunnellängsrichtung

Es wird deutlich, daß die hohen Anforderungen an die Herstellungstoleranzen der Segmente, die für die Tübbingbreite häufig nur ca. $\pm 0,5$ mm betragen, ganz wesentlich aus der Notwendigkeit resultieren, ungünstige Auflagerbedingungen der einzelnen Tübingelemente zu vermeiden.

4.3 Verpressung der Schildschwanzfuge

Wie aus den Bildern 10 ersichtlich, ist die Momentenbeanspruchung des Tübbingringes im wesentlichen vom Verhältnis zwischen Horizontal- und Vertikalspannungen und von der Bettung im umgebenden Boden abhängig. Beide Parameter werden durch die Qualität der Verpressung der Schildschwanzfuge maßgeblich beeinflusst. Die Schildschwanzfuge ist ein ringförmiger Spalt, der bei der Montage der Tübinge zwischen der Tübbingaußenseite und dem anstehenden Gebirge verbleibt (Bild 14). Diese Fuge, die zunehmend mit dem Vorschub der TBM entsteht, muß sofort verfüllt werden. Andernfalls droht das nicht standfeste Gebirge die Fuge auszufüllen, wobei es sich entspannt und auflockert. Die Folge sind Setzungen an der Geländeoberfläche und eine Verschlechterung der Bettung des Tunnels im umgebenden Gebirge.

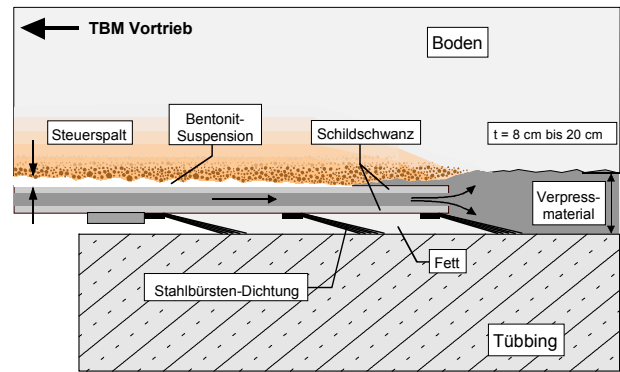


Bild 14: Geometrie der Schildschwanzfuge

Voraussetzung für den üblichen Bettungsansatz ($C_b = E_s/r$), der sich an der Verformbarkeit des ungestörten Bodens orientiert, ist jedoch eine einwandfreie Verpressung der Schildschwanzfuge. Dieser Ansatz erfordert, daß die Schildschwanzfuge vollständig verfüllt wird und sich der umgebende Boden nicht auflockert. Andernfalls sind Verformungen der Tunnelröhre möglich, die durch einen geringeren Bettungsmodul berücksichtigt werden müßten.

Üblicherweise wird der Verpreßdruck so gewählt, daß er in der gesamten Schildschwanzfuge etwas größer ist, als der Druck aus Überlagerung und Grundwasser (Bild 15). Mit zunehmender Entfernung von den Verpreßöffnungen nimmt der Druck im Verpreßmörtel aufgrund des Scherwiderstandes des Mörtels und der Reibung zwischen Verpreßmörtel und Boden ab. So ist der Fließweg des Mörtels begrenzt. Der Abstand der Zuleitungen für den Verpreßmörtel entlang des Schildumfangs sollte nach Detailuntersuchungen festgelegt werden.

Bei einer einwandfreien Schildschwanzverpressung kann erreicht werden, daß der Verpreßdruck entlang des gesamten Umfangs nahezu konstant verteilt ist und den Boden vorspannt. Die Vorspannung des Bodens wirkt nicht nur während des eigentlichen Verpreßvorganges, sie ist analog zur Bettungsreaktion im Boden – je nach Kriech-eigenschaften - dauerhaft wirksam. Dies bedeutet, daß das Verhältnis zwischen den Horizontal- und Vertikalspannungen, die auf den Tübbingring wirken, gegenüber dem Primärzustand deutlich ausgeglichener wird ($K > 0,6$), wodurch die Biegebeanspruchung der Tunnelauskleidung wesentlich vermindert wird.

Voraussetzung ist jedoch, daß eine geeignete Verpreßeinrichtung vorhanden ist, die Schildschwanzfuge vollständig und druckkonstant verpreßt wird und die Verpressung sorgfältig ausgeführt und überwacht wird (1).

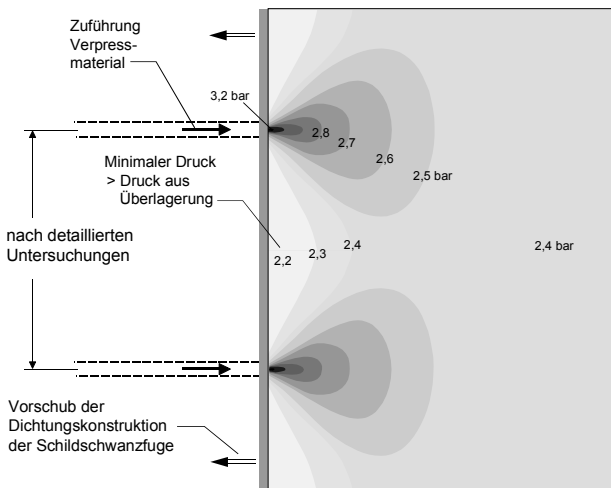


Bild 15: Druckverteilung Schildschwanzfuge bei Verpressung und gleichzeitigem Vorschieben der Dichtung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Hinweise für den Entwurf und die Ausführung von Tunnelauskleidungen mit Tübbing ableiten:

- Der Vorteil einer Nut- und Feder-Ringfuge liegt darin, daß Koppelkräfte die Verformungen der Tübbingringe behindern und die Grenztragfähigkeit erhöhen können. Das kommt für den Gebrauchszustand in der Regel nur für Seitendruckbeiwerte $K < 0,5$ zum tragen.

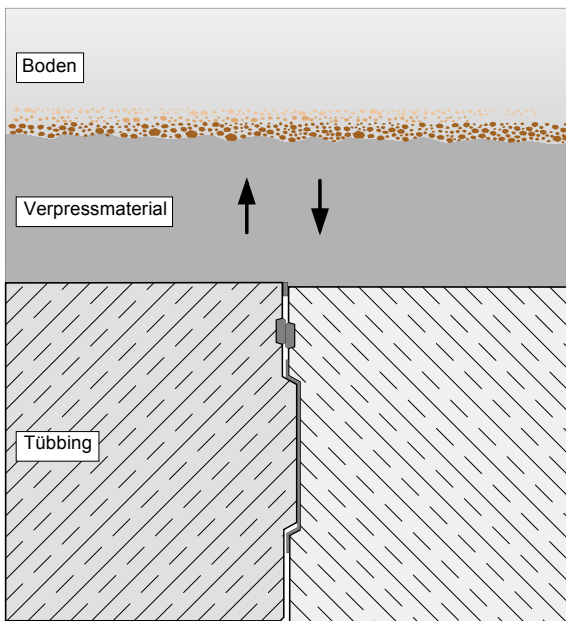


Bild 16: Verhinderung der Relativverschiebung einzelner Ringe durch die Scherfestigkeit der Ringspaltverpressung

- Die Nut- und Feder-Fuge ist nur eingeschränkt eine Montagehilfe, denn wenn beim Versetzen der Tübbing die Fugenflanken in Kontakt kommen, können durch die Vorschubkräfte Abplatzungen entstehen.
- Durch eine vollständige und druckkonstante Verpressung der Schildschwanzfuge kann der Seitendruckbeiwert dauerhaft auf $K > 0,6$ erhöht werden, wodurch die Verformungen und die Biegebeanspruchung der Tübbing vermindert werden.
- Ring- und Längsfugen können dann eben mit z.B. Steckdübeln als Montagehilfe ausgebildet werden. Reserven zur Verhinderung gegenseitiger Verschiebungen der Tübbingringe in der Ringfuge sind hierbei durch die Scherfestigkeit der Ringspaltverpressung vorhanden (Bild 16).

Literaturverzeichnis

- (1) Babendererde, S.: Verpressen der Schildschwanzfuge hinter einer Tunnelvortriebsmaschine mit Tübbingausbau. Unterirdisches Bauen in Deutschland 2000, STUVA, Köln, 1999, S. 113-116
- (2) Dahl, J.; Nußbaum, G.: Neue Erkenntnisse zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit von Tübbings im Bereich der Koppelfugen. Taschenbuch für den Tunnelbau 1997, Verlag Glückauf, Essen, 1996, S. 291-319
- (3) Leonhardt, F.; Reimann, H.: Betongelenke. Der Bauingenieur 41, Heft 2, 1966, S. 49-56 und Heft 175 DAFStb
- (4) Lingenfelder, H.: Neuentwicklungen und Leistungssteigerung beim einschaligen Tunnelbau mit Stahlbetontübbing. Vorträge der STUVA-Tagung '89 in Frankfurt am Main, STUVA, Köln, 1990, S. 111-116
- (5) Muir Wood, A.M.: The circular tunnel in elastic ground. Géotechnique 25, No 1, 1975, S. 115-127
- (6) Schreyer, J.; Winselmann, D.: Eignungsprüfung für die Tübbingauskleidung der 4. Röhre Elbtunnel. Vorträge der STUVA-Tagung '97 in Berlin, STUVA, Köln, 1998, S. 58-62, Fortsetzung: Vorträge der STUVA-Tagung '99 in Frankfurt