

In-situ Messung und Berechnung der Schnittgrößen in Tübbingtunnelschalen am Beispiel der U5 in Frankfurt am Main – Übereinstimmungen, Unterschiede und weitere Erkenntnisse

<https://doi.org/10.14459/mbs28.11>

Fabian Rauch, Oliver Fischer



Fabian Rauch, M. Sc.

2017 B.Sc. Bauingenieurwesen, TUM
2019 M.Sc. Bauingenieurwesen, TUM
2019-24 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Lehrstuhl für Massivbau, TUM



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer

1988 Diplom Bauingenieurwesen, TUM
1989-95 Wissenschaftlicher Assistent, UniBw
1994 Promotion
1996-2009 Verschiedene Fach- und Führungs-
positionen in der Bauindustrie im In- und Ausland
2007 Diplomwirtschaftsingenieur, Univ. Hagen
seit 10.2009 Ordinarius für Massivbau, TUM
seit 2011 Prüflingenieur und EBA-Prüfer

Aufgrund ihres komplexen Tragverhaltens ist die realistische Prognose der Schnittgrößen in Tübbingtunneln herausfordernd. In der Folge bestehen Unsicherheiten, ob und inwieweit die prognostizierten Schnittgrößen den tatsächlichen entsprechen, was natürlich nicht wünschenswert ist. Eine Untersuchung dieser Unsicherheiten erfordert eine genaue Kenntnis des tatsächlichen Tragverhaltens von Tübbingtunneln. Dies kann durch in-situ Messungen erlangt werden. Solche Messungen wurden beispielhaft im Rahmen eines Langzeit-Strukturmonitorings an der Tübbingtunnelnische der Verlängerung der U5 in Frankfurt am Main durchgeführt. Dies ermöglichte einerseits eine vertiefte Analyse des Tragverhaltens. Andererseits lieferte das Monitoring auch die Daten, die für weitere Untersuchungen u.a. im Kontext der oben genannten Unsicherheiten benötigt werden. Dieser Beitrag liefert einen Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse.

Realistically predicting the internal forces of segmental linings is challenging due to their complex load-bearing behaviour. Consequently, there are uncertainties regarding whether and how well the predicted internal forces correspond to the actual ones, which, of course, is undesirable. Investigating these uncertainties requires precise knowledge of the actual load-bearing behaviour of segmental linings. This can be achieved through in-situ measurements. Such measurements were exemplarily carried out for a long-term structural monitoring of the segmental lining of the extension of the U5 metro line in Frankfurt (Main). On the one hand, this allowed for a deep analysis of the real load-bearing behaviour. On the other hand, the structural monitoring provided the data needed for further investigations in the context of the aforementioned uncertainties. This paper provides an overview of the insights gained.

Einleitung

Grundlagen und Hintergrund

Infolge einer kontinuierlichen technologischen Entwicklung ist der maschinelle Tunnelbau mit Tunnelbohrmaschinen (TBM) heutzutage eine etablierte Bauweise. Innerhalb des maschinellen Tunnelbaus gibt es mehrere Untervarianten, von denen dieser Beitrag nur jene mit Schild und einer Schale aus Stahlbetonfertigteilen (sogenannte „Tübbing(e)“) betrifft. Der maschinelle Tunnelbau mit Tübbingfertigteilen zeichnet sich gegenüber dem konventionellen Tunnelbau durch einige Vorteile z.B. im Hinblick auf die hohe erreichbare Qualität der Tunnelschale aus und wird u.a. aufgrund der geringen, erreichbaren Setzungen zunehmend auch im innerstädtischen Tunnelbau eingesetzt.

Der Tübbingtunnelschale werden verschiedenen Aufgaben zugewiesen. Unter anderem muss sie sämtliche einwirkende Lasten bei geringen Verformungen aufnehmen. Dafür muss sie entsprechend zuverlässig - bei gleichzeitiger Schonung von Ressourcen - bemessen werden. Eine realistische Prognose und Berechnung der Schnittgrößen in Tübbingtunnelschalen ist jedoch herausfordernd. Dies ist auf mehrere Gründe zurückzuführen, unter anderem:

- Das Tragverhalten von Tübbingtunnelschalen ist komplex. Es ist geprägt von einer Vielzahl an Interaktionen. Diese finden sowohl zwischen den Segmenten eines einzelnen Rings als auch zwischen den Segmenten benachbarter Ringe statt. Des Weiteren beeinflussen sich die Tübbingtunnelschale und der umgebende Baugrund gegenseitig. Die realistische Berücksichtigung dieser Interaktionen in Berechnungen ist schwierig.
- Unsicherheiten hinsichtlich verschiedener Eingangsparameter sind im Tunnelbau unvermeidbar. Diese betreffen z.B. Bodenkennwerte und wirken sich unmittelbar auch auf die berechneten Schnittgrößen aus.

In der Folge bestehen Unsicherheiten, ob und inwieweit Berechnungsergebnisse den tatsächlichen Schnittgrößen in Tübbingtunnelschalen entsprechen. Dies ist natürlich nicht wünschenswert, gerade auch im Hinblick auf die zunehmende Beliebtheit dieser Bauweise.

Um diese Unsicherheiten untersuchen und – im Idealfall – reduzieren zu können, ist eine möglichst genaue Kenntnis des realen Tragverhaltens und der tatsächlichen Schnittgrößenentwicklung in Tübbingtunneln erforderlich. Um diese zu erlangen, sind in erster Linie in-situ Messungen an realen Bauwerken erforderlich. Im Rahmen eines Strukturmonitoringprojekts ergab sich für die Technische Universität München (TUM) eine Möglichkeit für solche Messungen. Diese und deren wichtigste Erkenntnisse werden in diesem Beitrag vorgestellt.

Strukturmonitoring an der Verlängerung der U5 in Frankfurt am Main

Beginnend am Platz der Republik wird aktuell die U5 in Frankfurt am Main in Richtung Westen verlängert, um ein neu entstandenes Stadtviertel an das ÖPNV-Netz anzuschließen. Die Verlängerung umfasst zwei ca. 840 m lange mit einer EPB-TBM aufgefahrenen Tunnelröhren, die zwischen 2019 und 2022 gebaut wurden. Die Tunnelröhren haben einen Innendurchmesser von 5,90 m und bestehen aus sechs großen Segmenten ohne Schlussstein. Die eingesetzten Tübbinge haben eine Dicke von 45 cm und eine Länge von 1,20 m. In dem für diesen Beitrag relevanten Bereich (Abb. 1) befindet sich der Tunnel im miozänen Frankfurter Ton unter einer Schicht mit quartären Sanden bei einer Gesamtüberlagerungshöhe von ca. 13 bis 16 m. Außerdem liegt der Tunnel in diesem Bereich unter einem dicht bebauten Gebiet [1].

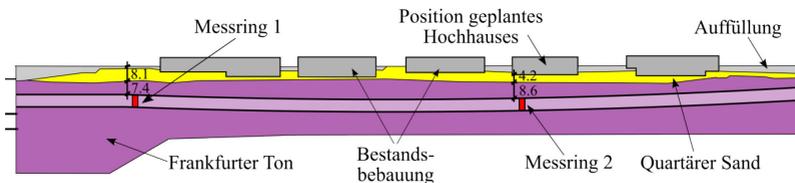


Abb. 1: Längsschnitt des mit zwei Messringen ausgestatteten Tunnelbereichs; Distanzangaben in [m].

Ebendiese Bebauung lieferte den Anlass für das von der TUM durchgeführte Strukturmonitoring. Es wird erwartet, dass im östlichsten Bereich der verlängerten U5 ein 175 m hohes Hochhaus direkt oberhalb der Tunneltrasse errichtet wird (s. Abb. 1). Aufgrund der relativ seichten Lage des

Tunnels ergeben sich aus dieser Bebauungslast, sowie aus dazugehörigen Baugruben rechnerische hohe Spannungen und Schnittgrößen in der Tübbingtunnelschale. Mit dem Strukturmonitoring werden deshalb deren Entwicklung und potentielle Änderungen beobachtet.

Das Strukturmonitoring basiert im Wesentlichen auf Dehnungsmessungen in zwei mit entsprechenden Sensoren ausgestatteten Tübbingringen (Messringe) (Abb. 1 und 2), von denen unter Einbeziehung von begleitenden Temperaturmessungen und experimentell kalibrierten Materialkennwerten auf die Schnittgrößen rückgerechnet wird. Das zugehörige Strukturmonitoringkonzept und die genutzte Messtechnik wurden bereits auf dem 25. Münchener Massivbau Seminar 2021 vorgestellt, sodass für weitere Details auf den dazugehörigen Beitrag und weitere bereits erschienene Publikationen verwiesen wird [2,3]. Die nachfolgenden Ausführungen betreffen die Messergebnisse am zweiten der zwei Messringe, für den eine erheblich größere Datenbasis geschaffen werden konnte.

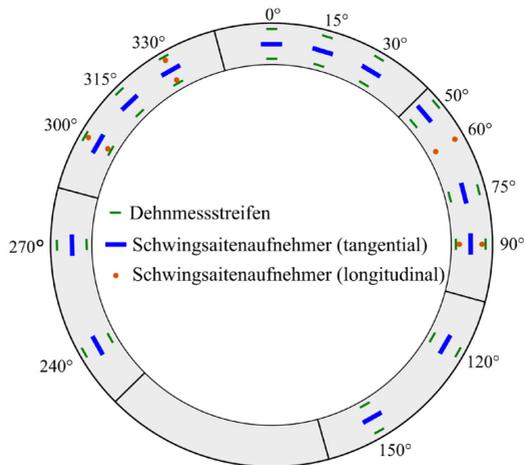


Abb. 2: Instrumentierung eines Messrings; bei jedem Schwingensaitenaufnehmer wird auch die Temperatur gemessen.

Analyse des realen Tragverhaltens

Die im Rahmen des Strukturmonitorings gewonnenen Messdaten erlaubten eine umfangreiche Analyse des beispielhaften Tragverhaltens der Tübbingtunnelschale der U5, insbesondere im Hinblick auf die Schnittgrößenentwicklung. Da die Messungen direkt nach dem Ringbau gestartet und danach kontinuierlich über mehrere Jahre weitergeführt wurden (und auch aktuell immer noch weiterlaufen), konnte die gesamte bisherige Schnittgrößenentwicklung erfasst und analysiert werden. Nachfolgend wird die beobachtete zeitliche Schnittgrößenentwicklung illustriert (Abb. 3).

In der Anfangs- und Bauphase entwickelten sich die Schnittgrößen (und auch die hier nicht weiter ausgeführten Verformungen der Tunnelschale) insbesondere im Zusammenhang mit dem Vortrieb und der vortriebsbegleitenden Ringspaltverpressung rasch, unterlagen aber großen und kaum zu erfassenden Schwankungen. Hierbei erreichten sie ein dem später erreichten Endzustand ähnliches Niveau und für kurze Zeiträume überschritten die Spannungen im Bauzustand jene des Endzustandes sogar geringfügig, wenn auch stets in einem unkritischen Bereich. An die Schnittgrößenentwicklung der frühen Bauphase schloss sich dann eine mehrere Monate andauernde Umlagerungsphase an. An deren Ende stabilisierten sich die Schnittgrößen bei nur mehr sehr geringen Änderungsraten. Die Schnittgrößen im Endzustand entsprachen weitestgehend den Erwartungen. Unter anderem bildete sich infolge einer höheren vertikalen als horizontalen Belastung ein hierfür typischer Momentenverlauf mit positiven Momenten im Firstbereich und negativen Momenten in den Ulmen aus. Die Schnittgrößen und deren Verläufe im Endzustand zeigten allerdings deutliche Unterschiede zu jenen des Anfangszeitraums. Dies wurde auf die jeweils unterschiedliche Spannungssituation zurückgeführt, die die Einwirkungen auf die Tübbingtunnelschale bestimmt. Im frühen Zeitraum wird die Spannungssituation stark durch die Ringspaltverpressung beeinflusst. Später entwickelt sie sich mit der Zeit eher zu jener, die durch den umgebenden Baugrund (v.a. Erd- und Grundwasserdrücke) erzeugt wird. Diese Spannungssituationen sind jedoch insbesondere hinsichtlich ihrer Verteilungen verschieden, was die Schnittgrößenveränderungen zwischen Bau- und Endzustand verursachte.

Neben dieser globalen zeitlichen Entwicklung der Schnittgrößen, konnten durch die Messungen auch zahlreiche weitere Mechanismen betrachtet werden (u.a. Entwicklung der Längskräfte, Einfluss des Baus der zweiten

Röhre auf die erste Röhre). Für diese Analysen wird auf die weiteren in diesem Zusammenhang erschienenen Publikationen verwiesen [u.a. 4].

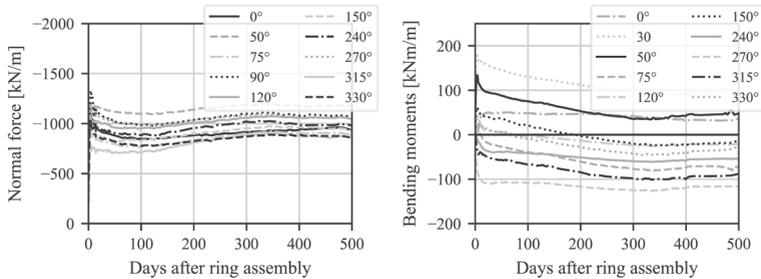


Abb. 3: Schnittgrößenentwicklung am Messring 2 über 500 Tage beginnend ab kurz nach dem Ringbau. Links: Normalkräfte, rechts: Biegemomente.

Vergleich von gemessenen und berechneten Schnittgrößen

Die gewonnenen Daten zur in-situ Schnittgrößenentwicklung ermöglichten weiterführende Untersuchungen. Diese zielten unter anderem auf die am Anfang dieses Beitrages genannten Unsicherheiten hinsichtlich der Übereinstimmung von tatsächlichen und berechneten Schnittgrößen ab [5].

Um dies zu untersuchen, wurden die mit fünf verschiedenen Berechnungsmodellen (Abb. 4) und zahlreichen möglichen Variationen berechneten Schnittgrößen den gemessenen gegenübergestellt. Die Berechnungsmodelle wurden nach etablierten Modellierungsempfehlungen [u.a. 6,7] ausgewählt und aufgebaut. Dies hatte zum Ziel die Ergebnisse von denjenigen Modellen in den Vergleichen zu betrachten, die auch tatsächlich in der aktuellen Ingenieurspraxis anzutreffen sind und mit denen reale Tübbingtunnelschalen bemessen werden.

Die Erkenntnisse aus den Vergleichen von Messungen und Berechnungen können wie folgt zusammengefasst werden. Hinsichtlich der Normalkraft ergab sich sowohl bezüglich ihres Niveaus als auch ihrer Verteilung entlang des Tunnelumfangs unter Ansatz realistischer Eingangswerte eine gute Übereinstimmung. Die Verläufe der Biegemomente konnten ebenfalls

gut durch die Berechnungsergebnisse reproduziert werden. Quantitativ zeigten sich bei den Biegemomenten – und damit auch bei den Spannungen – allerdings gewisse Unterschiede zwischen Messungen und Berechnungen. Dies war insbesondere dann der Fall, wenn mittlere Werte, für die im Tunnelbau üblicherweise in Bandbreiten bestimmbaren Eingangsparameter, angenommen wurden. Die ermittelten Unterschiede wurden einerseits darauf zurückgeführt, dass die in situ angetroffenen Randbedingungen nicht mittleren Eingangswerten, sondern eher jenen am äußeren Rand der möglichen Bandbreite entsprachen. Andererseits wurde ein Einfluss von Ringbauungenauigkeiten in den Tübbinglängsfugen auf die in-situ Schnittgrößenentwicklung vermutet. Solche Ringbauungenauigkeiten werden bei der Berechnung der Schnittgrößen üblicherweise nicht explizit berücksichtigt, beeinflussen diese aber in der Realität dadurch, dass Kräfte mit einer zusätzlichen Exzentrizität in die jeweiligen Segmente eingeleitet werden. Generell sind die Effekte von solchen Ringbauungenauigkeiten aus struktureller Hinsicht ungünstig. Weitere Untersuchungen zu deren Einfluss werden aktuell durchgeführt.

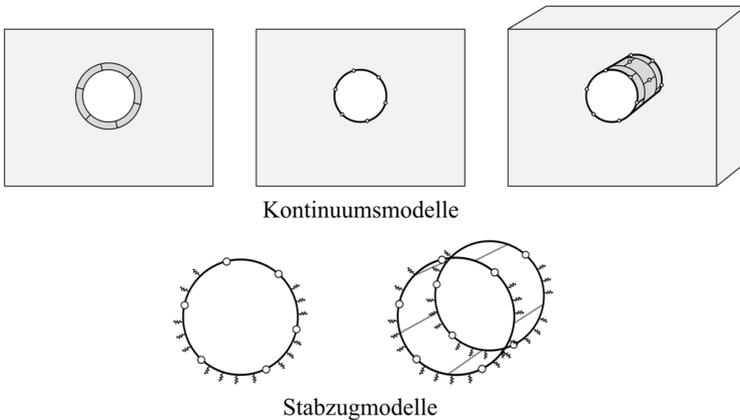


Abb. 4: Schematische Darstellung der fünf untersuchten Berechnungsmodelle.

Fazit

Das Tragverhalten von Tübbingtunnelschalen ist komplex. Mithilfe von im Rahmen eines Strukturmonitorings gewonnenen Messdaten konnte es am Beispiel der U5 in Frankfurt am Main intensiv beobachtet und analysiert werden. Auffällig hierbei waren die relativ großen Unterschiede zwischen den Schnittgrößen der Bauphase und des Endzustands, die allerdings jeweils zu vergleichbar großen maximalen und minimalen Spannungen führten. Aus wirtschaftlicher Hinsicht ist es jedoch wünschenswert, dass der deutlich längere Endzustand die maßgebenden Spannungen und Schnittgrößen verursacht. Um dies zu begünstigen ist eine hohe Bauqualität anzustreben. Insbesondere eine kontinuierliche und gleichmäßige Ringspaltverpressung könnte sich günstig auswirken. Zur Bauqualität zählt aber auch ein (ausreichend) präziser Ringbau, der sich – sofern nicht ausreichend präzise – aus struktureller Sicht negativ auf die Tübbingtunnelschale auswirken kann.

Die Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Schnittgrößen ergab im betrachtete Beispielfall Übereinstimmungen und Differenzen. Als Ursache für die Differenzen wurden, neben den in Berechnungen üblicherweise nicht berücksichtigten Effekten von Ringbauimperfectionen, Unsicherheiten hinsichtlich der tatsächlichen Werte der Eingangsparameter gesehen. Da diese im Tunnelbau typischerweise nur mit einer gewissen Bandbreite angegeben werden können, ist es wichtig im Rahmen der konstruktiven Bemessung Werte entlang der kompletten realistischen Bandbreiten in Form von Parameterstudien zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere, da sich geänderte Eingangswerte stark auf die berechneten Schnittgrößen auswirken können, es jedoch im Allgemeinen nicht möglich ist a priori festzulegen welche Parameterkombination die ungünstigsten Ergebnisse liefern wird.

Danksagung

Das Strukturmonitoring an der U5 in Frankfurt am Main wurde von der „Stadtbahn Entwicklung und Verkehrsinfrastrukturprojekte GmbH (SBEV)“ in Auftrag gegeben und finanziert.

Literatur

- [1] Budach, C., Kulkarni, R., Weiner, T., Kirchner, S.: Geotechnische und tunnelbautechnische Aspekte beim Bau der U5 in Frankfurt am Main. *Geotechnik*, 43 (4), 2020. S. 283-288.
<https://doi.org/10.1002/gete.202000028>
- [2] Rauch, F., Fischer, O.: Prognose der Schnittgrößen in Tunnelschalen aus Dehnungsmessungen – Grundlagen und Umsetzung, Kalibrierversuche im Tübbingversuchsstand und Monitoringergebnisse am realen Bauwerk. Tagungsband des 25. Münchener Massivbau Seminars, 2021.
- [3] Rauch, F., Fischer, O.: Application of a structural monitoring on segmental tunnel linings. *Structural Concrete*, 24 (6), 2023. S. 7779-7793. <https://doi.org/10.1002/suco.202300141>
- [4] Rauch, F., Fischer, O.: Structural Behavior of a Segmental Tunnel Lining Base on In-Situ Measurements. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 38 (4), 2024.
<https://doi.org/10.1061/JPCFEV/CFENG-4688>
- [5] Rauch, F., Oreste, P., Fischer, O.: Internal forces measured in segmental tunnel linings compared with numerical predictions obtained from state-of-the-art calculation methods used in engineering practice. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106084>
- [6] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB): Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen, 2024
- [7] Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik (ÖVBB): Richtlinie Tübbingssysteme aus Beton, 2009.