

Ingenieurpraktische Methoden zur Ermittlung von Schnittgrößen in Tübbingtunnelschalen

Oliver Fischer, Fabian Rauch

Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München (TUM)

Zusammenfassung: In der Ingenieurpraxis werden bei maschinell aufgefahrenen Tunnelbauwerken unterschiedliche Berechnungsmethoden, die mit aktuellen Empfehlungen/Richtlinien kompatibel sind, zur Prognose der Schnittgrößen in der Tübbingtunnelschale verwendet. Zur vergleichenden Einordnung der Methoden werden daher unter wechselnden Randbedingungen Schnittgrößen ermittelt und Übereinstimmungen und Unterschiede analysiert. Zudem wird der Einfluss von Imperfektionen beim Ringbau auf die Schnittgrößen adressiert.

1 Einführung

Der maschinelle Tunnelbau ist seit einigen Jahrzehnten eine bewährte Bautechnologie mit der herausfordernde Tunnelbauwerke realisiert werden können (siehe z.B. [1]). Liegen diese im selbst nicht tragfähigen Baugrund oder gibt es Grundwasserandrang, dann wird eine tragfähige und dichte Tunnelschale benötigt. In Deutschland wird in diesen Fällen in der Regel ein einschaliger Tübbingausbau aus Stahlbeton realisiert [2].

Die tragenden Elemente des kreisförmigen Ausbaus sind die sogenannten „Tübbings“ (siehe Abbildung 1). Diese Fertigteile aus Stahlbeton bilden ein Kreissegment des Tübbingrings und werden im Vortriebsprozess zur Tunnelschale zusammengesetzt. Die an den Kontaktbereichen entstehenden Fugen werden zwischen zwei Segmenten desselben Rings „Längsfugen“ und an den Fugen zwischen zwei benachbarten Ringen „Ringfugen“ genannt. Die Ringe werden in der Regel so in sich gedreht angeordnet, dass über zwei oder mehr Ringe keine durchlaufende Längsfugen (sog. „Kreuzfugen“) auftreten. Obwohl das Grundprinzip – die segmentweise Zusammensetzung – eines Tübbingtunnels aus Sicht der Tragstruktur verhältnismäßig einfach ist, ist das Tragverhalten relativ komplex. Dies liegt unter anderem an folgenden Zusammenhängen:

- Aufgrund der Segmentierung entsteht eine Vielzahl von Fugen. Diese Fugen erlauben es, dass benachbarte Segmente und Tübbingringe miteinander interagieren können.

Eine realistische Abbildung der Eigenschaften dieser (Kontakt-)Interaktion ist jedoch schwierig und aufwendig.

- Die Belastung eines Tübbingtunnels ist dreidimensional. Neben der Krafteinleitung aus dem umgebenden Baugrund (in radialer und teilweise auch in tangentialer Richtung) kommt es während des Vortriebes durch die Vortriebspresen auch zu einer Krafteinleitung in Längsrichtung (Längskraft).
- Die Eigenschaften und die Qualität des Bauprozesses hat einen wesentlichen Einfluss auf die sich während der Bauphase und später tatsächlich ausbildenden Schnittgrößen.
- Bereits im Gebrauchszustand treten nichtlineare Effekte auf.
- Das Tragverhalten, die Schnittgrößen und die Spannungen in der Tübbingtunnelschale sind zeit- und temperaturabhängig.

Hinzu kommt, dass viele Bodenparameter nicht exakt bekannt sind und häufig als Bandbreite berücksichtigt werden (müssen). Auch die tatsächlichen Eigenschaften der Boden-Tunnel-Interaktion können nur schwer realistisch charakterisiert werden.



Abbildung 1: Tübbingausbau (links) und Tübbingsegmente (rechts).

2 Ingenieurpraktische Berechnungsmethoden

In der Ingenieurpraxis müssen im Rahmen der konstruktiven Berechnung und Bemessung die Spannungen und Schnittgrößen in der Tübbing-Tunnelschale und deren Verformungen so zutreffend prognostiziert werden, dass ein zuverlässiges und dauerhaftes Bauwerk realisiert werden kann. Im Gegensatz zum konventionellen Tunnelbau ist es beim maschinellen Tunnelbau mit Tübbingausbau schwieriger zu reagieren, wenn während des Baus festgestellt wird, dass die tatsächlichen Beanspruchungen der Tunnelschale nicht den prognostizierten entsprechen. Den rechnerischen, statischen Prognosen kann beim Tübbingausbau deshalb eine erhöhte Bedeutung zugeschrieben werden. Dies gilt mit Blick auf ein sicheres und dauerhaftes Bauwerk einerseits für zu günstige Prognosen, um unnötigen Materialeinsatz zu vermeiden aber insbesondere auch für zu ungünstige Prognosen.

Regelungen und Empfehlungen für die Modellierung, Berechnung und Bemessung von Tübbingtunnelschalen finden sich in den entsprechenden Abschnitten im EC 2 [3] und EC 7 [4], sowie in internationalen [5] und nationalen [2,6] Richtlinien.

Vor allem in Deutschland verbreitet ist die statische Berechnung von Tübbingtunnels mit gebetteten Stabzügen (siehe Abbildung 2). Der Tübbingtunnel wird hierin als Stabzug abgebildet. Der Baugrund selbst wird nicht diskretisiert. Stattdessen werden Bettungsfedern für die Boden-Tunnel-Interaktion und aktive Lasten für die auf den Tunnel wirkenden Einwirkungen aus dem Baugrund angesetzt. International werden häufig auch Kontinuumsmodelle (siehe Abbildung 2) genutzt, bei denen auch der Boden selbst diskretisiert wird. Auch in Kontinuumsmodellen wird die Tunnelschale häufig als Stabzug modelliert. Es ist aber auch möglich sie als Schale bzw. in dreidimensionalen Modellen als Volumenkörper abzubilden.

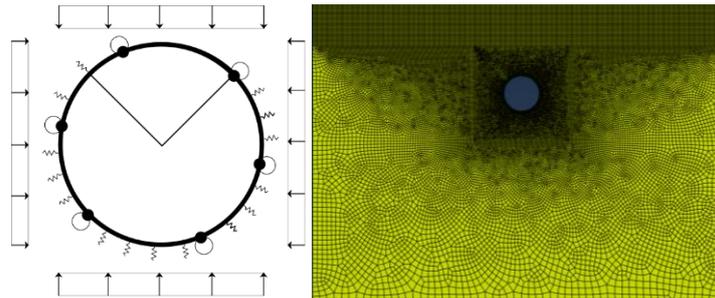


Abbildung 2: Gebetteter Stabzug (links) und Kontinuumsmodell (rechts).

Die Modellierung der Tragstruktur und der verschiedenen Interaktionen hat einen wesentlichen Einfluss auf die prognostizierten Schnittgrößen. Nachfolgend werden einige mögliche Modell- und Parametervarianten und ihre Auswirkungen auf die berechneten Schnittgrößen diskutiert, auf die im Abschnitt 3 Bezug genommen wird.

2.1 Einfluss der Segmentierung eines Einzelrings

Betrachtet man einen einzelnen Tübbingring, dann enthält dieser mehrere, in der Regel ebene [2] Längsfugen. Da sie eine flächige Ausdehnung haben, können sie neben Normalkräften über eine Kontaktexzentrizität auch Momente übertragen.

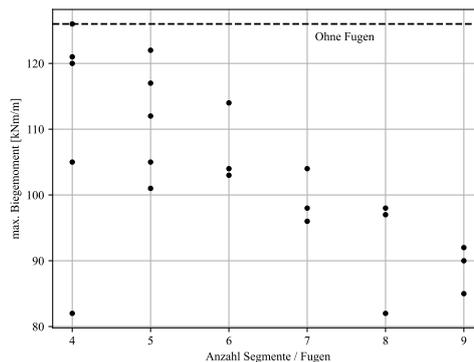


Abbildung 3: Einfluss der Segmentierung auf die max. Biegemomente (aus [8]).

Um die Berechnungsmodelle zu vereinfachen, wird gelegentlich auf die explizite oder vereinfachte Modellierung der Längsfugen verzichtet. Diverse Untersuchungen (siehe z.B. [8])

zeigen, dass eine Vernachlässigung der Längsfugen aber zu Ergebnissen (deutlich) auf der sicheren Seite führt (siehe auch Abb. 3). Während die Normalkraft bei Vernachlässigung der Längsfugen weitgehend unbeeinflusst bleibt, steigt das betragsmäßig maximale Biegemoment wesentlich an.

Modelliert werden Längsfugen häufig als normalkraftabhängige, nichtlineare Drehfedern [9]. Der Tübbingring wird in solchen Modellen entsprechend eindimensional abgebildet. In der Realität sind Tunnelschalen im Schnitt zweidimensional (2D) und in der Realität natürlich dreidimensional (3D). Im Gegensatz zu eindimensionalen (1D) Stabzügen mit Drehfeder und Kontaktpunkt handelt es sich eigentlich um Kontaktflächen. Vergleichsrechnungen zeigen aber, dass beiden Varianten eine gute Übereinstimmung aufweisen.

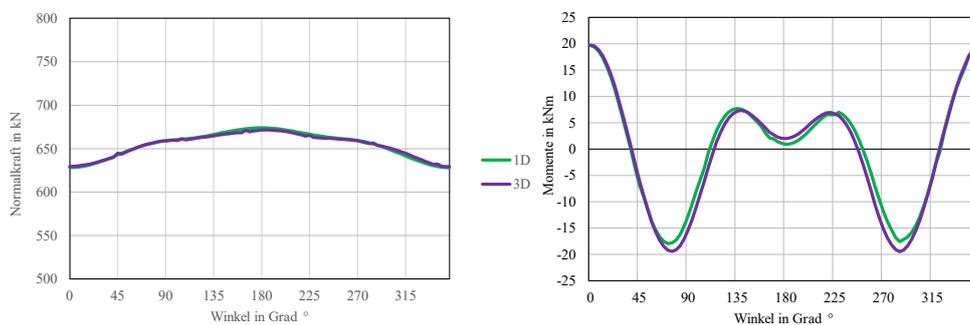


Abbildung 4: Vergleich zwischen 1D und 3D Tunnelschale.

2.2 Einfluss der tangentialen Boden-Tunnel-Interaktion

Ob eine tangentielle Interaktion zwischen Tunnel und Baugrund stattfindet, wirkt sich ebenfalls auf die prognostizierten Schnittgrößen aus. Bei der Verwendung von Stabzügen wird die tangentielle Interaktion zwischen Boden und Tunnel mit zu den radialen Bettungsfedern senkrecht stehenden Federn modelliert. In Kontinuumsmodellen können Kontaktbedingungen oder Interfaceelemente zwischen Boden und Tunnelschale genutzt werden, wobei die Parameterwahl unter Umständen schwierig ist [10]. In [2] wird empfohlen, eine tangentielle Interaktion nur in Sonderfällen (z.B. spätere Abgrabungen, Bebauung) zu berücksichtigen.

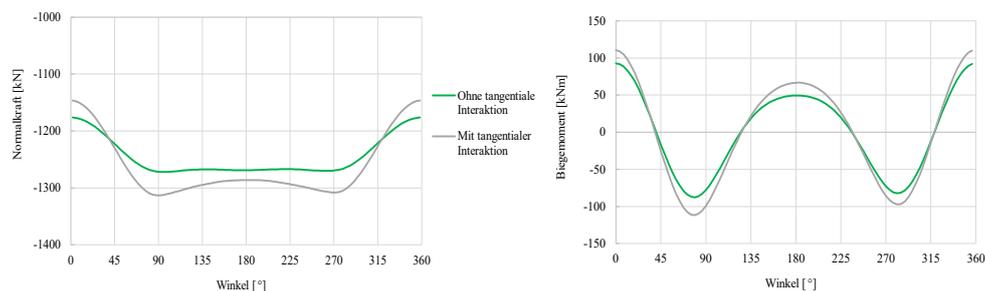


Abbildung 5: Einfluss der tangentialen Interaktion.

Ohne tangentialer Interaktion (d.h. ohne tangentialer Bettung und tangentialer Lastwirkungen) ist die Normalkraft gleichmäßiger entlang des Tunnelumfangs verteilt, während es mit tangentialer Interaktion in der Firste zu einer Reduktion und in den Ulmen zu einer Erhöhung der Normalkraft kommt. Da zusätzlich die Biegemomente ansteigen, ist die Spannungssituation an der maßgebenden Stelle bei tangentialer Interaktion ungünstiger. Der Einfluss der tangentialen Interaktion ist bei Stabzügen aufgrund fehlender Umlagerungsmöglichkeiten im Stabzugmodell deutlich stärker ausgeprägt als bei Kontinuumsmodellen [11].

3 Messungen an einem realen Tübbingtunnel

In einem kürzlich durch die Autoren durchgeführten in-situ Strukturmonitoringprojekt konnten Einblicke in das Tragverhalten und die tatsächlichen Schnittgrößen eines Tübbingtunnels gewonnen werden. Auf weiterführende Informationen zu dem über mehrere Jahre seit dem Einbau der Tübbings durchgeführten Strukturmonitoring wird hier aus Platzgründen verzichtet und auf die entsprechenden Veröffentlichungen [12,13] hierzu verwiesen.

3.1 Messergebnisse

Einige wichtige Beobachtungen aus dem Strukturmonitoring werden nachfolgend zusammengefasst vorgestellt.

- Die Spannungen und Schnittgrößen verändern sich mit der Zeit. Zunächst werden sie durch den Bauprozess geprägt und beeinflusst. Später lagern sie sich um und nähern sich jenem Zustand an, der durch den Primärspannungszustand im Boden erreicht werden würde.
- Die Umlagerungen sind beim Biegemoment stärker ausgeprägt als bei der Normalkraft. Dies liegt daran, dass die Belastungssituation nach der Ringspaltverpressung quantitativ jener des Endzustandes ähnelt, qualitativ aber davon deutlich abweicht. Die Normalkräfte sind sensitiver auf die quantitativen Werte, die Biegemomente hingegen auf die qualitativen.
- Bereits im frühen Anfangszeitraum können Spannungszustände erreicht werden, die jenen späterer Zeiträume (Endzustand) entsprechen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die anfängliche Belastung der Tunnelschale zwar quantitativ kleiner, aber qualitativ ungünstiger ist.
- Innerhalb eines Tübbingrings sind kleine geometrische Imperfektionen vorhanden. Diese entstehen infolge des nicht „perfekten“ Ringbaus und äußern sich durch einen nicht vollständigen Kontakt in den Längsfugen (Versätze, Rotationen). Die Imperfektionen liegen in diesem Fall aber innerhalb der zulässigen Grenzen.
- Die Kräfte, die beim Vortrieb durch die Vortriebspresen in Längsrichtung in die Tübbingschale eingepreßt werden, bauen sich mit der Zeit relativ stark ab. Eine große Reduktion findet im Anfangszeitraum statt und ist auf einen unvollständigen Kontakt in der Ringfuge zurückzuführen. Mit der Zeit kommt es dann zu einer weiteren Reduktion, die teilweise bis zu 100 % beträgt und auf die Verkürzung der Segmente infolge einer allgemeinen Abkühlung und auf das Kriechen des Betons zurückzuführen ist.

Die Abkühlung wird dadurch begünstigt, dass die Segmente infolge der Hydratationswärmeentwicklung des beim vorliegenden Tunnelbauprojekt genutzten Ringspaltmaterials im Anfangszeitraum (zusätzlich zu den warmen Temperaturen des Einbauzeitraums im Sommer) erwärmt wurden.

- Die Tübbingringsegmentierung zeichnet sich im Verlauf der Biegemomente entlang des Ringumfangs ab. Der Verlauf der Biegemomente ist nicht symmetrisch zur vertikalen Achse, sondern leicht, entsprechend der Ringsegmentierung gedreht.

3.2 Vergleich der Messungen mit Berechnungen

Die gewonnenen Messdaten lassen sich mit durch die in Abschnitt 2 genannten Modelle erhaltenen Berechnungsergebnissen vergleichen.

Es lässt sich grundsätzlich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem Normalkraftniveau finden (siehe Abb. 7), wenn man rechnerisch die volle bzw. nahezu die volle Überlagerung auf den Tunnel ansetzt. Das lässt den Schluss zu, dass aufgrund der seichten Lage dieses Tunnels (Überdeckung ca. zweimal der Tunneldurchmesser) im Boden höchstens geringe Umlagerungen infolge des Tunnelbaus stattgefunden haben.

Die quantitative Verteilung der Normalkraft über den Tunnelumfang entspricht in den Messungen eher einer Verteilung, die sich ausbildet, wenn man höchstens eine geringe tangentielle Interaktion berücksichtigt – so wie es in [2] auch empfohlen wird.

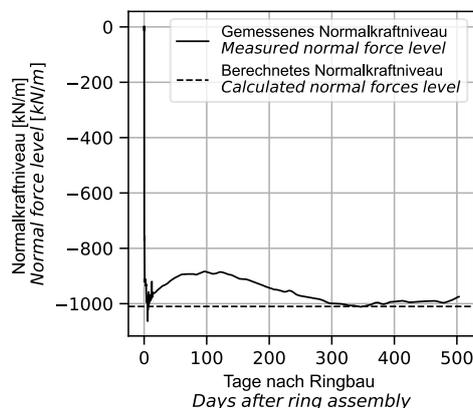


Abbildung 6: Vergleich gemessenes und berechnetes Normalkraftniveau.

Die Biegemomente entsprechen in späteren Zeiträumen qualitativ gut jenen, die sich rechnerisch einstellen, wenn man rechnerisch den Primärspannungszustand ansetzt. Es treten positive Biegemomente (Zug innen) in der Firste, und negative Momente in den Ulmen auf.

Quantitativ lassen sich die erreichten Biegemomente mit üblichen Berechnungsansätzen aber nicht genau nachvollziehen. Auf Basis der Messdaten können u.a. die geometrischen Imperfektionen in den Längsfugen als mögliche Ursache hierfür gefunden werden. Berücksichtigt man potentiell mögliche geometrischen Imperfektionen im Modell, kann eine gute Übereinstimmung sowohl für die Normalkräfte, als auch für die Biegemomente erreicht werden. Eine

bessere, wenn auch nicht genaue Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Biegemomente lässt sich auch dann erreichen, wenn statt Stabzügen Kontinuumsmodelle genutzt werden. Die gemessenen Normalkräfte können mit beiden Modellen rechnerisch gut abgebildet werden.

4 Zusammenfassung und Fazit

Das Tragverhalten eines Tübbingtunnels ist vergleichsweise komplex. Entsprechend ist auch für die Modellierung und die dazugehörige Parameterauswahl die entsprechende Sorgfalt geboten. Die Berechnungsergebnisse reagieren teilweise recht sensitiv auf die Änderung gewisser Modell- und Parametervarianten. Einige davon, die Segmentierung und die tangentielle Interaktion, wurden in diesem Beitrag vorgestellt. Eine unpassende Parameterwahl kann zu ineffizienten oder im Extremfall unsicheren Tragstrukturen führen. Da beim Tübbingausbau eine zuverlässige Prognose der Schnittgrößen unumgänglich ist, ist es wichtig, dass die Berechnungsmethoden die Realität ausreichend genau abbilden. Die hierfür erforderlichen, realen Vergleichswerte können im Zuge von Strukturmonitorings gewonnen werden. Einige Ergebnisse aus einem solchen wurden vorgestellt, diskutiert und mit Berechnungsergebnissen verglichen. Gute Übereinstimmungen ergaben sich erwartungsgemäß insbesondere bei der Normalkraft. Beim Biegemoment wurden quantitative Unterschiede beobachtet. Mögliche ursächliche Einflüsse (geometrische Imperfektionen, Modellvarianten) für die Abweichungen wurden erläutert. Eine Berücksichtigung der Einflüsse führt zu einer besseren bzw. teilweise guten Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Schnittgrößen.

Danksagung

Das dem vorliegenden Beitrag zugrundeliegende Strukturmonitoring erfolgte im Zuge der Verlängerung der U5 in Frankfurt an Main wurde in Auftrag gegeben und finanziert von der „Stadtbahn Entwicklung und Verkehrsinfrastrukturprojekte Frankfurt GmbH“.

Literatur

- [1] Fischer, O.; Nevrlly, T.; Behnen, G. Fertigteile im Tunnelbau. In: Bergmeister, K. et al. (Hrsg.) Beton-Kalender 2014: Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7, Ernst & Sohn, Berlin, 2014, S. 241. <https://doi.org/10.1002/9783433603352.ch8>
- [2] DAUB Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V. Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen. Köln, 2013.
- [3] DIN EN 1992-1-1. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. 2011.
- [4] DIN EN 1997-1. Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln, 2009.

- [5] ITA/AITES International Tunnelling Association. Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Linings. ITA Working Group 2
- [6] DAUB Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V. Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen. Köln, 2024.
- [7] Meschke, G. Numerische Simulation im Tunnelbau. In: Bergmeister, K. et al. (Hrsg.) Beton-Kalender 2014: Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7, Ernst & Sohn, Berlin, 2014, S. 178. <https://doi.org/10.1002/9783433603352.ch7>
- [8] Do, N. A. Numerical Analyses of Segmental Tunnel Linings under Static and Dynamic Load Analyses. Dissertation, University of Grenoble, Grenoble, 2014.
- [9] Janßen, P. Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbing. Dissertation, TU Braunschweig, Braunschweig, 1983.
- [10] Behnen, G.; Nevrlly, T.; Fischer, O. Bettung von Tunnelschalen. In: Laackmann, K. et al. (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau 2013. VGE Verlag, Essen, 2012, S. 235-282.
- [11] Ahrens, H.; Lindner, E.; Lux, K.-H. Zur Dimensionierung von Tunnelausbauten nach den „Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein (1980). Die Bautechnik, 8, 59 (1982), S. 260-273.
- [12] Rauch, F.; Fischer, O. Structural Monitoring of Segmental Tunnel Linings: towards safer and more resource efficient tunnels. Civil Engineering Design, 1-3, 4(2022), S. 62-71. <https://doi.org/10.1002/cend.202100053>
- [13] Rauch, F.; Fischer, O. Long-term structural behavior of inner-city segmental tunnel linings investigated by an innovative structural monitoring. In: Anagnostou, G. et al. (Hrsg.). Expanding Underground, Proceedings of the World Tunnel Congress 2023, Athen, 2023, S. 2510-2518. <https://doi.org/10.1201/9781003348030-302>