

Doctoral Thesis

Load-bearing behavior of highly stressed load transfer zones in segmental tunnel linings

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Doctor of Science in Civil Engineering
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Dissertation

Zum Tragverhalten von hoch beanspruchten Lastübertragungszonen im Segmenttunnelbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für
Bauingenieurwesen

von

Dipl.-Ing. **Clemens Proksch-Weilguni**, BSc
Matr.Nr.: 01325604

- Betreuer: O.Univ.Prof. Dr.-Ing. **Johann Kollegger**
Institut für Tragkonstruktionen
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/212-02, A-1040 Wien, Österreich
- Gutachter: Prof. Dr. **Walter Kaufmann**
Institut für Baustatik und Konstruktionen
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Stefano- Franscini Platz 5, Zürich, Schweiz
- Gutachter: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Bernhard Pichler**
Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/202-03, A-1040 Wien, Österreich

Wien, im Mai 2024

Vorwort

An dieser Stelle bedanke ich mich bei all den wunderbaren Menschen, die mich während meines Doktorats und bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt bzw. motiviert haben. Ohne diese Unterstützung wäre die Verwirklichung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Besonderer Dank gilt Prof. Johann Kollegger für seine Überzeugungsarbeit, die mich im Jahr 2019 zur Tätigkeit in der Wissenschaft bewegt hat. Während meiner Zeit am Institut hatte er stets ein offenes Ohr und unterstützte mich durch die unzähligen Fachdiskussionen. Seine außergewöhnliche Fähigkeit Probleme zu lösen und die Art und Weise, die individuellen Fähigkeiten und Interessen seiner Mitmenschen zu fördern, zu unterstützen und wertzuschätzen, haben mich während der gesamten gemeinsamen Zeit geprägt.

Großer Dank gilt Herrn Prof. Walter Kaufmann und Herrn Univ. Prof. Bernhard Pichler für die Begutachtung meiner Dissertation. Die hervorragenden und präzisen wissenschaftlichen Arbeiten von Herrn Professor Walter Kaufmann zum Thema der konzentrierten Lasteinleitung im Stahlbetonbau haben mich während meiner gesamten Dissertationszeit inspiriert. Professor Bernhard Pichler hat mich bereits in meiner frühen Studienzeit mit seiner Hingabe für die Bauingenieurwissenschaften begeistert, welche sich in hervorragenden Forschungsleistungen widerspiegelt. Die Zusagen für die Begutachtung meiner Forschungsarbeit haben mich besonders gefreut.

Ich bedanke mich bei all meinen Kolleginnen und Kollegen des Forschungsbereiches Stahlbeton- und Massivbau für die stets spannenden Diskussionen am Institut und die zahlreichen *Musestunden*.¹ Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit wäre in dieser Form nicht möglich gewesen ohne meinen großen Mentor der experimentellen Forschung Wolfgang Träger - danke für deinen Einsatz im Sinne der Tübbingforschung. Einen besonderen Stellenwert hat die Zeit mit meinem langjährigen Freund und Bürokollegen Wolfgang Bachofner. Ich danke dir für die fachlichen Diskussionen als auch den Austausch über die indirekt für die Dissertation relevanten Themen (Kaffeeextraktion, Strichstärken in Matlabplots, Bremssysteme von Rennrädern, der „richtige“ Zitierstil,...). Ebenfalls danke ich meiner mehrfachen Co-Autorin Marion Decker, den „numerical Bois“ Michael Rath und Franz Untermarzoner, den Post-Docs Tobias Huber, Philipp Preinstorfer, Hannes Wolfger und Stephan Fasching für die gute Zusammenarbeit.

Neben den direkt beteiligten Menschen gibt es weitere wichtige Unterstützer:innen, denen ich das Fundament dieser Arbeit verdanke. Vielen Dank meinen Eltern Martina und

¹Die Mensa der Akademie der bildenden Künste trägt den Namen „Die Muse“.

Gerhard, meiner Schwester Stefanie und meiner Großmutter Inge für die Unterstützung während meines Doktoratsstudiums.

Abschließend danke ich meiner (mental und physisch) ausdauernden Freundin Beate für die stetige Unterstützung, die Geduld bei den Abenden im Sinne der Forschung und die unvoreingenommenen, kritischen Fragen zu meiner wissenschaftlichen Arbeit ☺.

Kurzfassung

Bei der Errichtung von Infrastrukturbauten ist Stahlbeton mit seinen technischen Eigenschaften aus heutiger Sicht noch immer ein unverzichtbarer Baustoff. Der daraus resultierende hohe Bedarf macht Stahlbeton für einen erheblichen Anteil der globalen Emissionen verantwortlich. Diese Arbeit soll einen Beitrag leisten, in Zukunft effizientere Tragstrukturen planen, bemessen und verwirklichen zu können. Dazu wird das Tragverhalten von Lastübertragungszonen im Betonfertigteiltbau, insbesondere im Kontext von Tunnelauskleidungen, untersucht.

Diese kumulative Dissertation setzt sich aus zwei Hauptteilen zusammen. In Teil I, „Einführung“, werden in der Einleitung die Problemstellungen, die sich bei Lastübertragungszonen im Segmenttunnelbau ergeben, erläutert. Darauf aufbauend werden die Zielsetzung und die davon abgeleiteten Forschungsfragen dieser Arbeit definiert und im nächsten Abschnitt durch die Abgrenzungen präzisiert.

Im Kapitel der Grundlagen werden wichtige Aspekte der ein- und mehraxialen Druckfestigkeit von Beton behandelt. Hierbei werden die mehraxialen Spannungszustände gemäß ihres Ursprungs gegliedert und der praktisch relevante Fall der Überlagerung von Spannungszuständen betrachtet. Des Weiteren erfolgt eine eingehende Betrachtung zur Bemessung der Tübbing-Längsfuge, inklusive historischer Entwicklung, Stand der Technik und dem patentierten Bewehrungskonzept der TU Wien. Das Kapitel Methodologie gibt einen Überblick über die angewandten Forschungsmethoden. In der Zusammenfassung der Publikationen werden die wichtigsten Ergebnisse erläutert und in den gesamtheitlichen Kontext dieser Arbeit gesetzt. Ebenfalls wird auf die anfangs definierten Forschungsfragen eingegangen. Abschließend beinhaltet der Teil I eine Schlussfolgerung basierend auf den wichtigsten Erkenntnissen sowie einen Ausblick auf aktuell in Arbeit befindliche und zukünftige Forschungsthemen.

In Teil II, „Publikationen“, sind die drei Veröffentlichungen, welche allesamt ein Peer-Review-Verfahren durchlaufen haben, beigefügt. In der Publikation [1] wird anhand einer Literaturrecherche eine Forschungslücke bei Lastübertragungszonen in Bezug auf die Wechselwirkung von Lastausbreitung und Querbewehrung identifiziert. Um diese Lücke zu schließen, wurden experimentelle Tests am Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien durchgeführt, wobei Parameter wie Lastkonzentration, Bewehrungsgrad und Material zur Aufbringung der konzentrierten Last variiert wurden. Die Ergebnisse bestätigten den signifikanten Einfluss der Querbewehrung auf das Tragverhalten von Lastübertragungszonen mit reduzierter Kontaktfläche. Ein Ingenieurmodell wurde anhand von mechanischen Über-

legungen entwickelt, um die Tragfähigkeit von Lastübertragungszonen präziser vorhersagen zu können. Das Modell wurde durch experimentelle Versuche verifiziert und mit Daten der Literatur validiert. Im Vergleich zu existierenden Modellen in den europäischen Normen, die die Wechselwirkung zwischen Lastausbreitung und Querbewehrung vernachlässigen oder unzureichend abbilden, ermöglicht das vorgestellte Modell ein effizienteres Design für Lastübertragungszonen zwischen Fertigteilen aus Stahlbeton.

Die Publikation [2] behandelt das Bewehrungskonzept der TU Wien, das stumpf gestoßene Längsbewehrungsstäbe zur Lastübertragung im Fugenbereich verwendet. Dieses wurde unter Verwendung experimenteller Tests und numerischer Simulationen untersucht. Die Ergebnisse der Grundlagenversuche verdeutlichen das große Potential der verhältnismäßig einfachen, strukturellen Verbesserungsmaßnahme. Weiters wurden Aspekte der praktischen Anwendung untersucht. Eine Ausführungsvariante, bei der ein Abstand zwischen der Stirnfläche der Bewehrungsstäbe vorgesehen ist, wurde auf Grundlage der Versuchsergebnisse ausgeschlossen. Abschließend wird ein Vorschlag zur rechnerischen Berücksichtigung der Längsbewehrung präsentiert.

In der Publikation [3] wird die spezielle geometrische Situation einer Tübbing-Längsfuge anhand von Großversuchen im Maßstab 1:1 untersucht. Es werden Versuchskörper mit konventioneller Bewehrung dem neuen Bewehrungskonzept gegenübergestellt. Die experimentell ermittelten Bruchlasten werden mit ausgewählten Modellen der Literatur verglichen. Daraus ergibt sich der Bedarf, das in Publikation [1] anhand von zylindrischen Versuchskörpern vorgestellte Modell für die spezielle Situation der Tübbing-Längsfuge zu adaptieren. Hinsichtlich des neuen Bewehrungskonzeptes verdeutlichen die Ergebnisse das Potenzial, schlankere oder tragfähigere Tunnelschalen konstruieren zu können. Insgesamt trägt die Arbeit dazu bei, das Verständnis und die Effizienz des Designs von Lastübertragungszonen in vorgefertigten Betonelementen für den Tunnelbau zu verbessern.

Abstract

From today's perspective, reinforced concrete with its technical properties is still an indispensable building material in the construction of infrastructure buildings and is therefore responsible for a considerable proportion of global emissions. This work is intended to contribute to the design, dimensioning and construction of more efficient structures in the future. For reaching this goal, the load-bearing behavior of load transfer zones in precast concrete elements, especially in the context of tunnel linings, is investigated.

This cumulative dissertation consists of two main parts. In Part I, „Introduction”, the problems that occur in load transfer zones in segmental tunnel linings are explained. Based on this, the objectives and the resulting research questions of this thesis are defined and specified in the next section.

The fundamentals chapter deals with important aspects of the uniaxial and multiaxial compressive strength of concrete. The multiaxial stress states are classified according to their origin and the practically relevant case of simultaneously occurring stress states is discussed. Furthermore, the design of the longitudinal joint is considered in detail, including the historical development, the state of the art and the TU Wien reinforcement concept. The methodology chapter provides an overview of the research methods used in this thesis. In the summary of the publications, the most important results are explained and placed in the overall context of this work. The research questions defined at the beginning are also addressed. Finally, Part I contains a conclusion based on the most important findings as well as an overview of current and future research topics.

Part II, „Publications”, contains the three publications that were evaluated in peer review processes. Publication [1] identifies a research gap regarding the interaction of load distribution and transverse reinforcement in load transfer zones. To address this gap, experimental tests were carried out at the Institute of Structural Engineering at TU Wien, varying parameters such as load concentration, reinforcement ratio and material type used to apply the concentrated load. The results confirmed the significant influence of the transverse reinforcement in combination with the effects of load distribution on the load-bearing capacity of load transfer zones. An engineering model based on mechanical considerations was developed to predict the load bearing capacity of load transfer zones more accurately. The model was verified by experimental tests and validated with data from literature. Existing models in the European standards neglect or inadequately represent the interaction between load distribution and transverse reinforcement. The

presented model enables a more efficient design for load transfer zones of prefabricated concrete elements.

Publication [2] addresses the TU Wien reinforcement concept, which uses butt-jointed longitudinal reinforcement bars for the load transfer in the joint area. The reinforcement concept was investigated using experimental tests and numerical simulations. The results of the fundamental experiments illustrate the great potential of this relatively simple structural improvement. Aspects of the practical application were also investigated. A design alternative with a gap between the end faces of the reinforcing bars was excluded on the basis of the test results. Finally, a proposal for the computational consideration of the longitudinal reinforcement is presented.

Publication [3] discusses the special situation that occurs in the area of the longitudinal segment joint by conducting large-scale tests on a scale of 1:1. Test specimens with conventional reinforcement are compared with specimens designed with the TU Wien reinforcement concept. The experimentally determined ultimate loads are compared with certain models from literature. This results in the relevance of applying the model presented in Publication [1], which is originally verified on cylindrical test specimens, to the special situation of the longitudinal segment joint. With regard to the TU Wien reinforcement concept, the results illustrate the potential for designing thinner tunnel linings or increasing their load-bearing capacity. Overall, the work contributes to improve the understanding of the load bearing behavior and the efficiency of the design of load transfer zones in segmental tunnel linings.

Inhaltsverzeichnis

Teil I - Einführung	13
1 Einleitung	14
1.1 Problemstellung	14
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	16
1.3 Abgrenzung	19
2 Grundlagen	21
2.1 Einaxiale Druckfestigkeit von Beton	21
2.2 Mehraxiale Druckfestigkeit von Beton	22
2.2.1 Mehraxiale Spannungszustände - geometrische Umschnürungswirkung	23
2.2.2 Mehraxiale Spannungszustände - passive Umschnürungswirkung . .	27
2.2.3 Mehraxiale Spannungszustände - Überlagerung	29
2.3 Zur Bemessung der Tübbing-Längsfuge	30
2.3.1 Historische Entwicklung	30
2.3.2 Stand der Technik	33
2.4 TU Wien Bewehrungskonzept	36
3 Methodologie	38
4 Zusammenfassung der Publikationen	40
4.1 Publikation [1]	40
4.2 Publikation [2]	44
4.3 Publikation [3]	48
5 Schlussfolgerungen, Kritik und Ausblick	54
5.1 Schlussfolgerungen und Kritik	54
5.2 Ausblick und laufende Forschung	56
Literatur	59
Teil II - Publikationen	63
Publikation [1]	64

Publikation [2]	85
Publikation [3]	101
Publikationen und Konferenzbeiträge	112
Lebenslauf	115

Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Abstand zwischen der Stirnfläche der Längsbewehrung und der Kontaktfläche eines Betonkörpers
b	Abmessung des Betonkörpers/Tunnelsegments in Breitenrichtung
b_0	Abmessung der Lasteinleitungsfläche in Breitenrichtung
b_1	Abmessung der wirksamen Lastausbreitungsfläche in Breitenrichtung
d	Abmessung des Betonkörpers/Tunnelsegments in Dickenrichtung
d_c	Durchmesser des umschnürten Kernquerschnittes
d_0	Abmessung der Lasteinleitungsfläche in Dickenrichtung
d_1	Abmessung der wirksamen Lastausbreitungsfläche in Dickenrichtung
e	Geometrischer Versatz (Exzentrizität) zwischen zwei Tunnelsegmenten
f_{cm}	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons
f_{ctm}	Mittelwert der Zugfestigkeit des Betons
f_c	Betondruckfestigkeit
f_{ym}	Mittelwert der Streckgrenze der Bewehrung
f_y	Streckgrenze der Bewehrung
h	Höhe des Diskontinuitätsbereichs/Lasteinleitungsblocks
s_c	Abstand zwischen den Querbewehrungsebenen

Lateinische Großbuchstaben

A_{c0}	Lasteinleitungsfläche/unter Druckspannung stehende Kontaktfläche in der Tübbing-Längsfuge
A_{c1}	Wirksame Lastausbreitungsfläche
$A_{cc.e}$	Effektiv umschnürte Kernbetonfläche
A_{cc}	Umschnürte Kernbetonfläche
A_c	Querschnittsfläche des Betonelements
A_{sj}	Querschnittsfläche der wirksamen Längsbewehrung in der Kontaktfläche
A_{sl}	Querschnittsfläche der Längsbewehrung
A_s	Querschnittsfläche der Bewehrung
F	Kraft orientiert in Hauptbelastungsrichtung
$F_{cal.Bau}$	Rechnerische Tragfähigkeit gemäß Bauschinger [4]

$F_{cal.DAUB}$	Rechnerische Tragfähigkeit gemäß der Tübbing-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB) [5]
$F_{cal.EC2}$	Rechnerische Tragfähigkeit gemäß ÖNORM EN 1992-1-1[6] Abschnitt 6.7 / EC2-Entwurf [7] Abschnitt 8.6
$F_{cal.GPC0}$	Rechnerische Tragfähigkeit des GPC-Modells im Schnitt 0-0
$F_{cal.GPC1}$	Rechnerische Tragfähigkeit des GPC-Modells im Schnitt 1-1
$F_{cal.Schmidt-Thrö}$	Rechnerische Tragfähigkeit gemäß Schmidt-Thrö [8]
$F_{cal.Wichers}$	Rechnerische Tragfähigkeit gemäß Wichers [9]
F_{cal}	Rechnerische Tragfähigkeit
F_{cal}^*	Rechnerische Tragfähigkeit unter Berücksichtigung des Traglastanteils der wirksamen Längsbewehrung
F_{cm}	Querschnittswiderstand gemäß der mittleren Druckfestigkeit des Betons
F_{exp}	Experimentell ermittelte Tragfähigkeit
F_{sj}	Traglastanteil der wirksamen Längsbewehrung in der Kontaktfläche
F_{sl}	Querschnittswiderstand der Längsbewehrung
F_{sp}	Resultierende Spaltzugkraft
H	Höhe des Versuchskörpers
S	Betondruckstrebe

Griechische Buchstaben

ΔF_c	Traglastanteil der geometrischen Umschnürungswirkung
$\Delta F_{s,cc}$	Traglastanteil der passiven Umschnürungswirkung
ΔF_{sl}	Durch Referenzversuche ermittelte Traglaststeigerung der Längsbewehrung
η_{sl}	Ausnutzungsgrad der Längsbewehrung
ρ_l	Volumetrischer Bewehrungsgrad bezogen auf die Längsbewehrung $A_{sl}/(d^2 \cdot \pi/4)$
σ_{c0}	Spannung im Beton in der Lasteinleitungsfläche
σ_{c1}	Spannung im Beton in der wirksamen Lastausbreitungsfläche
σ_{cc}	Querdruckspannung im Beton verursacht durch passive Umschnürung
σ_c	Spannung im Beton
σ_{sj}	Spannung in der Stirnfläche der Längsbewehrung
σ_s	Spannung im Bewehrungsstahl
ε	Stauchung
$\varepsilon_{c,q}$	Querdehnung des Betons
ε_c	Stauchung des Betons

Teil I - Einführung

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung

Für Infrastrukturbauten mit einer Lebensdauer von 100 Jahren und mehr (z.B. 200 Jahre beim Brenner-Basistunnel [10]) ist Stahlbeton mit seinen technischen Eigenschaften aus heutiger Sicht noch immer ein unverzichtbarer Baustoff. Dabei erfüllt dieser die speziellen Anforderungen von Infrastrukturbauten wie z.B. die Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen und chemischen Belastungen zur Gewährleistung einer langen Nutzungsdauer und Betriebssicherheit

Ein spezielles Merkmal von Infrastrukturbauten im Vergleich zu anderen industriell gefertigten Produkten ist die Individualität der Bauwerke, welche durch ihren Prototypencharakter einen niedrigen Materialausnutzungsgrad zur Folge haben. Aufgrund des vergleichsweise niedrigen Rohstoffpreises wird Beton häufig als Massenbaustoff verwendet, wodurch zugunsten einer einfacheren Planung und Herstellung ein effizienter Materialeinsatz nur eine untergeordnete Rolle spielt. Der stetig steigende Ressourcenbedarf und die fortschreitende globale Erderwärmung auf Grund von Treibhausgasemissionen machen einen effizienten Umgang mit Rohstoffen immer wichtiger. Ein Ansatz zur Einsparung von Ressourcen ist neben der Optimierung des Herstellungsprozesses die effiziente Ausbildung von Tragstrukturen. Im Idealfall sollten Werkstoffe entsprechend ihrer Eigenschaften unter Berücksichtigung der bautechnischen Anforderungen optimal eingesetzt werden [11]. Dies bedeutet zum einen einen höheren Planungsaufwand und zum anderen eine an die modernen Baustoffe angepasste stetige Entwicklung der Normen und der darin enthaltenen mechanischen Modelle.

Eine Form von Infrastrukturbauten stellen Tunnel- und Stollenbauwerke dar, welche zum Zwecke der Energiegewinnung, der Erfüllung gesellschaftlicher Mobilitätsbedürfnisse oder der Wasserversorgung für den heutigen Lebensstandard nicht wegzudenken sind. Maidl et al. [12] beziffern die Geburtsstunde des maschinellen Tunnelbaus durch den Baustart des Themsetunnels in London im Jahre 1825. Nach der Fertigstellung dieses Pionierprojektes durch Marc Isambard Brunel im Jahre 1843 wurde 1869 erneut ein Tunnel unter der Themse errichtet, in dem erstmals gusseiserne Tübbinge verwendet wurden. Die Verwendung von

Tunnelsegmenten aus Stahlbeton fand erst in den 1930er Jahren ihre breite Anwendung [13] und ist mittlerweile in allen Teilen der Erde angekommen. Die rasante Entwicklung des Tunnelbaus zeigt sich in einer globalen Marktstudie aus dem Jahr 2019 [14] der International Tunnelling and Underground Space Association (ITA), welche zu dem Ergebnis kam, dass jährlich ca. 5200 km Tunnel vorgetrieben werden. Dies entspricht einem Umsatz von 125 Milliarden Euro und einer jährlichen Wachstumsrate von 9 % seit der letzten Marktstudie im Jahr 2016. Dies ist gemäß der Marktstudie eine 2,5-mal höhere Wachstumsrate im Vergleich zur Wachstumsrate der globalen Bauwirtschaft.

Die Besonderheiten der maschinellen Tunnelbauweise unter Verwendung von Tübbing (siehe Abbildung 1.1) im Vergleich zum konventionellen Massivbau sind die ausschließlich im Werk vorgefertigten Tunnelsegmente, die hohe Stückzahl baugleicher Elemente und die strikten Randparameter der Tunnelbohrmaschinen (TBMs). Dies führt zu der im Infrastrukturbau unüblichen Situation, dass eine Tragwerksoptimierung wie etwa die Reduktion der Tübbingdicke um wenige Zentimeter einen enormen Einfluss auf die ökologischen Auswirkungen des Gesamtprojektes hat. Durch die Reduktion der Tunnelschalendicke können sowohl erhebliche Mengen an Betonkubatur als auch Ausbruchsmaterial eingespart werden. Vor allem bei langen Tunnelröhren gibt es hier enormes Einsparungspotential.



(a) Tübbinglager für den Semmering-Basistunnel © ÖBB



(b) Maschineller Vortrieb im Semmering-Basistunnel © ÖBB

Abb. 1.1: Maschinelle Tunnelbauweise

Ein mit Tübbing errichteter Tunnel setzt sich entlang seiner Längsachse aus Tübbingringen zusammen. Jeder Tübbingring besteht aus sechs bis zehn Tunnelsegmenten, welche durch Fugen in Längs- und Umfangsrichtung begrenzt sind (siehe Abbildung 1.2a). Der maßgebende Faktor bei der Bemessung und dem Design der überwiegend normalkraftbeanspruchten Tübbinge ist die Ausbildung der Tübbing-Längsfuge [15, 8]. Um Abplatzungen im Bereich der Fugen zu vermeiden und eine wasserdichte Konstruktion herstellen zu können, wird der Querschnitt im Bereich der Lastübertragungszone verkleinert (siehe Abbildung 1.2b). Die Reduktion des Regelquerschnitts mit der Dicke d auf das Maß d_0 , welches der Abmessung des Gelenkhalses in Dickenrichtung entspricht, führt zu einer lokalen Last-

konzentration. Sowohl für die Ermittlung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit als auch für die konstruktive Durchbildung der Lastübertragungszone finden sich in der Ingenieurpraxis unterschiedliche Herangehensweisen. Die in Österreich und Deutschland aktuell gültigen Normen [6, 16] und Richtlinien [5, 17] für die Bemessung konzentrierter Lasteinleitungen in Betonbauteile wurden nicht für die besonderen Randbedingungen der Kraftübertragung in Tübbing-Längsfugen entwickelt. Sowohl die Geometrie der Betonfertigteile als auch die etablierten Bewehrungskonzepte unterscheiden sich zu anderen konstruktiven Elementen mit konzentrierter Lasteinleitung wie z.B. Brückenlagern, Betongelenken oder Ankerkörpern von Spanngliedern. Obwohl die Modelle der genannten Richtlinien auf empirischen Versuchen basieren, sind für diesen speziellen Parameterraum nur wenige Versuchsdaten vorhanden. Sowohl der Forschungsbedarf bezüglich der mechanischen Modellbildung als auch eine mögliche strukturelle Verbesserungsmaßnahme bilden die Problemstellung der vorliegenden Arbeit.

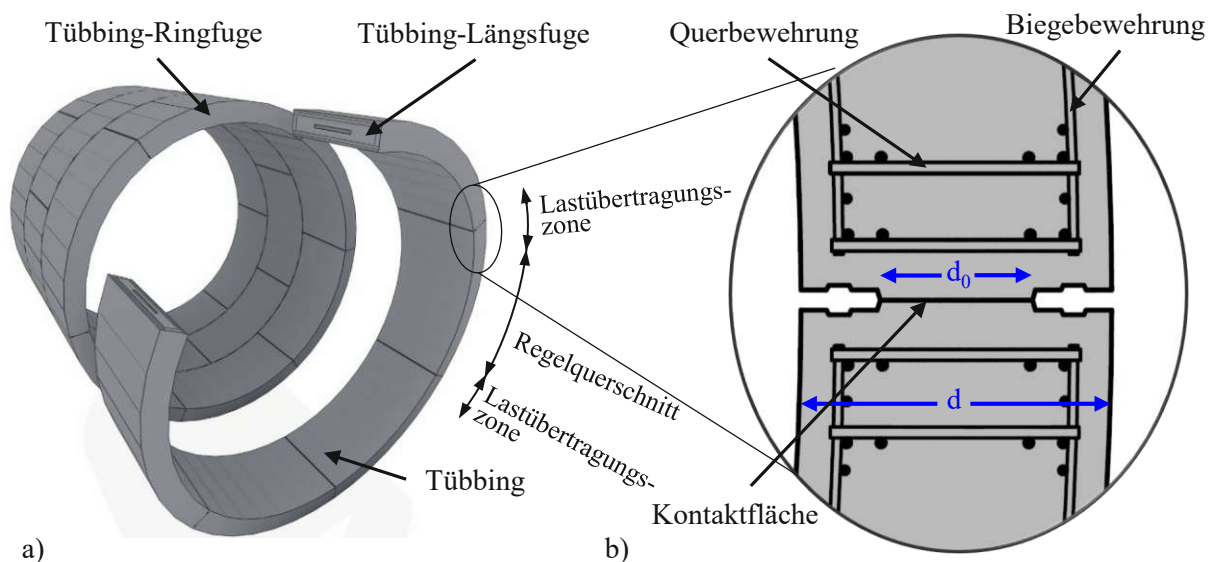


Abb. 1.2: Maschinelle Tunnelbauweise: a) Tragstruktur, b) Detail der Lastübertragungszone

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Ausgehend von der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Problemstellung, widmet sich die vorliegende Arbeit der Untersuchung von druckbeanspruchten Lastübertragungszone zwischen Betonfertigteilen mit dem Fokus auf die Anwendung im Segmenttunnelbau. Die Forschungsfrage dazu lautet:

Wie können hoch beanspruchte Lastübertragungszone im Segmenttunnelbau effizienter ausgebildet werden? (Publikation [1, 2, 3] und Rahmenschrift)

Die Fragestellung gliedert sich in weitere Unterforschungsfragen, welche zwei Betrachtungsebenen zugeordnet werden können. Zum einen wird auf Ebene der rechnerischen Nachweisführung die realitätsnahe Abbildung der mechanischen Tragmechanismen verbessert. Zum anderen wird ein von der TU Wien entwickeltes Bewehrungskonzept untersucht, welches der Ebene der strukturellen Verbesserung zugeordnet wird. Beide Herangehensweisen können in weiterer Folge zu effizienteren Tragstrukturen führen. Die spezifizierten Detailfragestellungen werden entsprechend der zwei Ebenen wie folgt definiert.

Ebene 1: Realitätsnahe Abbildung der mechanischen Tragmechanismen in der Nachweisführung

- *Welche Tragmechanismen können für die Ermittlung der Traglast von druckbeanspruchten Lastübertragungszonen mit reduzierter Kontaktfläche identifiziert werden?* (Publikation [1], Rahmenschrift)
- *Welche Nachweisformate bilden den Stand der Technik bei der Bemessung von Lastübertragungszonen im Allgemeinen beziehungsweise beim Spezialfall Tübbing-Längsfuge?* (Publikation [1, 3], Rahmenschrift)
- *Wie gut eignen sich bestehende Nachweisformate für die Bemessung von hoch beanspruchten Lastübertragungszonen?* (Publikation [1, 2, 3], Rahmenschrift)
- *Wie können die identifizierten Tragmechanismen in einem neuen Modell möglichst realitätsnah beschrieben werden?* (Publikation [1])

Ebene 2: Strukturelle Verbesserung

- *Welchen Einfluss haben stumpf gestoßene Bewehrungsstäbe auf die Tragfähigkeit von druckbeanspruchten Lastübertragungszonen?* (Publikation [2, 3])
- *Wie kann die Traglaststeigerung unter Verwendung stumpf gestoßener Bewehrungsstäbe quantifiziert werden?* (Publikation [2, 3])
- *Welche Einflüsse müssen bei der baupraktischen Anwendung berücksichtigt werden?* (Publikation [2])

Sämtliche Fragestellungen werden in den drei veröffentlichten Publikationen abgehandelt. Die Forschungsfragen sind in Abbildung 1.3 der jeweiligen Publikation zugeordnet. In Publikation [1] liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung der mechanischen Tragmechanismen und der Möglichkeit, diese mit Hilfe von Ingenieurmodellen der Literatur abzubilden. Basierend auf der Literaturrecherche wird die zentrale Fragestellung zur Entwicklung eines neuen mechanischen Modells abgehandelt.

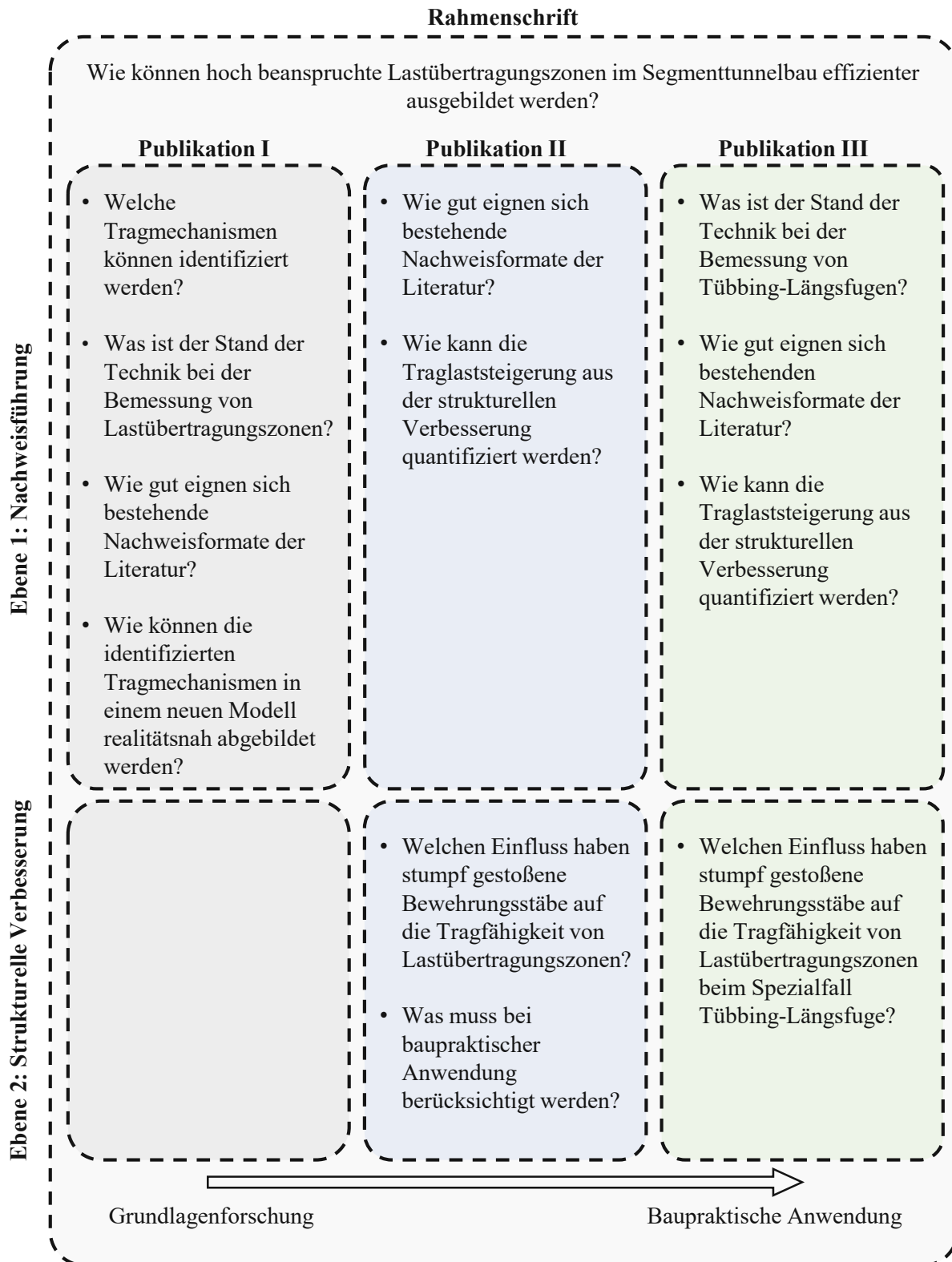


Abb. 1.3: Den Publikationen zugeordnete Forschungsfragen

In Publikation [2] wird der Fragestellung nach der Verbesserung auf struktureller Ebene nachgegangen. Dabei werden das an der TU Wien entwickelte Bewehrungskonzept und damit einhergehende baupraktische Anwendungsgrenzen untersucht.

Publikation [3] beschäftigt sich mit der Anwendung des TU Wien Bewehrungskonzeptes anhand einer möglichst realitätsnahen experimentellen Untersuchung einer Tübbing-Längsfuge. Einleitend wird das TU Wien Bewehrungskonzept alternativen strukturellen Verbesserungsmaßnahmen gegenübergestellt. Im Fokus der Publikation steht die Beantwortung der Frage, ob das neue TU Wien Bewehrungskonzept die rechnerische Traglaststeigerung im Vergleich zu den Referenzversuchen erzielen kann. Des Weiteren werden Vergleiche zwischen den Versuchsergebnissen und Modellen der Literatur durchgeführt.

1.3 Abgrenzung

Die übergeordnete Forschungsfrage zielt auf die „Effizienz“ von Lastübertragungszonen ab. Unter Effizienz ist aus Sicht des Autors der optimierte Einsatz von Ressourcen zu verstehen. Eine Bewertung erfolgt dabei nicht anhand der entstehenden Herstellungskosten, sondern basierend auf den aufgewendeten Massen eines Tragwerks, welche in materialunabhängige, ökologische Kennwerte wie z.B. das Global Warming Potential (GWP) überführt werden können. Durch eine präzisere Nachweisführung und den Einsatz struktureller Verbesserungsmaßnahmen können somit Tragstrukturen ausgebildet werden, die im Vergleich zu Ausführungen nach dem aktuellen Stand der Technik einen geringeren Ressourcenverbrauch aufweisen. Auf die ökologische Quantifizierung der Verbesserungsmaßnahmen wird in dieser Arbeit verzichtet. Begleitende Forschungsarbeiten zur Quantifizierung der Ressourceneffizienz bei Tunnelsegmenten werden in Abschnitt 5.2 erläutert.

Sämtliche experimentelle und numerische Untersuchungen der vorliegenden Arbeit beschränken sich auf zentrisch belastete Fertigteile aus Stahlbeton. Es sind keine Untersuchungen zu Momenten-Normalkraftinteraktionen angestellt worden. Es wurden weder zeitabhängige Effekte des Betons berücksichtigt noch Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten durchgeführt. Die Lastaufbringung erfolgte quasi-statisch, um dynamische Effekte ausschließen zu können und wurde in sämtlichen Versuchen bis zum eindeutigen Versagen der Versuchskörper gesteigert.

Für die Herstellung der Versuchskörper wurde ein im Tunnelbau üblicher Normalbeton verwendet. Die tatsächlich ermittelten mittleren Zylinderdruckfestigkeiten betrugen $f_{cm} = 43,6 - 55,6 \text{ N/mm}^2$. Des Weiteren wurde der in Österreich gängige Baustahl der Güteklasse B550B und ein hochfester Stahl für die gezielte strukturelle Verbesserung verwendet. Hochfeste Betone, die bekanntlich ein spröderes Versagen aufweisen, wurden in dieser Arbeit nicht untersucht. Die theoretischen Untersuchungen wurden unter Verwendung von Mittelwerten ohne der Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren durchgeführt.

Das in Publikation [1] vorgestellte mechanische Modell und die Fragestellungen in den Publikationen [2] und [3] beschäftigen sich mit der Vorhersage des Grenzzustandes der Tragfähigkeit von hoch beanspruchten Lastübertragungszonen. Die Stauchungen und Rissbilder der Versuchskörper wurden zur Untersuchung des Tragverhaltens herangezogen, jedoch wurde nicht auf die Gebrauchstauglichkeit der Bauteile eingegangen. Die Anwendungsgrenzen der zugrundeliegenden Versuche wurden jeweils in der Publikation selbst definiert. Effekte durch jenseits der Kontaktfläche liegende Biegebewehrung in Belastungsrichtung oder in der Praxis vorkommende Einbauteile bei Tübingen, wie z.B. ein Führungsstab, werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

Kapitel 2

Grundlagen

Mechanische Grundlagen bilden die Basis für das Verständnis von komplexen Tragstrukturen. Da die Grundlagen in den Publikationen [1, 2, 3] nur für die jeweils abgehandelten Teilgebiete zusammengefasst sind, werden in diesem Kapitel die in druckbeanspruchten Lastübertragungszonen relevanten Tragmechanismen und deren Wirkungsweise erläutert. Die Festigkeit von Beton wird durch das Auftreten von mehraxialen Spannungszuständen signifikant beeinflusst. Die einaxiale Druckfestigkeit kann zum Beispiel durch das Aufbringen von Querdruckspannungen normal zur Hauptbelastungsrichtung erhöht werden. Für eine ingenieurpraktische Verwendung werden in dieser Arbeit Spannungszustände entsprechend ihrer Entstehung unterschieden.

2.1 Einaxiale Druckfestigkeit von Beton

Betrachtet man Normalbeton im erhärteten Zustand als Werkstoff bestehend aus Zementmatrix und Zuschlag, stellt man fest, dass die Festigkeit und Steifigkeit der Zuschlagskörner wesentlich größer als die der Zementmatrix ist. Unter einaxialer Druckbelastung sind die Spannungen nicht konstant über den Querschnitt verteilt, sondern werden primär vom steiferen Zuschlag abgetragen. Durch die zufällige Verteilung der Zuschlagskörner und die dadurch entstehende Abweichung von dem außen aufgetragenen Spannungsfeld resultieren Zugspannungen quer zur Belastungsrichtung (siehe Abbildung 2.1).

Einflüsse beim Erhärtungsprozess wie das Schwinden des Zementsteins führen bereits im unbelasteten Beton zu Mikrorissen an den Kontaktflächen zwischen der Zementmatrix und den Zuschlagskörnern. Bereits bei Druckspannungen ab etwa 40 % der einaxialen Druckfestigkeit entstehen dort infolge der Querkzugspannungen weitere Mikrorisse. Durch ein stetiges Anwachsen der äußeren Druckkraft bilden sich mit dem freien Auge sichtbare Makrorisse, die hauptsächlich entlang der Zuschlagskörner verlaufen. Die sukzessiv wachsende Rissbildung führt zu einer Verringerung der Steifigkeit und dem typischen nicht linearen Spannungs-Dehnungsverhalten des Betons. Begleitend zur Längsstauchung kommt es zum Anstieg der Querdehnung des Betongefüges und schließlich zum Versagen der Betonstruktur.

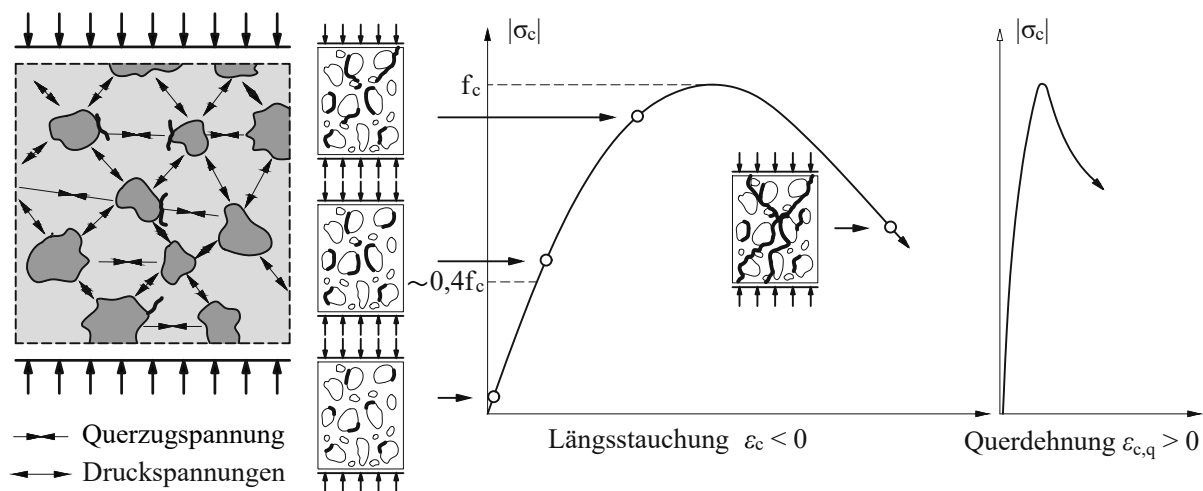


Abb. 2.1: Modell des Tragverhaltens von Normalbeton aus Zilch und Zehetmaier [18]

2.2 Mehraxiale Druckfestigkeit von Beton

In realen Tragwerken bilden einaxiale Spannungszustände, wie sie zum Beispiel beim Druckversuch am Zylinder oder bei Stützen vorkommen, eher die Ausnahme. Bei räumlichen Tragstrukturen wie Scheiben, Schalen oder in Bereichen von lokalen Lastenleitungen bilden sich hingegen mehraxiale Spannungszustände aus. Diese haben einen erheblichen Einfluss auf die tatsächliche Festigkeit des Betons. In Abbildung 2.1 ist ersichtlich, dass das Versagen einer druckbeanspruchten Betonstruktur von Querzugspannungen eingeleitet wird. Zusätzliche Druckspannungen orthogonal zur Lastenleitungsrichtung wirken entgegen der Querzugspannungen und erhöhen damit die Festigkeit und die Duktilität von Beton. Im Gegensatz dazu würden zusätzliche Zugspannungen orthogonal zur Belastungsrichtung zu einer geringeren Festigkeit führen.

Mehraxiale Spannungszustände können in der Praxis unterschiedliche Ursachen haben. Sie können zum Beispiel durch das Wirken eines hydrostatischen Wasserdruckes (Abbildung 2.2a), in konzentrierten Lastenleitungsbereichen (Abbildung 2.2b), durch die Aktivierung von Querbewehrung (in Abbildung 2.2c als ringförmiger Bügel dargestellt) oder durch die Ummantelung von Stützen mit faserverstärktem Kunststoffgewebe bzw. Stahlrohren (Abbildung 2.2d) auftreten. In den genannten Beispielen handelt es sich stets um den Spezialfall eines dreiaxialen Druckspannungszustandes. In der Literatur [19, 20, 21] wird hinsichtlich des Ursprungs des Querdrucks zwischen aktiver, geometrischer und passiver Umschnürung unterschieden.

Als aktive Umschnürung (*active confinement*) versteht man einen von außen aufgetragenen Querdruck, welcher unabhängig von der Belastung in Längsrichtung ist. Als Beispiel kann der Querdruck eines Triaxialtests an einem Zylinder genannt werden. Dabei erzeugt der Öldruck einen gleichmäßigen Querdruck auf die Mantelfläche des Zylinders

(siehe Abbildung 2.2a). Da die aktive Umschnürung keine praktische Relevanz für die Lastübertragungszonen im Segmenttunnelbau hat, wird nicht weiter darauf eingegangen, wohingegen die geometrische und passive Umschnürung im Folgenden genauer beleuchtet werden.

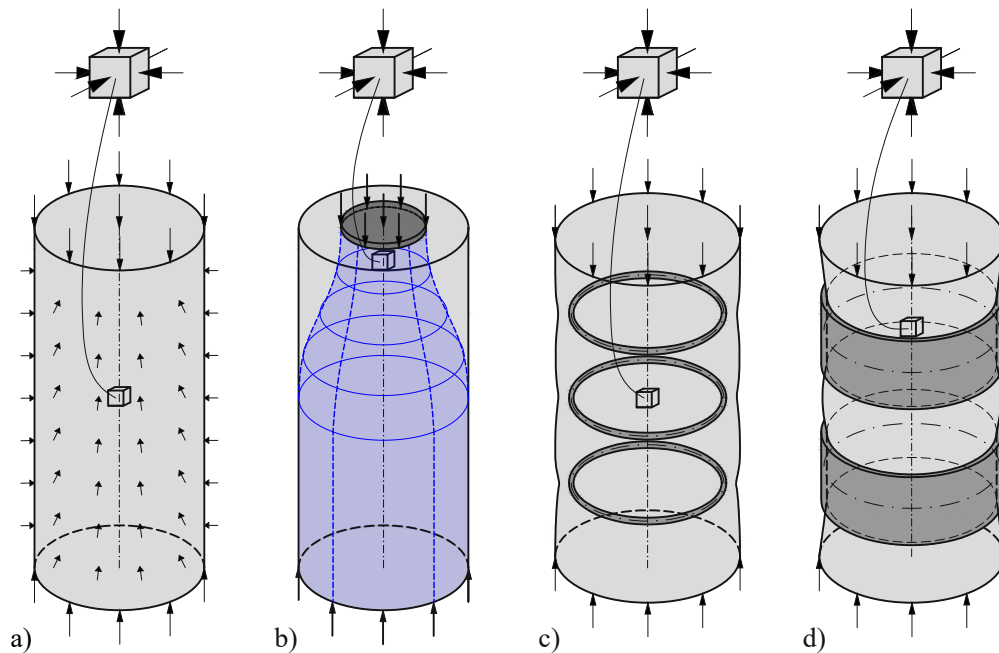


Abb. 2.2: a) Aktive Umschnürung am Beispiel eines Triaxialtests, b) geometrische Umschnürung direkt unterhalb einer konzentrierten Lastenleitung, c) passive Umschnürung am Beispiel eines Zylinders mit kreisförmiger Bügelbewehrung d) passive Umschnürung am Beispiel eines Zylinders mit Gewebeummantelung

2.2.1 Mehraxiale Spannungszustände - geometrische Umschnürungswirkung

Im Falle einer konzentrierten Lastenleitung kommt es zur Ausbreitung der Spannungen im Inneren des Festkörpers. Der Lastausbreitungsbereich zwischen der Lastenleitung und der Schnittebene, in der gleichmäßig verteilte Druckspannungen herrschen, wird als ST. VENANT'SCHER Störbereich (vgl. [22]) bezeichnet. Die Länge dieses Störbereichs h entspricht dabei der maßgebenden Abmessung in Lastausbreitungsrichtung (siehe dazu Abbildung 2.3). Durch die Umlenkung von Spannungstrajektorien werden Spannungskomponenten (Querzug- und Querdruckspannungen) orthogonal zur Belastungsrichtung (in x-Richtung und in y-Richtung) erzeugt. Die Querzug- und Querdruckspannungen treten bereits bei kleinsten Belastungen in Längsrichtung auf und können als unabhängig von den Querdehnungen gesehen werden. Markić et al. [20] bezeichnen den Effekt der auftretenden

Querdruckspannungen als *geometric confinement*, da lediglich durch die geometrische Situation einer belasteten Teilfläche eine Umschnürungswirkung entsteht.

Auf Grund der unterschiedlichen Ausbreitungsmöglichkeiten der Druckspannungen kann zwischen ebenen und räumlichen Lastausbreitungen unterschieden werden, welche wiederum ebene und räumliche Spannungszustände zur Folge haben.

Ebener/ Räumlicher Spannungszustand

Beim ebenen Fall der Lastausbreitung entspricht die Breite der Lasteinleitungsfläche b_0 der Breite der Lastausbreitungsfläche b_1 . Dadurch findet die Lastausbreitung im dargestellten Beispiel in Abbildung 2.3a lediglich innerhalb der yz -Ebene statt. Die Lastausbreitung erstreckt sich ausgehend von der Abmessung der Lasteinleitungsfläche in Dickenrichtung d_0 bis zur wirksamen Dicke d_1 . Dabei kommt es im gesamten Störbereich zu unterschiedlichen ebenen Spannungszuständen, welche bei der Bemessung von Scheiben mit konzentrierter Lasteinleitung berücksichtigt werden müssen. Eine räumliche Lastausbreitung, wie z.B. in Abbildung 2.3b dargestellt, ist durch die radiale Ausbreitung der Druckspannungstrajektorien in Bezug zur Belastungsrichtung gekennzeichnet. Die im dreidimensionalen Raum entstehenden Umlenkkkräfte führen im St. Venant'schen Lasteinleitungsbereich h zu dreiaxialen Spannungszuständen. Dieser Effekt tritt sowohl in rotationssymmetrischen als auch in prismatischen Bauteile auf.

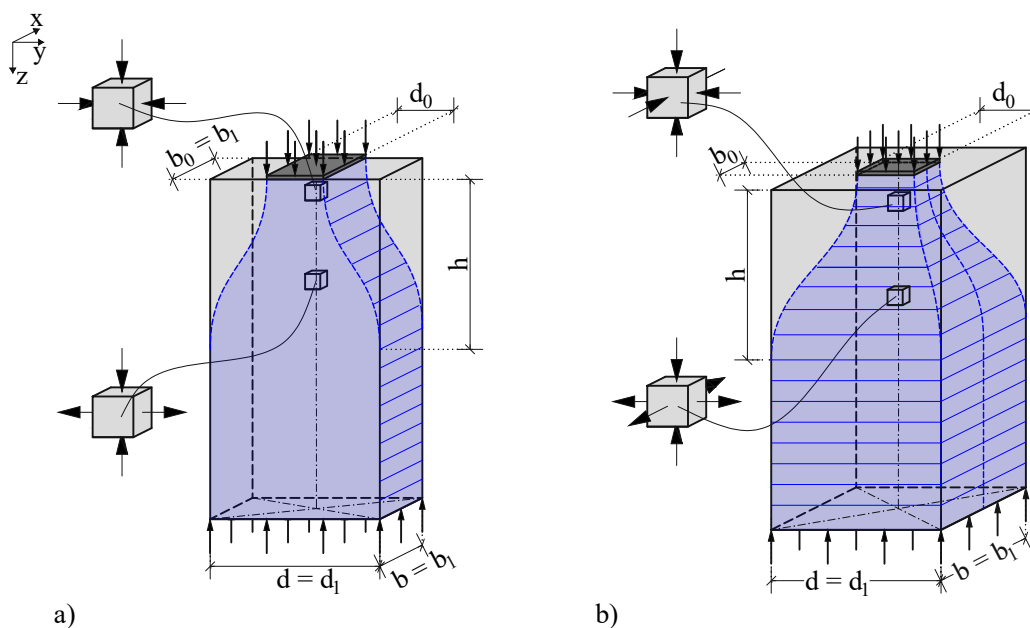


Abb. 2.3: Unterscheidung der Spannungszustände anhand der Lastausbreitungsmöglichkeit a) ebene Lastausbreitung, b) räumliche Lastausbreitung

Einen Spezialfall stellen linienförmige Bauteile dar, bei denen die Bauteilbreite signifikant größer als die Bauteildicke ist. Markić et al. [20] definieren den Übergang zwischen einer Scheibe und einem linienförmigen Bauteil mit der Bedingung $b_1 \geq 2 \cdot d_0$ (siehe dazu

Abbildung 2.4). Obwohl definitionsgemäß eine ebene Lastausbreitung vorliegt ($b_1 = b_0$), treten in diesem Fall dreidimensionale Spannungszustände auf. Der unbelastete Bereich neben der Lasteinleitungsfläche führt auf Grund der Bedingung nach geometrischer Kompatibilität zu einer Dehnungsbehinderung in Breitenrichtung (x-Richtung). Dadurch entsteht gemäß Abbildung 2.4 im Bereich direkt unter der Lasteinleitungsfläche ein dreiaxialer Druckspannungszustand und in den unbelasteten Bereichen daneben ein Zugspannungszustand in Breitenrichtung. Diese Spannungen sind maßgeblich von der Geometrie des Bauteils und der Lasteinleitungsfläche abhängig. Da die Zugspannungen bei unbewehrten Betonkörpern von der Zugfestigkeit des Betons aufgenommen werden müssten, sollte dieser dreidimensionale Effekt ohne zusätzliche Bewehrung in einer Nachweisführung nicht berücksichtigt werden. Als Praxisbeispiele für solch eine geometrische Situation können z.B. Tübbing-Längsfugen oder Streifenfundamente angeführt werden, welche üblicherweise bewehrt sind. Durch die geeignete Bewehrungsführung können in linienförmigen Bauteilen im Vergleich zu Scheiben durch die Überlagerung von Spannungszuständen dennoch dreidimensionale Effekte rechnerisch berücksichtigt werden (siehe dazu Abschnitt 2.2.3).

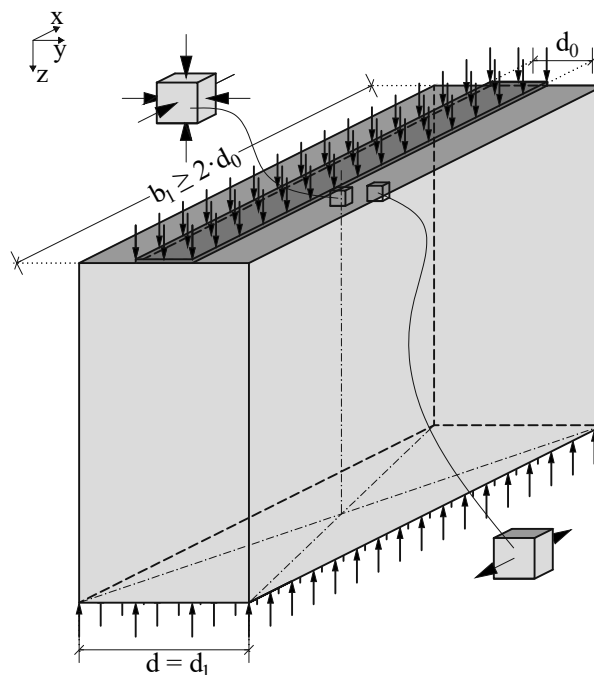


Abb. 2.4: Spannungszustände zufolge der Lastausbreitung in linienförmigen Bauteilen im Bereich der Lasteinleitungsfläche

Querdruck- und Querkzugspannungen

Im Falle einer konzentrierten Lasteinleitung (egal ob ebene oder räumliche Lastausbreitung) entstehen direkt unterhalb der Lasteinleitungsfläche Umlenkkräfte, welche orthogonal auf die in Abbildung 2.5a dargestellten Druckspannungstrajektorien orientiert sind. Die

Umlenkkräfte haben wiederum Querdruckspannungen gemäß Abbildung 2.5b orthogonal zur Hauptbelastungsrichtung zur Folge. Die Querdruckspannungen wirken sich positiv auf die Tragfähigkeit des Betons unterhalb der Lasteinleitungsfläche aus und werden der geometrischen Umschnürung zugeordnet. Beim Auftreten von mehraxialen Druckspannungszuständen kann die einaxiale Druckfestigkeit um ein Vielfaches überschritten werden. Für zweiaxiale Spannungszustände in Scheiben ergaben Untersuchungen von Kupfer [23], dass die aufnehmbaren Spannungen um bis zu 25% über der einaxialen Druckfestigkeit liegen können.

Im Abstand von ca. 0,25 bis 1,0 d_1 entstehen von der Achse der Hauptbelastungsrichtung nach außen orientierte Umlenkkräfte, welche zu Querkzugspannungen führen. Bei unbewehrten Bauteilen werden diese durch die Zugfestigkeit des Betons aufgenommen. Sowohl die Orientierung als auch die Größe der Querspannung ist vom Verhältnis der wirksamen Breite der Lastausbreitungsfläche d_1 zur Breite der Lasteinleitungsfläche d_0 abhängig.

Das bekannteste Modell zur Erfassung der Querkzugspannungen sowie der resultierenden Spaltzugkräfte geht auf die Arbeit von Mörsch [24] aus dem Jahre 1924 zurück. Darin fasste er die Querkzugspannungen mit Hilfe eines Stabwerkmodells gemäß Abbildung 2.5c zu einer resultierenden Spaltzugkraft zusammen und setzte diese auf halber Höhe des St. Venant'schen Lasteinleitungsbereich an. Im Zustand I werden die Querkzugspannungen vom Beton aufgenommen. Nach dem Erreichen der Zugfestigkeit können die Zugspannungen auf eine quer zur Hauptbelastungsrichtung verlegte Bewehrung umgelagert werden. Für die in Abbildung 2.5 dargestellte Scheibe ergibt sich die resultierende Spaltzugkraft F_{sp} gemäß Gleichung (2.1).

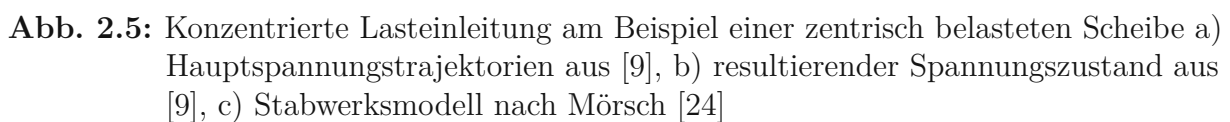
$$F_{sp} = \frac{F}{4} \cdot \left(1 - \frac{d_0}{d}\right) \quad (2.1)$$

mit:

- F_{sp} Resultierende Spaltzugkraft
- F Kraft orientiert in Hauptbelastungsrichtung
- d Abmessung des Betonkörpers in Dickenrichtung
- d_0 Abmessung der Lasteinleitungsfläche in Dickenrichtung

Das Stabwerkmodell lässt sich in analoger Weise auch für räumliche Lastausbreitungen konstruieren. Hiltcher und Florin [25] verdeutlichten anhand von numerischen Simulationen an Zylindern die günstige räumliche Wirkung der Lastausbreitung. In Bezug auf die aufnehmbare Traglast (F_{sp}/F) entstehen im räumlichen Fall deutlich geringere Spaltzugkräfte, welche mit zunehmender Lastkonzentration (= größer werdendem Verhältnis A_{c1}/A_{c0}) auch schneller abnehmen als im ebenen Fall.

In Publikation [1] wird ein räumliches Stabwerkmodell für einen rotationssymmetrischen Zylinder adaptiert.



Unter passiver Umschnürung (*passive confinement*) versteht man einen Querdruck, welcher erst durch das Auftreten von Querdehnungen aktiviert wird. Im unbelasteten und sehr gering belasteten Zustand herrscht demnach kein Querdruck (siehe Abbildung 2.6a). Durch steigende Belastung erhöht sich die Querdehnung und auch der Querdruck (siehe Abbildung 2.6b), was zu einem mehraxialen Druckspannungszustand führt. Wenn die einaxiale Druckfestigkeit erreicht ist, wird durch zunehmende Aktivierung der Querbewehrung und der damit einhergehenden Steigerung der Querdruckspannungen (siehe Abbildung 2.6c) eine weitere Laststeigerung ermöglicht. In dieser Phase kommt es zur Rissbildung in der Betondeckung, welche manchmal zum Abplatzen des nicht umschnürten Betonquerschnitts führt. Dieser kann zu diesem Zeitpunkt nicht mehr der Tragfähigkeit des Querschnitts zugerechnet werden. Trotz der Abplatzungen kann die Last, welche nur noch vom umschnürten Kernquerschnitt aufgenommen wird, bis zum Erreichen eines kritischen dreiaxialen Spannungszustandes gesteigert werden (siehe Abbildung 2.6d). Dieser wird durch das lokale Versagen des Betons beziehungsweise durch das Erreichen der Fließgrenze der Querbewehrung begrenzt. In der vorliegenden Forschungsarbeit wird lediglich die passive Umschnürungswirkung zufolge Querbewehrung behandelt, wodurch in weiterer Folge der Begriff *passive Umschnürung* immer im Kontext einer aktivierten Querbewehrung verwendet wird.

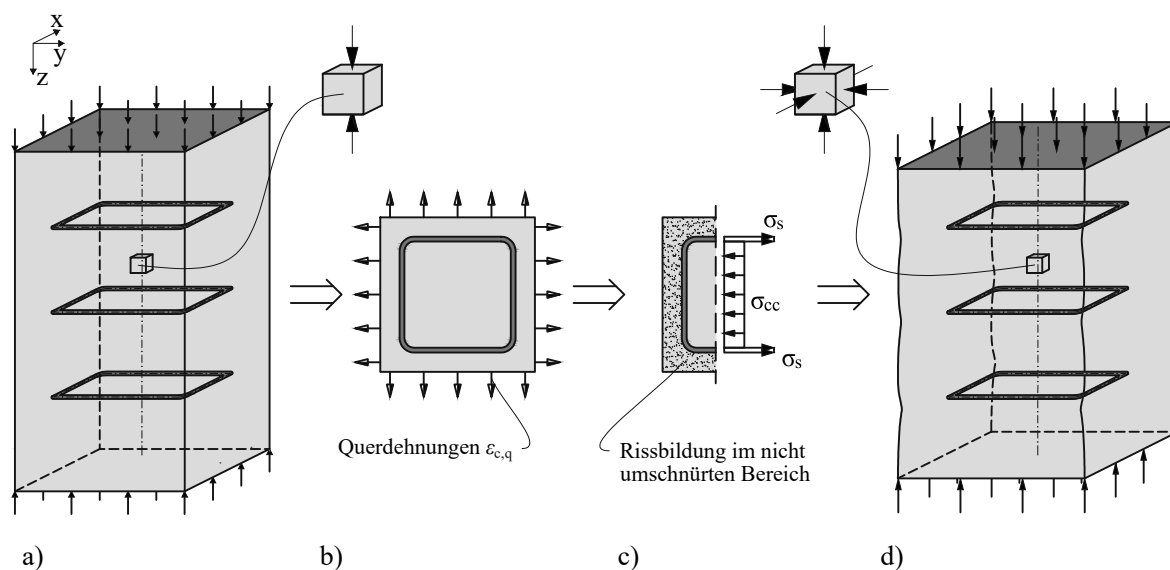


Abb. 2.6: Wirkungsweise von Umschnürungsbewehrung anhand eines prismatischen Stahlbetonkörpers a) gering belasteter Zustand, b) horizontaler Schnitt - Orientierung der Querdehnungen, c) Spannungsverteilung in Querrichtung nach Aktivierung der Querbewehrung, d) hoch belasteter Zustand

Ebener/ Räumlicher Spannungszustand

Die passive Umschnürung kann ebenfalls anhand der auftretenden Spannungszustände kategorisiert werden. Durch eine entsprechende Anordnung der Querbewehrung kann ein ebener Spannungszustand wie in Abbildung 2.7a generiert werden. Durch das Verlegen einzelner Bewehrungsstäbe orthogonal zur Hauptbelastungsrichtung wird die Querdehnung des prismatischen Körpers lediglich in eine Richtung behindert. Durch die freie Verformungsmöglichkeit des Betonkörpers parallel zu den Querbewehrungselementen stellt sich ein ebener Spannungszustand ein.

Im Gegensatz dazu ergibt sich durch eine kreuzweise verlegte Bewehrung orthogonal zur Hauptbelastungsrichtung ein dreidimensionaler Druckspannungszustand. Wie in Abbildung 2.7b dargestellt, unterbinden die kraftschlüssig verschweißten Querbewehrungselemente die ungehinderte Verformung des Betonkörpers. Die Effektivität der Umschnürungswirkung kann dabei von folgenden Faktoren beeinflusst werden:

- Der Geometrie der Querbewehrung (besonders geeignet sind dabei kreisförmige Bügel, Wendeln, rechteckige Bügel oder gitterartig verschweißte Leiterbewehrung).
- Dem Abstand zwischen der Querbewehrung in z-Richtung (parallel und orthogonal zur Belastungsrichtung).
- Dem Abstand zwischen den einzelnen Bewehrungsstäben in x-Richtung und y-Richtung, welche der Querbewehrung zugeordnet sind.

- Der Größe der Betondeckung beziehungsweise des nicht umschnürten Betonquerschnitts.
- Der Festigkeit und Duktilität des Bewehrungsstahls.
- Im Falle der Verwendung einzelner Bewehrungsstäbe zur Ausbildung der Querbewehrung (anstatt geschlossener Bügel) ist die Verankerung der Bewehrungsstäbe erforderlich, um die Kraftübertragung zwischen Beton und Stahl gewährleisten zu können.
- Der Festigkeit des Betons.

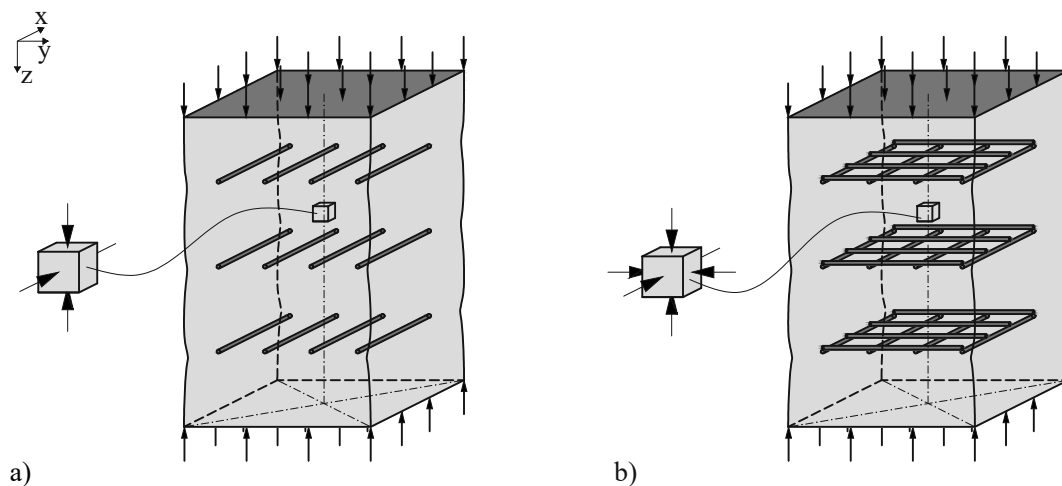


Abb. 2.7: Unterscheidung der Spannungszustände zufolge passiver Umschnürung a) ebener Spannungszustand, b) räumlicher Spannungszustand

2.2.3 Mehraxiale Spannungszustände - Überlagerung

In den europäischen Regelwerken [7, 6, 26] werden geometrische und passive Umschnürung getrennt voneinander behandelt. Der Effekt der geometrischen Umschnürung findet sich z.B. im Modell zur Teilflächenbelastung gemäß Abschnitt 8.6 des veröffentlichten EC2-Entwurfs [7] wieder. Darin wird die einaxiale Druckfestigkeit im Bereich der Kontaktfläche in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Lastausbreitungsfläche und Lasteinleitungsfläche erhöht. Dieses und weitere Modelle zur Bemessung von Lastkonzentrationen werden im Detail in Publikation [1] vorgestellt. Im EC2-Entwurf wird zwar eine Querbewehrung zur Aufnahme der Spaltzugspannungen gefordert, jedoch wird diese bei der rechnerischen Ermittlung der Traglast nicht berücksichtigt. Das wirft die Frage auf, wie gut dieses Nachweisformat die tatsächlich auftretenden Tragmechanismen abbilden kann.

Die Modelle zur Berücksichtigung passiver Umschnürung basieren meist auf vollständig gedrückten Stützenquerschnitten, bei denen stets die Grenztragfähigkeit des Regelquerschnitts ermittelt wird. Das Modell im EC2-Entwurf [7] zur Bemessung von passiv umschnürten Bauteilen wird für unterschiedliche geometrische Situationen in den Publikationen [1, 2] erläutert. Für die Überlagerung von Spannungszuständen aus geometrischer und passiver Umschnürung wird gemäß EC2-Entwurf [7] auf genauere Rechenverfahren, wie dreidimensionale Spannungsfelder, verwiesen. Ein einfaches Ingenieurmodell wird darin nicht angeführt.

In der Praxis kommt es allerdings häufig zur Überlagerung der aus geometrischer und passiver Umschnürung resultierenden Spannungszustände gemäß Abschnitt 2.2.1 und Abschnitt 2.2.2. Im Fall einer konzentrierten Lasteinleitung erzeugen die Querbewehrungselemente, welche zur Aufnahme der Querkzugspannungen dienen, bei entsprechender Dimensionierung auch eine passive Umschnürungswirkung. In Abbildung 2.8a ist der Fall der Überlagerung zweier ebener Spannungszustände zufolge geometrischer und passiver Umschnürung dargestellt. Da diese Überlagerung ebenfalls zu einem zweidimensionalen Spannungszustand führt, ist durch ein mögliches Versagen orthogonal zur Lastausbreitungsrichtung nur eine eingeschränkte Steigerung der einaxialen Druckfestigkeit unter der Lasteinleitungsfläche möglich.

Durch die Anordnung von zusätzlichen Querbewehrungselementen gemäß Abbildung 2.8b kann auch im Falle einer ebenen Lastausbreitung ein dreidimensionaler Spannungszustand generiert werden. Dieser kann das Versagen orthogonal zur Lastausbreitungsrichtung verhindern und damit deutlich höhere Traglasten ermöglichen als in der vorhergehenden Situation. Dieser Fall tritt zum Beispiel bei der Lastübertragung zwischen zwei Tunnelsegmenten auf.

Die Überlagerung zweier dreiaxialer Spannungszustände (siehe dazu Abbildung 2.8c) kommt zum Beispiel bei räumlich bewehrten Auflagerbereichen unter Brückenlagern oder bei bewehrten Ankerkörpern von Spanngliedern vor. Die möglichst realitätsnahe Abbildung der mechanischen Tragmechanismen, welche wiederum die unterschiedlichen Spannungszustände zur Folge haben, ist ein wesentlicher Bestandteil der abgehandelten Fragestellung dieser Dissertation.

2.3 Zur Bemessung der Tübbing-Längsfuge

2.3.1 Historische Entwicklung

Die ersten Versuche zur konzentrierten Lasteinleitung wurden 1876 von Bauschinger [4] anhand von Quadern aus Naturstein durchgeführt. Daraus resultierte der erste empirische Ansatz zur Beschreibung der Zunahme der einaxialen Festigkeit f_c (vgl. Gleichung (2.2)) unter Berücksichtigung von geometrischer Umschnürung. Die mathematische Formulierung des Flächenverhältnisses A_{c1}/A_{c0} unter der Kubikwurzelfunktion gilt als Vorläufer des in

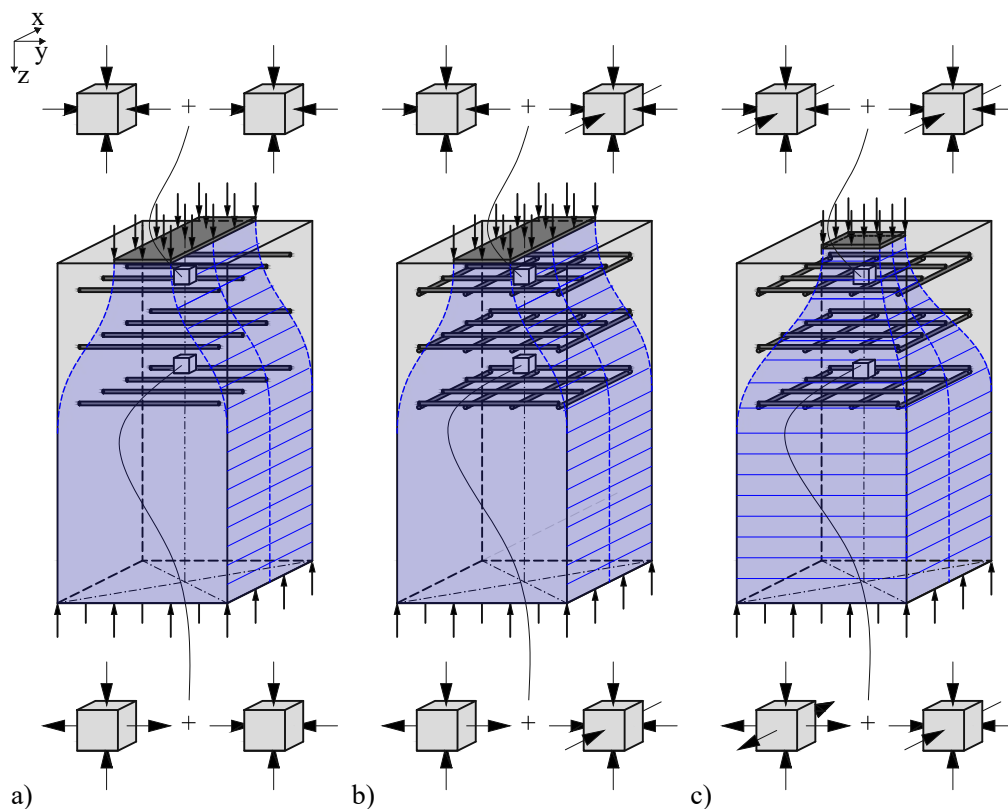


Abb. 2.8: Überlagerung von Spannungszuständen aus geometrischer und passiver Umschnürung a) eben + eben, b) eben + räumlich, c) räumlich + räumlich

den heutigen Regelwerken [6, 26, 27] verankerten Bemessungsansatzes für konzentrierte Lastenleitungen.

$$F_{cal.Bau} = A_{c0} \cdot f_c \cdot \sqrt[3]{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \quad (2.2)$$

mit:

$F_{cal.Bau}$	Rechnerische Tragfähigkeit gemäß Bauschinger [4]
f_c	Betondruckfestigkeit
A_{c0}	Lastenleitungsfläche
A_{c1}	Wirksame Lastausbreitungsfläche

Grundlage für den im EC2 [6] gültigen Quadratwurzelnansatz, welcher in Abschnitt 2.3.2 näher erläutert wird, ist die Dissertation von Spieth aus dem Jahr 1959 [28]. Darin wurde anhand von zehn unbewehrten und drei bewehrten zylindrischen Versuchskörpern der Einfluss der Betonfestigkeit, des Flächenverhältnisses A_{c1}/A_{c0} und der Variation des Durchmessers einer zusätzlichen Wendelbewehrung auf die Bruchspannung unter der Lastenleitungsfläche untersucht. Auf Grundlage von fünf der unbewehrten Versuchskörper

($A_{c1}/A_{c0} = 1,23$ bis 100) formulierte Spieth für die Ermittlung der Traglast die Funktion der Flächenverhältnisse unter der Quadratwurzel. Für die Bemessung empfahl er jedoch die Verwendung einer Querbewehrung und einen Sicherheitsfaktor von 2,5, da die drei bewehrten Versuchskörper ($A_{c1}/A_{c0} = 100$) ein wesentlich duktileres Versagen an den Tag legten. Eine direkte Berücksichtigung von vorhandener Querbewehrung gab es weder in der ursprünglichen Forschungsarbeit von Spieth [28, 29] noch in der aktuellen Fassung des EC2 [6].

Wurm und Daschner führten 1983 Versuche zur ebenen Lastausbreitung an bewehrten und unbewehrten Scheiben durch [30]. Sie kamen zu dem Schluss, dass sich der Kubikwurzelansatz (vgl. Gleichung (2.2)) sehr gut für die Abbildung der Tragfähigkeit von unbewehrten Scheiben eignet. Für bewehrte Scheiben wurde ein linearer Ansatz unter Berücksichtigung des geometrischen Querbewehrungsgrades vorgeschlagen, welcher mit maximal 0,8 % beschränkt wurde.

Auf Grundlage der Überlegungen von Wurm und Daschner [30] entwickelte Wichers im Jahr 2013 [9] anhand einer umfangreichen Literaturlatenbank einen für ebene und räumliche Lastausbreitungen geeigneten Ansatz. Dieser berücksichtigt ebenfalls die vorhandene Querbewehrung durch einen additiven Term, welcher mit einem Querbewehrungsgrad von 1 % begrenzt ist. Das Modell nach Wichers [9] wird in den Publikationen [1, 3] für Vergleichsberechnungen der experimentellen Versuchsergebnisse herangezogen.

An dieser Stelle ebenfalls erwähnenswert sind die Erkenntnisse, welche bei der Entwicklung von Betongelenken gewonnen wurden, bei denen es ebenso zur Steigerung der einaxialen Druckfestigkeit zufolge der Geometrie und der Querbewehrung kommt. Grundlegende Erkenntnisse dazu lieferte die Arbeit von Leonhardt et al. [31], in der 1965 anhand von experimentellen Untersuchungen ein Vorschlag zur Bemessung von Betongelenken präsentiert wurde. Ein Ansatz, in dem die passive Umschnürungswirkung durch ein mechanisches Modell und die geometrische Umschnürung mit einem empirischen Term berücksichtigt werden, wurde von Marx et al. [32] veröffentlicht. Ein weiterer Ansatz, mit dem sämtliche M-N-Kombination beim Erreichen des Grenzzustandes der Tragfähigkeit eines Betongelenkes abgebildet werden können, wurde von Schlappal et al. [33] vorgestellt. Das Modell kann als Erweiterung des Ansatzes von Leonhardt et al. [31] gesehen werden, in dem die Geometrie, die durchgehende Bewehrung in Hauptbelastungsrichtung und die Querbewehrung (durch die Steigerung der Duktilität) berücksichtigt werden. Trotz der Gemeinsamkeiten von Betongelenken und Tübbing-Längsfugen, müssen die Unterschiede hinsichtlich der Geometrie, der Ausbildung der Kontaktfläche (monolithisch verbunden bzw. trocken gestoßen), der durchgehenden Bewehrung in Hauptbelastungsrichtung (bei Betongelenken) und den unterschiedlichen Formen der Querbewehrung (z.B. Leiterbewehrung bei Tübbing-Längsfugen) berücksichtigt werden.

Für den speziellen Fall der Tübbing-Längsfuge entwickelte Schmidt-Thrö [8], basierend auf Versuchsdaten der Literatur und 32 eigens durchgeführten Versuchen, einen linearen

Ansatz zur Bemessung von konzentrierten Lasteinleitungen. Dieser Ansatz wird ebenfalls in den Publikationen [1, 3] vorgestellt und für Vergleichsberechnungen verwendet.

Der in der Historie aktuellste Ansatz zur Bemessung von konzentrierten Lasteinleitungen wurde 2022 von Markić et al. [34] vorgestellt und durch eine umfangreiche Versuchsserie in Markić et al. [34] verifiziert. Es handelt sich dabei um einen analytischen Ansatz, der auf der Spannungsfeldtheorie basiert. Dieses Modell berücksichtigt sowohl den geometrischen als auch den passiven Umschnürungseffekt und kommt ohne empirische Faktoren aus. Die Anwendung und Anpassung an verschiedene geometrische Situationen ist gegenüber den bisher genannten Bemessungsmodellen jedoch deutlich aufwendiger. Der Ansatz von Markić et al. [34] wird in weiterer Folge in Publikation [1] in den Vergleichsberechnungen berücksichtigt.

2.3.2 Stand der Technik

Als derzeitiger Stand der Technik hinsichtlich der Bemessung einer Tübbing-Längsfuge wird an dieser Stelle die Richtlinie des Deutschen Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB [5]) aus dem Jahr 2013 angeführt, welche auf der EN 1992-1-1 [6] Abschnitt 6.7 basiert. In diesem Ansatz wird der Effekt der geometrischen Umschnürungswirkung (Teilflächenpresung) durch eine geometrische Lastkonzentration hervorgerufen. Der daraus resultierende mehraxiale Spannungszustand führt zu einer Erhöhung der einaxialen Druckfestigkeit im Bereich der Kontaktfläche. Die Tragfähigkeit ($F_{cal.DAUB}$) der Kontaktfläche wird dabei gemäß Gleichung (2.3) ermittelt. Im Folgenden wird die Nachweisführung gemäß EN 1992-1-1 [6] und die Änderungen gemäß des EC2-Entwurfs aus dem Jahr 2023 [7] erläutert.

$$F_{cal.EC2} = A_{c0} \cdot f_c \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 \cdot A_{c0} \cdot f_c \quad (2.3)$$

mit:

$F_{cal.EC2}$	Rechnerische Tragfähigkeit gemäß EN 1992-1-1[6] Abschnitt 6.7 / EC2-Entwurf [7] Abschnitt 8.6
f_c	Betondruckfestigkeit
A_{c0}	Lasteinleitungsfläche
A_{c1}	Wirksame Lastausbreitungsfläche

Für die Verwendung von Gleichung (2.3) müssen einige geometrische und konstruktive Bedingungen eingehalten und alternative Versagensmechanismen ausgeschlossen werden. Die Unterschiede der einzuhaltenden Bestimmungen zwischen der EN 1992-1-1 [6] und des EC2-Entwurfs aus dem Jahr 2023 [7] sind in Tab. 2.1 zusammengefasst.

Weitere Neuerungen, welche thematisch in der EN 1992-1-1 [6] noch nicht behandelt wurden, sind in folgender Aufzählung zusammengefasst:

Tab. 2.1: Vergleich der einzuhaltenden Bedingungen zur Anwendung von Gleichung (2.3)

EN 1992-1-1: 2015 [6]	FprEN 1992-1-1: 2023 [7]
Auftretende Querkzugkräfte müssen berücksichtigt werden und sind in der Regel durch Bewehrung abzudecken - Details dazu finden sich im Abschnitt der Stabwerksmodelle	Die Querkzugkräfte müssen berücksichtigt werden und sind, sofern nicht durch genauere Berechnungen begründet, durch Bewehrung abzudecken - Für die Bemessung dürfen neben den Stabwerksmodellen auch Spannungsfelder verwendet werden.
Es wird allgemein darauf hingewiesen, das lokale Bruchverhalten zu berücksichtigen.	Es muss das Versagen zufolge Durchstanzen dezidiert ausgeschlossen werden.
Es muss eine gleichmäßige Spannungsverteilung auf der Fläche A_{c0} vorhanden sein. Auf ausmittige oder mehrere nebeneinander liegende Einzellasten wird nicht eingegangen. Rechnerische Verteilungsflächen dürfen sich jedoch nicht überschneiden.	Bei ausmittigen Belastungen muss die Lasteinleitungsfläche reduziert werden. Sowohl für ausmittige als auch für mehrere nebeneinander liegende Einzellasten ist ein explizites Beispiel für die Ermittlung der Lasteinleitungs- und Lastausbreitungsfläche angegeben.
Für die Lastausbreitungsfläche gelten folgende Bedingungen: $b_1 \leq 3b_0$ und $d_1 \leq 3d_0$ (siehe Abbildung 2.9a).	Die Länge der Lasteinleitungsfläche orthogonal zum nächstgelegenen Rand des Lasteinleitungsblocks ist als b_0 definiert. Für die Lastausbreitungsfläche gilt $b_1 = b$ und $d_1 = \min(b_0 + (b_1 - b_0); d)$ (siehe Abbildung 2.9b)
Die einzuhaltenden geometrischen Bedingungen für die Höhe h der Lastausbreitungszone sind in Abbildung 2.9a) dargestellt.	Die Mindesthöhe des Lasteinleitungsblocks ist mit $h \geq b_1$ definiert.
Die Lasteinleitungsfläche A_{c0} und die wirkliche Lastausbreitungsfläche A_{c1} müssen eine geometrische Ähnlichkeit aufweisen.	Die Bedingung der geometrischen Ähnlichkeit wird durch die Begrenzung der Lastverteilung auf den gleichen Abstand in beide Querrichtungen (siehe dazu Bedingungen für b_1 und d_1) ersetzt.

- Statt der Verwendung von Gleichung (2.3) darf der Bemessungswiderstand auch unter Berücksichtigung der günstigen Auswirkung von Umschnürungsbewehrung bestimmt werden. Genauere Angaben zur rechnerischen Vorgehensweise werden nicht angeführt.
- Es dürfen genauere Verfahren, wie dreidimensionale Spannungsfelder, zur Berücksichtigung der günstigen Auswirkung von Umschnürung durch Geometrie und durch Bewehrung angewendet werden.

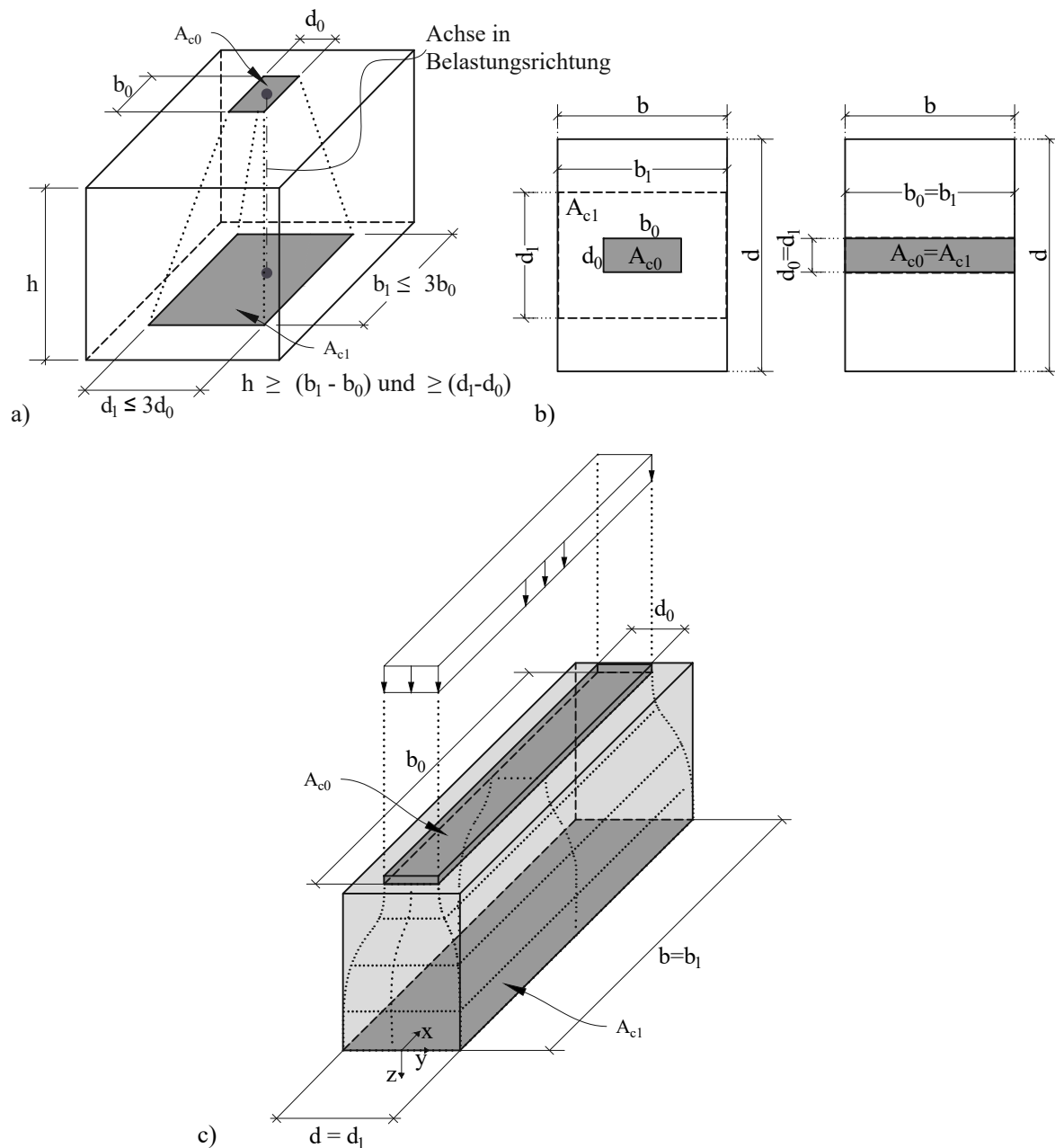


Abb. 2.9: Nachweis der Kontaktfläche einer konzentrierten Lasteinleitung gemäß a) EN 1992-1-1:2015 [6], b) FprEN 1992-1-1: 2023 [7], c) geometrische Definitionen für die Nachweisführung einer konzentrierten Lasteinleitung gemäß der DAUB Empfehlung für Tübbing-Längsfugen [5]

Bei der Nachweisführung der Kontaktfläche einer Tübbing-Längsfuge gemäß Gleichung (2.3) wird die Bedingung der geometrischen Ähnlichkeit bzw. der Begrenzung der Lastverteilung auf den gleichen Abstand in beide Querrichtungen in der Regel vernachlässigt. Die Teilflächen A_{c0} und A_{c1} ergeben sich bei einer zentrisch überdrückten Kontaktfläche gemäß Abbildung 2.9c. In der DAUB [5] wird dies durch den Verweis auf

experimentelle Untersuchungen begründet. Dieser Vorgehensweise liegt jedoch weder ein mechanisches Modell zugrunde noch gibt es klar definierte Anwendungsgrenzen hinsichtlich der Geometrie bzw. des Bewehrungslayouts einer „typischen“ Tübbing-Längsfuge.

Die relevanteste Änderung für die Bemessung einer Tübbing-Längsfuge gemäß des EC2-Entwurfs ist die Möglichkeit, genauere Verfahren zur Berücksichtigung der günstigen Auswirkung von Umschnürung durch Geometrie und Bewehrung berücksichtigen zu dürfen.

2.4 TU Wien Bewehrungskonzept

Am Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien wurde ein Konzept zur effizienten Traglaststeigerung von Tübbing-Längsfugen zum Patent angemeldet [35, 36], wobei dieses in China [37] als erstes Land bereits erteilt wurde. Das neuartige Bewehrungskonzept bietet eine Lösung für die in Abschnitt 1.1 beschriebene Problemstellung, wonach eine konventionell bewehrte Tübbing-Längsfuge als schwächstes Glied in einem Tübbingring maßgebend für die Bemessung eines Tübbings ist.

Die Idee ist, mit zusätzlichen Bewehrungsstäben, wie in Abbildung 2.10 in grün dargestellt, die Tragfähigkeit der Kontaktfläche A_{c0} zu erhöhen. Diese Bewehrungsstäbe werden mit den Stirnflächen bis an die Kontaktfläche A_{c0} herangeführt (siehe Abbildung 2.10b), wodurch sich nach Einbau der Tunnelsegmente ein stumpfer Bewehrungsstoß ergibt.

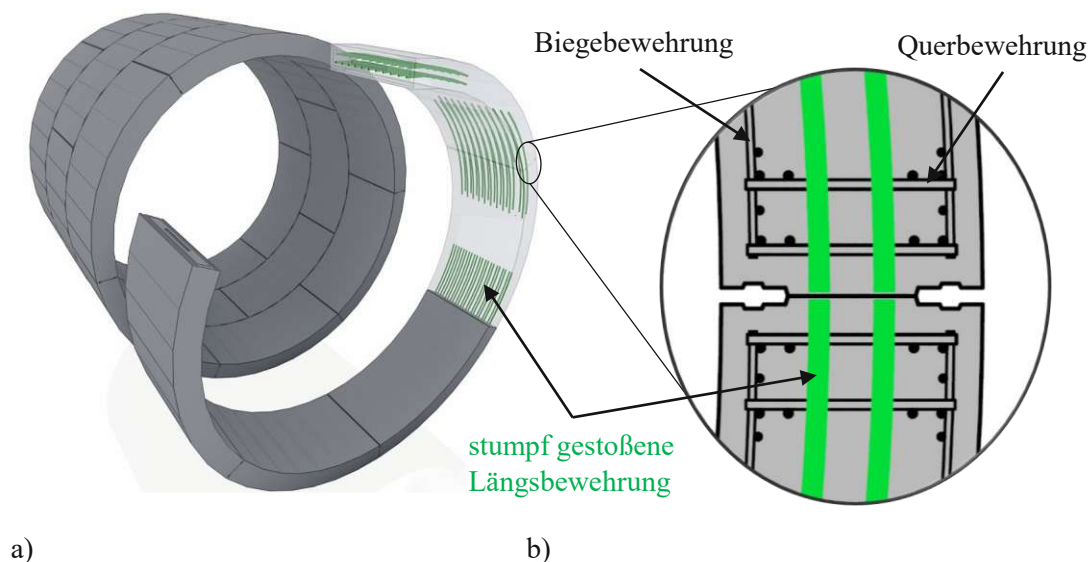


Abb. 2.10: TU Wien Bewehrungskonzept

Die im Tübbingring wirkende Drucknormalkraft kann somit zusätzlich über Kontaktspannungen zwischen den Bewehrungsstäben übertragen werden. Außerhalb der Lastübertragungszone werden die Druckspannungen durch die Verbundwirkung zwischen Stahl und Beton in den Regelquerschnitt übertragen, wodurch die Anordnung der Stäbe nur lokal notwendig ist (siehe Abbildung 2.10a). Die Erhöhung der Tragfähigkeit kann durch

die Anzahl der Bewehrungsstäbe an die Vorgaben der jeweiligen Lastsituation angepasst werden. Auch mögliche Einbauteile wie z.B. Führungsstäbe oder Schraubentaschen können bei der Anordnung berücksichtigt werden. In der Regel überwiegen im gesamten Tunnelring die Drucknormalkräfte, wodurch die erforderliche Betondeckung der Längsbewehrungsstäbe des TU Wien Bewehrungskonzeptes gewährleistet ist. Bei Biegemomenten, die aufgrund von asymmetrischen Lastfällen auftreten, kann es zum Klaffen der Tübbing-Längsfuge kommen. In diesem Fall müssen die Längsbewehrungsstäbe in der prognostizierten Druckzone angeordnet werden, um die Dauerhaftigkeit der Bewehrung durch eine Betonüberdeckung sicherstellen zu können.

Im Zuge dieser Arbeit wird das Tragverhalten des TU Wien Bewehrungskonzeptes untersucht. Zum einen stellt sich die Frage nach der Effektivität der stumpf gestoßenen Bewehrungsstäbe und zum anderen werden grundlegende Fragestellungen untersucht, die sich bei baupraktischer Anwendung ergeben.

Kapitel 3

Methodologie

Die in Abschnitt 1.2 definierten Fragestellungen werden in vorliegender Arbeit mit unterschiedlichen wissenschaftlichen Methoden bearbeitet.

In der Rahmenschrift wird durch eine Literaturrecherche und der damit einhergehenden Abbildung des Stands der Technik der Bogen zwischen zwischen den drei Publikationen gespannt. In den Publikationen wurden zum einen auf Ebene der Modellbildung zur möglichst realitätsnahen Abbildung der mechanischen Tragmechanismen Literaturrecherchen, theoretische mechanische Überlegungen und experimentelle Grundlagenversuche zur Verifizierung durchgeführt. Zum anderen kamen für die Untersuchung einer strukturellen Verbesserungsmaßnahme zur effizienteren Ausbildung von Lastübertragungszonen umfangreiche experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen zum Einsatz. In Abbildung 3.1 sind die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Methoden den Publikationen [1, 2, 3] und der Rahmenschrift zugeordnet. In Publikation [1] wird unter Anwendung theoretischer Methoden ein mechanisches Modell entwickelt und dieses durch Versuche verifiziert. Publikation [2] beschäftigt sich mit grundlegenden Untersuchungen zur an der TU Wien entwickelten, strukturellen Verbesserungsmaßnahme. In Publikation [3] wird die praktische Umsetzbarkeit der strukturellen Verbesserungsmaßnahme untersucht. Die drei Publikationen umfassen den Weg ausgehend von Grundlagenforschung bis hin zu Großversuchen, welche als Vorstufe zur praktischen Anwendung gesehen werden können.

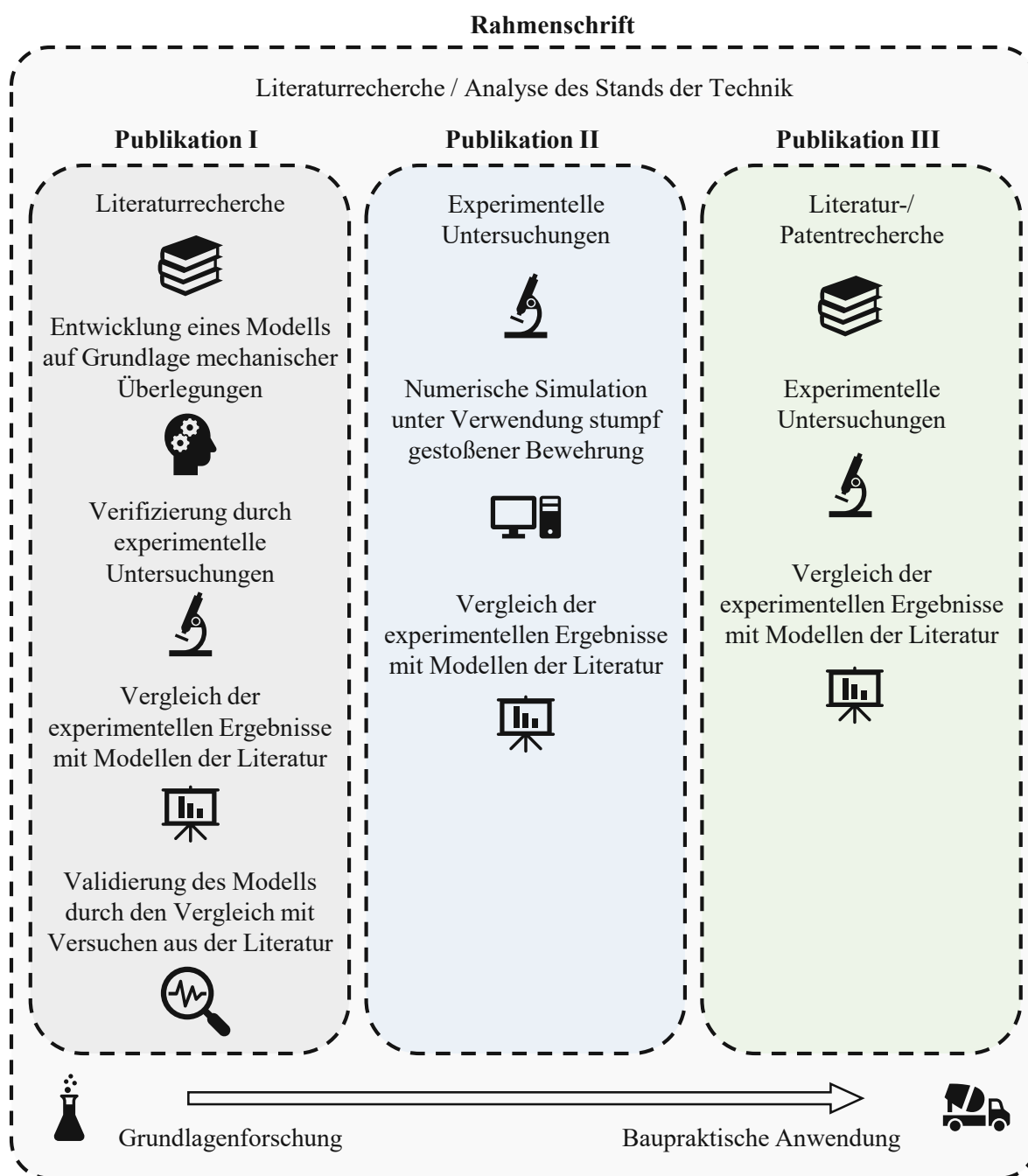


Abb. 3.1: Methodologie

Kapitel 4

Zusammenfassung der Publikationen

4.1 Publikation [1] Lastausbreitung und passive Umschnürung in Stahlbetonkörpern: Entwicklung eines mechanischen Modells

In der Publikation [1] werden auf Ebene der Nachweisführung folgende Forschungsfragen behandelt:

- *Welche Tragmechanismen können für die Ermittlung der Traglast von druckbeanspruchten Lastübertragungszonen mit reduzierter Kontaktfläche identifiziert werden?*
- *Welche Nachweisformate bilden den Stand der Technik bei der Bemessung von Lastübertragungszonen im Allgemeinen?*
- *Wie gut eignen sich bestehende Nachweisformate für die Bemessung von hoch beanspruchten Lastübertragungszonen?*
- *Wie können die identifizierten Tragmechanismen in einem neuen Modell möglichst realitätsnah beschrieben werden?*

Einleitend wird anhand der Entstehungsgeschichte der aktuell gültigen Nachweisformate zur Bemessung von Lastübertragungszonen die Notwendigkeit eines verbesserten mechanischen Modells erläutert. Die Lastübertragungszone im Fugenbereich zwischen zwei Tunnelsegmenten charakterisiert sich durch spezielle geometrische Eigenschaften und einen hohen Querbewehrungsgrad, dessen Tragverhalten weder mit dem aktuell gültigen Bemessungsmodell gemäß der EN 1992-1-1 [6] noch mit den Modellen des EC2-Entwurfs [7] ganzheitlich abgebildet werden kann.

Im zweiten Abschnitt der Publikation [1] werden die mechanischen Grundlagen betreffend der konzentrierten Lasteinleitung in Lastübertragungszonen erläutert. Dabei wird nicht nur zwischen geometrischer und passiver Umschnürungswirkung unterschieden, sondern es werden auch geometrische Randbedingungen zur Unterscheidung von ebenen und

räumlichen Spannungszuständen definiert. Da diese Grundlagen für die gesamte Arbeit von Relevanz sind, wurden diese in Kapitel 2 der Rahmenschift noch einmal ausführlicher zusammengefasst.

Neben den mechanischen Grundlagen werden fünf Bemessungsmodelle aus der Literatur gemäß Schmidt-Thrö [8], Wichers [9] und Markic et al. [34] bzw. aus dem aktuellen EC2-Entwurf [7] vorgestellt. Diese werden für die späteren Vergleichsberechnungen herangezogen.

Ausgehend vom Forschungsstand der Literatur und mechanischen Überlegungen wird in Abschnitt 3 der Publikation [1] das Geometric and Passive Confinement-Modell (GPC-Modell) für die Bemessung von Lastübertragungszonen vorgestellt. Folgende Vorteile werden im GPC-Modell vereint, wodurch es sich im Vergleich zu bestehenden Modellen der Literatur abhebt:

- Es werden die Traglastanteile zufolge geometrischer und passiver Umschnürungswirkung berücksichtigt.
- Die Lastübertragungszone wird im Nachweisverfahren ganzheitlich (vereinfacht durch zwei maßgebende Schnittebenen) entsprechend des Kraftflusses betrachtet.
- Aufgrund des kompakten Nachweisformates eignet es sich für eine direkte Implementierung in eine Richtlinie oder in eine Norm.

Für die ganzheitliche Betrachtung der Lastübertragungszone werden zwei Schnittebenen betrachtet. Schnitt 0-0 liegt auf Höhe der Kontaktfläche, in der sich die Traglast gemäß Gleichung (4.1) aus drei Komponenten zusammensetzt. Die erste Komponente F_{cm} wird der einaxialen Druckfestigkeit des Betons zugeordnet, die zweite ΔF_c der geometrischen Umschnürungswirkung und die dritte $\Delta F_{s.cc}$ der passiven Umschnürungswirkung.

$$F_{cal.GPC0} = \underbrace{F_{cm}}_{\text{im Schnitt 0-0}} + \Delta F_c + \underbrace{\Delta F_{s.cc}}_{\text{im Schnitt 0-0}} \quad (4.1)$$

Die Tragfähigkeit im Schnitt 1-1 ergibt sich gemäß Gleichung (4.2). Darin wird der traglastmindernde Effekt der Querkzugspannungen durch eine Abminderung der Komponente $\Delta F_{s.cc}$ berücksichtigt. Unter Berücksichtigung der Umschnürungswirkung darf lediglich der umschnürte Kernquerschnitt A_{cc} für die Ermittlung der Tragfähigkeit herangezogen werden.

$$F_{cal.GPC1} = \underbrace{F_{cm}}_{\text{im Schnitt 1-1}} + \underbrace{\Delta F_{s.cc}}_{\text{im Schnitt 1-1}} \quad (4.2)$$

Die Tragfähigkeit des Regelquerschnitts und im Übergangsbereich kann unter Berücksichtigung der vollen Querschnittsfläche A_c bestimmt werden. Die zwischen der letzten

Querbewehrungslage und dem Regelquerschnitt (Übergangsbereich) auftretenden Quersugspannungen werden in der Regel durch die Zugfestigkeit des Betons aufgenommen. Bei einer relativ großen Betondeckung oder einem sehr hohen Querbewehrungsgrad muss der Übergangsbereich im Detail betrachtet werden.

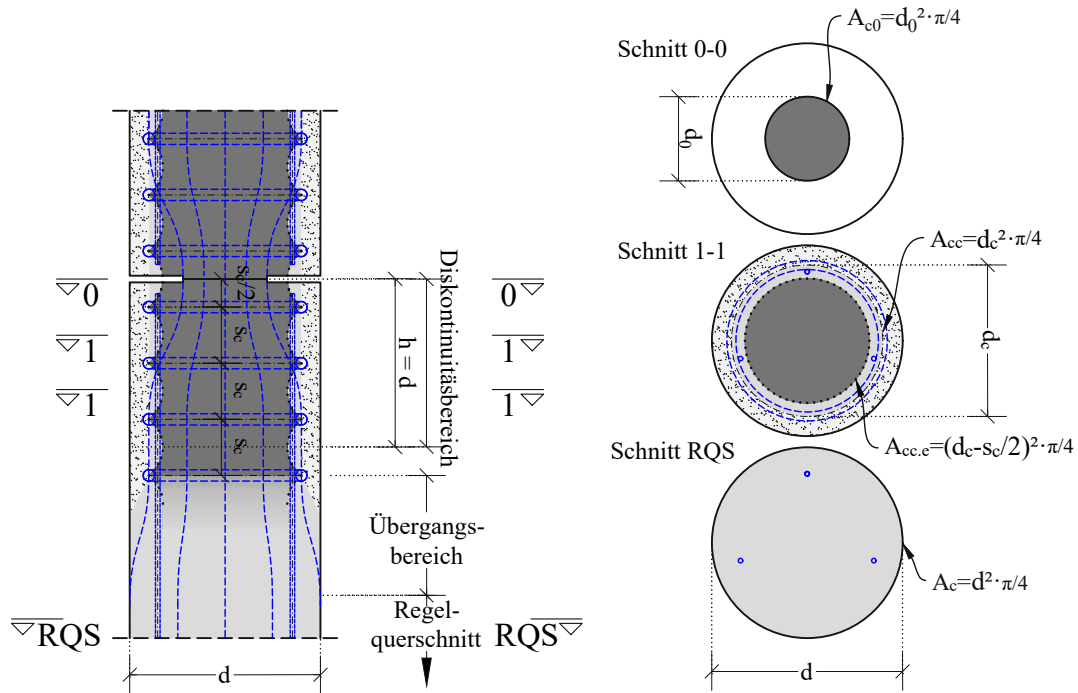


Abb. 4.1: Modellvorstellung der Lastausbreitung und passiven Umschnürungswirkung gemäß des GPC-Modells (entnommen aus Publikation [1] und adaptiert)

Zur Verifizierung des vorgestellten Modells wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm ausgearbeitet und im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen durchgeführt. In insgesamt 26 Versuchen an zylindrischen Versuchskörpern wurde das Tragverhalten der geometrisch und passiv umschnürten Lastübertragungszone systematisch untersucht. Zusätzlich wurden neben Lastübertragungszone (bestehend aus zwei Betonkörpern) auch teilflächenbelastete Versuchskörper unter Verwendung einer hochfesten Stahlplatte getestet. Dabei wurde bei zwei ausgewählten Versuchsreihen anstatt des zweiten Betonkörpers eine hochfeste Stahlplatte für die Lasteinleitung verwendet. Der Einfluss ist von Interesse, da die in Publikation [1] vorgestellten Modelle der Literatur großteils an Versuchsaufbauten unter Verwendung von Stahlplatten entwickelt wurden.

Die experimentellen Untersuchungen ergaben eine deutliche Steigerung der einaxialen Druckfestigkeit in der Kontaktfläche ($\sigma_{c0} \gg f_{cm}$), welche sich sowohl auf die Wirkung der geometrischen als auch der passiven Umschnürungswirkung zurückführen lässt. Im Vergleich mit den fünf ausgewählten Modellen der Literatur schneidet das GPC-Modell, neben der Theorie der Spannungsfelder, am besten ab. Der Einfluss der Stahlplatte zur

Lasteinleitung kann für das ausgewählte Bewehrungslayout mit 4,5 % bis 6,5 % angegeben werden. Auch wenn bei abweichendem Querbewehrungsgrad größere Einflüsse durch den Versuchsaufbau mit Stahlplatte zu erwarten sind, kann die ermittelte Schwankungsbreite für Vergleichsberechnungen mit Daten der Literatur herangezogen werden.

Um den Parameterraum für die Anwendbarkeit des GPC-Modells zu erweitern, werden insgesamt 57 Versuchsdaten der Literatur und 24 eigene Versuche für einen Vergleich herangezogen. Für die Nachrechnung der Traglast mit dem GPC-Modell müssen gewisse Kriterien erfüllt sein. Eines davon ist, dass die Dokumentation der Geometrie und des Bewehrungslayouts vollständig nachvollziehbar sein muss.

Dadurch wurde die Anzahl der verfügbaren Datensätze aus der Literatur auf 57 Versuche beschränkt. Mit einem mittleren Ausnutzungsgrad $F_{exp}/F_{cal.GPC}$ von 1,16 (Variationskoeffizient = 13 %) liefert das GPC-Modell auch unter Verwendung der Literaturdatenbank ein zufriedenstellendes Ergebnis. Einer der Gründe für die Abweichung kann auf den in der Literatur vielfach verwendeten Versuchsaufbau mit Stahlplatte für die Lasteinleitung zurückgeführt werden.

Mithilfe der Literaturrecherche, den experimentellen Untersuchungen und der Vergleichsberechnung mit verfügbaren Literaturdaten konnten folgende Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen gewonnen werden:

- *Welche Tragmechanismen können für die Ermittlung der Traglast von druckbeanspruchten Lastübertragungszonen mit reduzierter Kontaktfläche identifiziert werden?* Es können zwei Mechanismen, welche zu einer Steigerung der Betondruckfestigkeit über die einaxiale Festigkeit hinausführen, benannt werden: zum einen die geometrische Umschnürungswirkung, welche durch die Umlenkung von Spannungstrajektorien hervorgerufen wird, und zum anderen die passive Umschnürungswirkung der Bewehrung, welche durch die Querdehnungsbehinderung der Betonstruktur aktiviert wird.
- *Welche Nachweisformate bilden den Stand der Technik bei der Bemessung von Lastübertragungszonen im Allgemeinen?* Die im aktuellen EC2-Entwurf [7] veröffentlichten Ansätze stellen den normativ geregelten Stand der Technik dar. Des Weiteren wurden die Berechnungsansätze nach Schmidt-Thrö [8], Wichers [9] und die Verwendung von Spannungsfeldern gemäß Markic et al. [34] als geeignetste Ansätze der Literatur identifiziert und für die Vergleichsberechnungen herangezogen.
- *Wie gut eignen sich bestehende Nachweisformate für die Bemessung von hoch beanspruchten Lastübertragungszonen?* Bei Anwendung auf die 26 durchgeführten Versuche lieferte die Theorie der Spannungsfelder die besten Ergebnisse. Die anderen, deutlich einfacheren Berechnungsansätze eignen sich jeweils nur bei eingeschränk-

ten Parameterräumen in Abhängigkeit der Geometrie des Betonkörpers und des Bewehrungslayouts.

- *Wie können die identifizierten Tragmechanismen in einem neuen Modell möglichst realitätsnah beschrieben werden?* Zur realitätsnahen Abbildung der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der identifizierten Tragmechanismen wurde das *Geometric and Passive Confinement-Modell* (GPC-Modell) entwickelt. Die gute Performance des Modells konnte anhand der eigens durchgeführten Versuchen verifiziert und aufgrund der ausgewählten Versuchsdaten der Literatur validiert werden. Das einfache Nachweisformat bietet großes Potential für die breite Anwendung in der Ingenieurpraxis.

4.2 Publikation [2] Hochbelastete Lastübertragungszonen mit stumpf gestoßener Bewehrung: Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen

In Publikation [2] werden folgende Forschungsfragen behandelt:

- Auf Ebene der Nachweisführung:
 - *Wie gut eignen sich bestehende Nachweisformate für die Bemessung von hoch beanspruchten Lastübertragungszonen?*
 - *Wie kann die Traglaststeigerung unter Verwendung stumpf gestoßener Bewehrungsstäbe quantifiziert werden?*
- Auf Ebene der strukturellen Verbesserungen
 - *Welchen Einfluss haben stumpf gestoßene Bewehrungsstäbe auf die Tragfähigkeit von druckbeanspruchten Lastübertragungszonen?*
 - *Welche Einflüsse müssen bei der baupraktischen Anwendung berücksichtigt werden?*

Einleitend wird in Publikation [2] das TU Wien Bewehrungskonzept erläutert, welches auch in Abschnitt 2.4 vorgestellt wird. Eine Grundlage für die Anwendung des Bewehrungskonzeptes, welches konzeptionell in Abbildung 4.2 dargestellt ist, ist die Überprüfung der Wirkungsweise einer druckbeanspruchten Lastübertragungszone unter Verwendung von stumpf gestoßenen Bewehrungsstäben. Hinsichtlich der baupraktischen Anwendung des TU Wien Bewehrungskonzeptes wird der Einfluss von geometrischen Exzentrizitäten e untersucht (siehe Abbildung 4.2c). Des Weiteren wird eine alternative Ausführungsvariante, in der die Längsbewehrungsstäbe mit einem Abstand a zur Kontaktfläche angeordnet sind, getestet (siehe Abbildung 4.2d). In Publikation [2] wird lediglich das Tragverhalten von zylindrischen Lastübertragungszonen mit stumpf gestoßenen Bewehrungsstäben unter

Berücksichtigung von passiver Umschnürungswirkung untersucht. Die in einer Tübbing-Längsfuge vorliegende geometrische Situation, welche eine Lastausbreitung und eine damit einhergehende geometrische Umschnürungswirkung zur Folge hat, wird in Publikation [2] nicht behandelt.

In Publikation [1] ist im Zuge der Entwicklung des GPC-Modells ein Ansatz für die realitätsnahe Abbildung des passiven Umschnürungseffekts ebenfalls für zylindrische Körper vorgestellt worden. Für die zukünftige Überführung des mechanischen Modells auf die Geometrie einer Tübbing-Längsfuge wird in Abschnitt 2 der Publikation [2] der Ansatz zur Abbildung der passiven Umschnürungswirkung für rechteckige Querschnitte erweitert.

Insgesamt wurden zwölf experimentelle Untersuchungen von Lastübertragungszonen unter Verwendung von stumpf gestoßener Bewehrung durchgeführt. Weitere sechs Versuche wurden als Referenz ohne Ausbildung einer Fuge getestet. Die variierten Parameter sind dabei der Längsbewehrungsgrad ρ_l (mit und ohne Längsstab), die Stabexzentrizität e (siehe Abbildung 4.2c) und der Abstand des Längsstabes zur Kontaktfläche a (siehe Abbildung 4.2d). Für die Darstellung der Versuchskörper und deren Bezeichnungen wird auf Bild 4 in Publikation [2] referenziert.

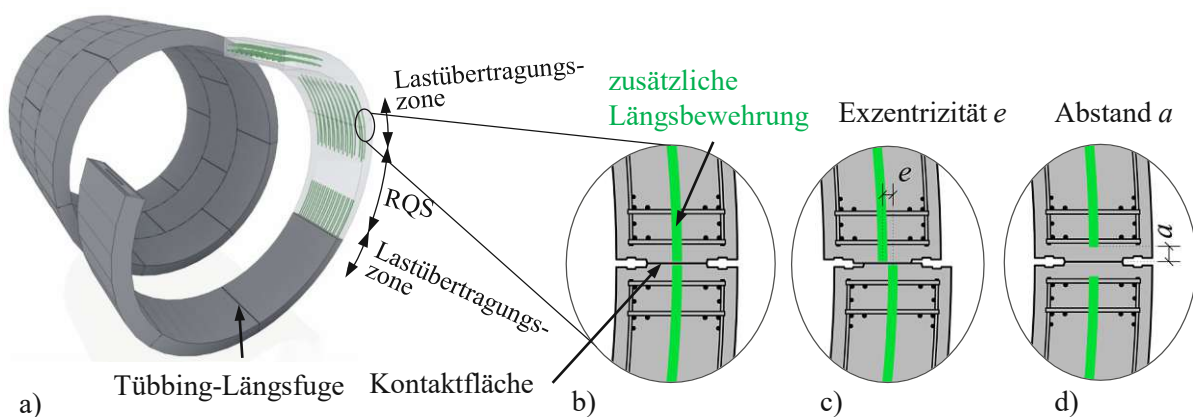


Abb. 4.2: a) Tunneltragstruktur unter Verwendung des TU Wien Bewehrungskonzeptes; b) Detail einer Tübbing-Längsfuge; c) Detail einer Tübbing-Längsfuge mit einer Exzentrizität e ; d) Detail einer Tübbing-Längsfuge mit einem Abstand a zwischen der Stirnfläche der Längsbewehrung und der Kontaktfläche (entnommen aus [2])

In Tab. 4.1 sind die Ergebnisse zur Traglaststeigerung durch die Längsbewehrung zusammengefasst. Bezogen auf die maximale Traglast F_{sl} , die der Bewehrungsstab beim Erreichen der Fließgrenze übertragen kann, erreicht die Versuchsreihe B einen Ausnutzungsgrad von $\eta_{sl} = 100\%$. Das bedeutet, für die ideal gestoßene Lastübertragungszone kann der Längsstab vollständig aktiviert und gemäß Gleichung (4.3) rechnerisch abgebildet werden. Gleichung (9) in Publikation [2] kann in Anlehnung an das GPC-Modell auch

entsprechend der einzelnen Traglastanteile ausformuliert werden (siehe Gleichung (4.3)). F_{cm} entspricht dabei dem Traglastanteil zufolge der einaxialen Druckfestigkeit, $\Delta F_{s.cc}$ dem Anteil zufolge der passiven Umschnürungswirkung und F_{sj} dem Anteil der wirksamen Längsbewehrung in der Kontaktfläche, welcher im Fall von ideal gestoßenen Längsstäben dem Querschnittswiderstand der Längsbewehrung F_{sl} entspricht.

$$F_{cal}^* = \underbrace{f_{cm} \cdot (A_{cc} - A_{sj})}_{F_{cm}} + \underbrace{\Delta f_{s.cc} \cdot (A_{cc.e} - A_{sj})}_{\Delta F_{s.cc}} + \underbrace{f_y \cdot A_{sj}}_{F_{sj}} \quad (4.3)$$

mit

F_{cal}^*	Rechnerische Tragfähigkeit unter Berücksichtigung des Traglastanteils der wirksamen Längsbewehrung
F_{cm}	Querschnittswiderstand gemäß der mittleren Druckfestigkeit des Betons
$\Delta F_{s.cc}$	Traglastanteil der passiven Umschnürungswirkung
F_{sj}	Traglastanteil der wirksamen Längsbewehrung in der Kontaktfläche
f_{cm}	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons
f_y	Streckgrenze der Bewehrung
$\Delta f_{s.cc}$	Steigerung der Betonfestigkeit infolge passiver Umschnürungswirkung
A_{cc}	Umschnürte Kernbetonfläche
$A_{cc.e}$	Effektiv umschnürte Kernbetonfläche
A_{sj}	Querschnittsfläche der wirksamen Längsbewehrung in der Kontaktfläche (im Fall einer ideal gestoßenen Längsbewehrung ist $A_{sj} = A_{sl}$)

Bei einer Exzentrizität, die dazu führt, dass sich die Stirnflächen der stumpf gestoßenen Bewehrungsstäbe nicht mehr überlappen (Versuchsreihe C), konnte die Traglastkapazität des Längsstabes nur noch zu 29 % aktiviert werden. Die Bewehrungsvarianten mit einem planmäßigen Abstand $a = 25$ mm zwischen Längstab und Kontaktfläche führten zu einem Ausnutzungsgrad η_{sl} von lediglich 14 % bis 26 %. Anhand dieser Daten kann eine Ausführungsvariante des TU Bewehrungskonzeptes mit planmäßigem Abstand a ausgeschlossen werden.

Tab. 4.1: Auswertung zur Traglaststeigerung durch die Längsbewehrung (Versuskonzept und Bezeichnung der Versuchskörper ist in Bild 4 der Publikation [2] dargestellt)

Versuchsreihe		Z	B	C	D	E
F_{exp}	[kN]	916	1085	969	963	942
A_{sj}	[mm ²]	0	314	314	0	0
ΔF_{sl}	[kN]	0	183	53	47	26
$\eta_{sl} = \Delta F_{sl} / F_{sl}$	[%]	0	100%	29%	26%	14%

Die Problematik von auftretenden Einbautoleranzen (Exzentrizitäten) ist von den gewählten Stabdurchmessern und den projektspezifischen geometrischen Versätzen abhängig.

Um weitere Erkenntnisse zu Exzentrizitäten, bei denen sich die Stirnflächen der stumpf gestoßenen Bewehrungsstäbe teilweise überlappen, zu erhalten, wurden in Abschnitt 4 der Publikation [2] numerische Simulationen durchgeführt.

Das numerische Modell wurde anhand der vorliegenden Versuchsdaten unter Berücksichtigung der passiven Umschnürungswirkung kalibriert. Danach wurde in den numerischen Modellen die Exzentrizität der Bewehrungsstäbe variiert. Bei einer Überlappung der Querschnittsflächen von 68 % bzw. 39 % konnte in der numerischen Simulation die Längsbewehrung zu 70 % bzw. 42 % aktiviert werden.

Für eine zukünftige Bemessung von Tunnelsegmenten mit dem an der TU Wien entwickelten Bewehrungskonzept sind demnach die Durchmesser der stumpf gestoßenen Längsbewehrung unter Berücksichtigung der Einbautoleranzen so groß zu wählen, dass eine bestimmte Überlappung der Stirnflächen der Stäbe gewährleistet werden kann.

Mithilfe experimenteller Untersuchungen, den Vergleichsberechnungen der Literatur und der numerischen Simulation konnten folgende Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen gewonnen werden:

- Auf Ebene der Nachweisführung
 - *Wie gut eignen sich bestehende Nachweisformate für die Bemessung von hoch beanspruchten Lastübertragungszonen?*
 Das vorgestellte Umschnürungsmodell gemäß des EC2-Entwurfs [38], welches konzeptionell auch im GPC-Modell verwendet wurde, unterschätzt die Tragfähigkeit mit kreisförmiger Umschnürungsbewehrung um 6 % und wird zur Erfassung der passiven Umschnürungswirkung empfohlen.
 - *Wie kann die Traglaststeigerung unter Verwendung stumpf gestoßener Bewehrungsstäbe quantifiziert werden?*
 Die Traglaststeigerung einer ideal gestoßenen Kontakfläche kann mit dem additiven Ansatz gemäß Gleichung (4.3) berechnet werden.
 Die numerische Simulation von druckbeanspruchten Lastübertragungszonen wird nur in Zusammenhang mit experimentellen Untersuchungen empfohlen. Diese sind hinsichtlich der Modellkalibrierung zur Abbildung des Umschnürungseffekts notwendig.
- Zu den strukturellen Verbesserungen:
 - *Welchen Einfluss haben stumpf gestoßene Bewehrungsstäbe auf die Tragfähigkeit von druckbeanspruchten Lastübertragungszonen?*
 Bei planmäßiger Ausführung können die Längsstäbe bis zum Erreichen der Fließgrenze des Stahls aktiviert werden. Das Bewehrungskonzept bietet damit eine sehr effiziente Möglichkeit zur Traglaststeigerung von Lastübertragungszonen.

- *Welche Einflüsse müssen bei der baupraktischen Anwendung berücksichtigt werden?*

Für eine zukünftige Bemessung von Tunnelsegmenten mit dem an der TU Wien entwickelten Konzept sind die Stabdurchmesser der stumpf gestoßenen Längsbewehrungsstäbe unter Berücksichtigung der Einbautoleranzen so groß zu wählen, dass eine ausreichende Überlappung der gestoßenen Stirnflächen der Längsbewehrung gewährleistet werden kann. Auf Grundlage der numerischen Simulationen sollte nur die sich überlappende Fläche zur Traglaststeigerung herangezogen werden.

4.3 Publikation [3] Optimierte Bewehrungskonzept für Tübbing-Längsfugen im Segmenttunnelbau

In der Publikation [3] werden folgende Forschungsfragen behandelt:

- Auf Ebene der Nachweisführung:
 - *Welche Nachweisformate bilden den Stand der Technik bei der Bemessung von Tübbing-Längsfugen?*
 - *Wie gut eignen sich bestehende Nachweisformate für die Bemessung von hoch beanspruchten Lastübertragungszonen?*
 - *Wie kann die Traglaststeigerung unter Verwendung stumpf gestoßener Bewehrungsstäbe quantifiziert werden?*
- Auf Ebene der strukturellen Verbesserungen:
 - *Welchen Einfluss haben stumpf gestoßene Bewehrungsstäbe auf die Tragfähigkeit von druckbeanspruchten Lastübertragungszonen?*

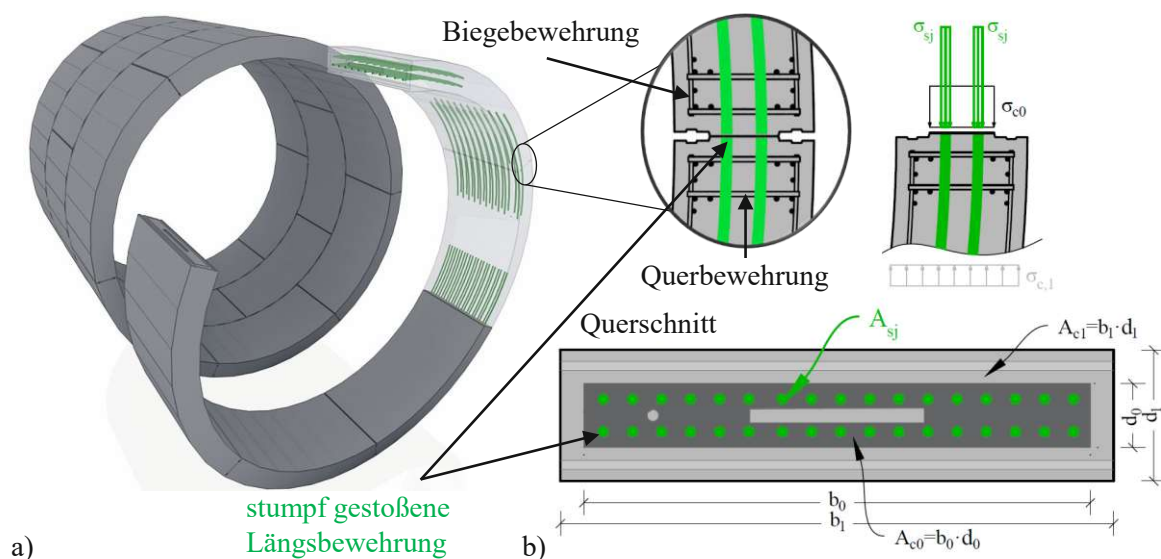
Einleitend wird die Problematik der Tübbing-Längsfuge erläutert. Darauf aufbauend wird der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich der Bemessung einer Tübbing-Längsfuge zusammengefasst. Dazu wird die Anwendung der EN 1992-1-1 [6] in der deutschen (DAUB) [5] und österreichischen (ÖVBB) [17] Richtlinie für den Entwurf von Tübbingringen herangezogen. Darin wird der Effekt der geometrischen Umschnürungswirkung zur Erhöhung der einaxialen Druckfestigkeit berücksichtigt. Dies geschieht durch einen empirisch ermittelten Quadratwurzelsatz.

In der Publikation werden neben dem Ansatz des EC2 [6] zwei aus Sicht der Autoren relevante Ansätze der Literatur vorgestellt. Zum einen wird der Ansatz von Wichers [9], der auf einem Modell von Wurm und Daschner [30], basiert präsentiert. Erwähnenswert dabei ist, dass es sich hier um einen kombinierten Ansatz handelt, in dem ein Traglastanteil der Betondruckfestigkeit und ein zweiter der Querbewehrung zugeordnet wird. Der

Traglastanteil der Querbewehrung ist jedoch durch einen maximalen Querbewehrungsgrad von 1% begrenzt. Dieser Grenzwert wird bei hochbeanspruchten Tübbing-Längsfugen in der Regel überschritten und stellt daher eine erhebliche Einschränkung dar. Zum anderen wird der lineare Ansatz von Schmidt-Thrö [8] vorgestellt. Diesen entwickelte Schmidt-Thrö im Zuge seiner Dissertation anhand einer Versuchsdatenbank und einer umfangreichen Versuchsserie mit dem Fokus auf exzentrisch belastete Tübbing-Längsfugen. Alle drei Ansätze werden in weiterer Folge für die Vergleichsberechnungen herangezogen.

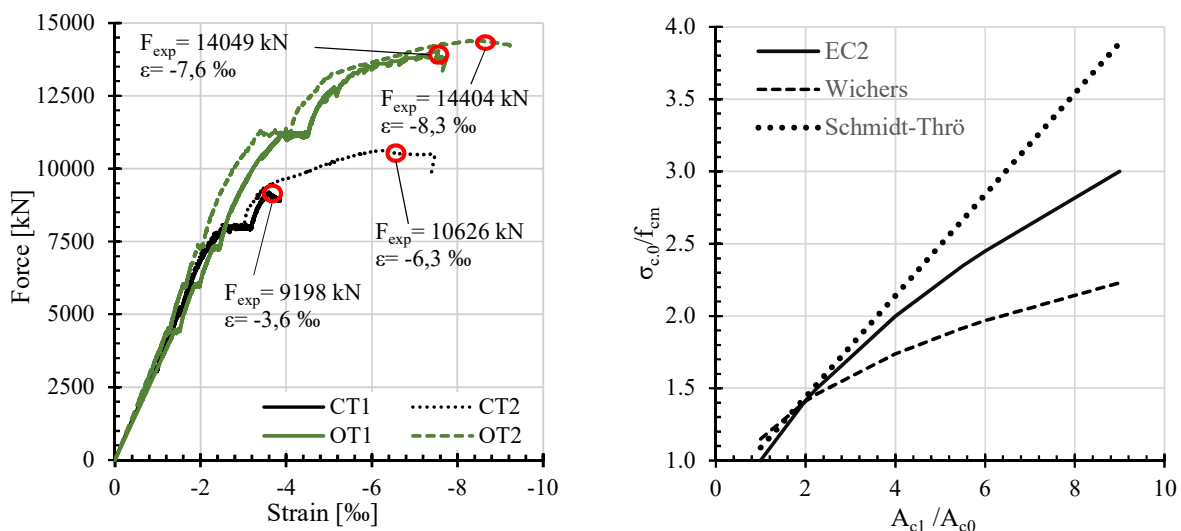
Auf Ebene der strukturellen Maßnahmen zur Traglaststeigerung von hochbeanspruchten Tübbing-Längsfugen werden vier patentierte Lösungen aus der Literatur vorgestellt [39, 40, 41, 42]. Auf Grund diverser Nachteile bezüglich der Dauerhaftigkeit, des Brandwiderstandes, der komplizierten Herstellung oder der hohen Kosten konnte sich keine dieser Ideen im modernen Tunnelbau etablieren.

Eine vielversprechende Lösung bietet das Bewehrungskonzept der TU Wien. Die simple und sehr effiziente Lösung des neuartigen Bewehrungskonzeptes besteht darin, Bewehrungsstäbe (in Abbildung 4.3 grün dargestellt) bis an die Kontaktfläche der Tübbing-Längsfuge zu führen. Dadurch können bei einer planmäßig hergestellten Tübbing-Längsfuge Druckspannungen über die Stirnflächen der Bewehrungsstäbe übertragen und anschließend in den hinteren Teil des Tübbings eingeleitet werden.



aller Versuchskörper basiert auf der Grundlage eines typischen Tunnelsegments mit einer ebenen Kontaktfläche und einem äußeren Tunneldurchmesser von ca. 8 m. In der Praxis führen diese Bedingungen zu Tunnelsegmenten mit einer typischen Breite von 2 m und einer Dicke von 0,25 m bis 0,6 m. Aufgrund der maximalen Kapazität der Druckprüfanlage von 18 MN wurde eine Dicke von 0,4 m und eine skalierte Breite von 0,7 m gewählt. Für die zusätzlichen Längsstäbe wurde ein hochfester Bewehrungsstahl verwendet, um trotz der begrenzten Platzverhältnisse die angestrebte Traglaststeigerung erzielen zu können. Die Versuche wurden weggesteuert mit mehreren Haltephasen zu Bruch gefahren. Die Haltephasen, welche in Abbildung 4.4a anhand der horizontalen Plateaus gut erkennbar sind, sollen die langsame Umlagerung des Gebirgsdruckes in einem realen Tunneltragwerk abbilden.

Bei Betrachtung der Kraft-Stauchungsbeziehungen (siehe Abbildung 4.4a) ist eine deutliche Steigerung der Duktilität der OT-Versuchskörper im Vergleich zu den CT-Versuchskörpern zu erkennen.



(a) Kraft-Stauchungsdiagramm der vier Versuche (entnommen aus [3]) (b) Erhöhungsfaktor der einaxialen Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von A_{c1}/A_{c0} (entnommen aus [3] und richtiggestellt¹)

Abb. 4.4: Großversuche zur Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen

Die Ergebnisse der Materialprüfungen, der Großversuche und der Vergleichsberechnungen mit den ausgewählten Ingenieurmodellen sind in Tab. 4.2 dargestellt. Die beiden Versuche mit dem konventionellen Bewehrungslayout (CT1 und CT2) erreichten eine mittlere

¹In Publikation [3] wurde das Modell nach Wichers für den räumlichen Fall (Quadratwurzelansatz dargestellt) - da es sich bei der Geometrie einer Tübbing-Längsfuge um einen ebenen Fall der Lastausbreitung handelt, wurde die falsch dargestellte Funktion in Publikation [3] in Abbildung 4.4b richtiggestellt und mit dem Kubikwurzelansatz dargestellt.

Versagenslast von etwa 9912 kN. Der Mittelwert der Bruchlasten der OT-Versuchsreihe betrug 14 226 kN, das entspricht einer Traglaststeigerung von 44 % gegenüber der CT-Versuchsreihe.

Tab. 4.2: Materialkennwerte, Bruchlasten der Großversuche und Vergleichsberechnungen

		CT1	CT2	OT1	OT2
f_{cm}	[N/mm ²]	51,9	51,9	51,9	51,9
f_y	[N/mm ²]	550	550	550	550
$f_{ym.SAS670}$	[N/mm ²]	-	-	776	776
F_{exp}	[kN]	9198	10626	14049	14404
$F_{cal.EC2}$	[kN]	9742	9742	13993	13993
$F_{cal.Schmidt-Thrö}$	[kN]	9919	9919	14162	14162
$F_{cal.Wichers}$	[kN]	9506	9506	13768	13768
$F_{exp}/F_{cal.EC2}$	[-]	0,94	1,09	1,00	1,03
$F_{exp}/F_{cal.Schmidt-Thrö}$	[-]	0,93	1,07	0,99	1,02
$F_{exp}/F_{cal.Wichers}$	[-]	0,97	1,12	1,02	1,05

In Publikation [3] wird vorgeschlagen, die Tragfähigkeit der OT-Versuchskörper durch die Addition der Tragfähigkeit der zusätzlichen Längsbewehrungsstäbe $A_{sj} \cdot f_y$ zu bestimmen. Der Anteil der Tragfähigkeit, welcher dem Beton zugeschrieben wird, muss in weiterer Folge um den Faktor $((A_{c0} - A_{sj})/A_{c0})$ reduziert werden. Führt man dieses Prozedere mit dem Mittelwert der Bruchlasten der CT-Versuchsreihe durch, so ergibt sich eine rechnerische Traglaststeigerung von 43 %. Dieses Ergebnis liegt damit sehr nahe an der experimentell ermittelten Erhöhung von 44 %. Aufgrund der Abweichung der einzelnen Bruchlasten vom gemeinsamen Mittelwert von rund 7 % sind diese Ergebnisse durch weitere Untersuchungen zu verifizieren.

Der additive Ansatz kann für jedes Ingenieurmodell verwendet werden und ist in Gleichung (4.4) für den Fall dargestellt, dass der rechnerisch ermittelten Traglast F_{cal} ein Modell mit konstanter Spannung im Bemessungsquerschnitt zugrunde liegt. Dies ist für die drei Modelle, welche in der Publikation [3] verwendet wurden, der Fall. Die Ergebnisse der Vergleichsberechnungen gemäß Gleichung (4.4) sind in Tab. 4.2 zusammengefasst. Dabei konnte die Bruchlast sowohl mit dem Modell des EC2 [6] als auch mit dem Modell nach Schmidt-Thrö [8] gut abgebildet werden. Das Modell nach Wichers [9] liefert im Gegensatz dazu eine etwas geringere Bruchlast.

$$F_{cal}^* = F_{cal} \cdot \left(\frac{A_{c0} - A_{sj}}{A_{c0}} \right) + f_y \cdot A_{sj} \quad (4.4)$$

mit

Trotz der guten Übereinstimmung der verwendeten Modelle mit den experimentellen Untersuchungen lässt sich bei der Betrachtung höherer Lastausbreitungsverhältnisse (A_{c1}/A_{c0})

F_{cal}^*	Rechnerische Tragfähigkeit unter Berücksichtigung des Traglastanteils der wirksamen Längsbewehrung
F_{cal}	Rechnerische Tragfähigkeit
f_y	Streckgrenze der Bewehrung
A_{c0}	Unter Druckspannung stehende Kontaktfläche in der Tübbing-Längsfuge
A_{sj}	Querschnittsfläche der wirksamen Längsbewehrung in der Kontaktfläche

eine immer größer werdende Abweichung zwischen den vorgestellten Modellen erkennen (siehe Abbildung 4.4b).

Mithilfe der experimentellen Untersuchungen und der umfangreichen Literaturrecherche konnten folgende Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen gewonnen werden:

- Auf Ebene der Nachweisführung:
 - *Welche Nachweisformate bilden den Stand der Technik bei der Bemessung von Tübbing-Längsfugen?*
 Als Stand der Technik in Europa kann die Wurzelformel des EC2 [6] genannt werden. Im Zuge der Nachweisführung der Kontaktfläche einer Tübbing-Längsfuge wird dabei die Bedingung der geometrischen Ähnlichkeit in der Regel vernachlässigt. In der DAUB [5] wird dies durch den Verweis auf experimentelle Untersuchungen begründet. Als vielversprechendste Ansätze wurden der Literatur wurden das Modell nach Schmidt-Thrö [8] und das Modell nach Wichers [9] identifiziert. Ergänzend zu den in Publikation [3] vorgestellten Modellen kann auch die Theorie der Spannungsfelder gemäß Markic et al. [34] zur Bemessung von Tübbing-Längsfugen herangezogen werden.
 - *Wie gut eignen sich bestehende Nachweisformate für die Bemessung von hoch beanspruchten Lastübertragungszonen?*
 Für die in Publikation [3] vorliegenden Versuchskörper konnte die Bruchlast der Tübbing-Längsfuge mit allen drei Modellen gut abgebildet werden. Die Divergenz zwischen den vorgestellten Ingenieurmodellen bei steigendem Teilflächenverhältnis in Abbildung 4.4b und die bereits in Publikation [1] angeführten Defizite der Modelle führten zu dem Entschluss, das GPC-Modell auch anhand von großformatigen Tübbingversuchen zu verifizieren.
 - *Wie kann die Traglaststeigerung unter Verwendung stumpf gestoßener Bewehrungsstäbe quantifiziert werden?*
 Durch die Anordnung stumpf gestoßener Bewehrungsstäbe konnte die Traglast um 44 % gesteigert werden. Das entspricht auch der rechnerischen Tragfähigkeit der Bewehrungsstäbe. Die Traglaststeigerung kann durch den vorgestellten additiven Ansatz gemäß Gleichung (4.4) gut abgebildet werden. Die geringere

Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfuge gegenüber dem Regelquerschnitt kann durch die Anordnung der Längsstäbe vollständig kompensiert werden.

- Auf Ebene der strukturellen Verbesserungen:
 - *Welchen Einfluss haben stumpf gestoßene Bewehrungsstäbe auf die Tragfähigkeit von druckbeanspruchten Lastübertragungszonen?*

Bei planmäßiger Ausführung können die stumpf gestoßenen Längsstäbe in einer Tübbing-Längsfuge bis zum Erreichen der Fließgrenze des Stahls aktiviert werden. Das Bewehrungskonzept der TU Wien bietet damit eine sehr effiziente Möglichkeit zur Traglaststeigerung von Lastübertragungszonen.

Kapitel 5

Schlussfolgerungen, Kritik und Ausblick

Die vorliegende Arbeit widmet sich druckbeanspruchten Lastübertragungszonen im Fertigteilbau mit dem Fokus auf den Spezialfall der Tübbing-Längsfuge. Dabei werden die mechanischen Tragmechanismen und eine strukturelle Verbesserungsmaßnahme, die im Bereich der Lastübertragungszone mit reduzierter Kontaktfläche zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit führen, untersucht. Das erste Ziel dieser Arbeit war, auf Ebene der rechnerischen Nachweisführung die realitätsnahe Abbildung der mechanischen Tragmechanismen zu präzisieren. Das zweite Ziel war die Beurteilung von stumpf gestoßenen Bewehrungsstäben hinsichtlich der Verbesserung des Tragverhaltens von Lastübertragungszonen.

5.1 Schlussfolgerungen und Kritik

Sowohl für rotationssymmetrische Lastübertragungszonen als auch für die spezielle Geometrie einer Tübbing-Längsfuge können die geometrische und passive Umschnürungswirkung, welche zur Steigerung der Druckfestigkeit über die einaxiale Betonfestigkeit führt, benannt werden. Da beide Umschnürungseffekte ebene und räumliche Spannungszustände hervorrufen können, sollte dieser Aspekt bei der Bemessung von Lastübertragungszonen berücksichtigt werden. Die Situation der Tübbing-Längsfuge stellt einen Spezialfall dar, bei dem ein ebener Spannungszustand zufolge Lastausbreitung und ein räumlicher Spannungszustand zufolge Querbewehrung überlagert werden (siehe dazu Abbildung 2.8). Die Untersuchung eines solch komplexen Diskontinuitätsbereiches erfordert experimentelle Versuche, welche die wesentliche Methodik der drei vorgestellten Publikationen bilden.

Es wird sowohl in den vorgestellten Publikationen [1, 2, 3] als auch in der Rahmenschrift auf den Stand der Technik eingegangen. In Bezug auf die Nachweisführung werden in den Publikationen [1, 2] die vielversprechendsten Modelle der Literatur zur allgemeinen Bemessung von Lastübertragungszonen identifiziert und in Publikation [3] auf den Spezialfall der Tübbing-Längsfuge eingegangen. In beiden Fällen können die mechanischen Effekte hinsichtlich Lastausbreitung und Querbewehrung nur teilweise oder mit sehr hohem Rechenaufwand abgebildet werden. Als zukünftiger, normativ geregelter Stand der Technik kann der EC2-Entwurf [7] angesehen werden, in dem genauere Verfahren zur

Berücksichtigung der günstigen Auswirkung von Umschnürung durch Geometrie und Querbewehrung explizit ausgewiesen sind. Diese Formulierung unterstreicht die Notwendigkeit einer präzisierten Modellbildung.

Als Stand der Forschung bezüglich struktureller Verbesserungen werden in Publikation [3] vier Patente zur Traglaststeigerung der Tübbing-Längsfuge diskutiert. Die Nachteile hinsichtlich Brandschutz, Fertigungsaufwand, Dauerhaftigkeit und der entstehenden Kosten führen zu dem Umstand, dass sich keine dieser Ideen im modernen Tunnelbau etablieren konnte.

Die Zuverlässigkeit der Modelle der Literatur wurde anhand der Grundlagenversuche und der Großversuche evaluiert. Bei der Nachrechnung der Grundlagenversuche in Publikation [1] treten überlagerte Spannungszustände zufolge Lastausbreitung und passiver Umschnürungswirkung auf. Im Vergleich der Modelle der Literatur liefert die Theorie der Spannungsfelder, welche mit einem hohen Rechenaufwand verbunden ist, die besten Ergebnisse. Die anderen, deutlich einfacheren Berechnungsansätze eignen sich jeweils nur bei eingeschränkten Parameterräumen hinsichtlich Lastausbreitung und passiver Umschnürungswirkung.

In Publikation [3] werden drei ausgewählte einfache Modelle der Literatur den Bruchlasten der Großversuche gegenübergestellt. Obwohl nur eines der drei verwendeten Modelle die Querbewehrung berücksichtigt, stimmen die Ergebnisse der Nachrechnungen sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein. Bei den vorliegenden Ergebnissen müssen jedoch folgende Aspekte beachtet werden: i) Es wurde weder die Geometrie der Tübbing-Längsfuge noch der Querbewehrungsgrad variiert. ii) Bei den konventionell bewehrten Referenzversuchen ergab sich eine Abweichung der Bruchlasten von 7 % vom gemeinsamen Mittelwert. iii) Da sich das Bewehrungslayout an einem tatsächlich gebauten Tunnelbauprojekt orientiert, wurde eine entsprechende Biegebewehrung vollverschweißt angebracht. Die Auswirkungen der zusätzlichen Umschnürungswirkung der Biegebewehrung können rechnerisch nicht abgebildet werden. Auf Grund der drei angeführten Kritikpunkte sollten zur Absicherung der Erkenntnisse hinsichtlich der Traglastbestimmung von Tübbing-Längsfugen weitere Großversuche durchgeführt werden. Eine Übersicht zur laufenden und zukünftig geplanten Forschung am Institut für Tragkonstruktionen wird in Abschnitt 5.2 zusammengefasst.

Ein weiterer, wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ist die Entwicklung des **Geometric und Passive Confinement-Modells (GPC-Modell)**. Basierend auf mechanischen Überlegungen kann das Modell die Tragfähigkeit von Lastübertragungszonen unter Berücksichtigung der geometrischen und passiven Umschnürungswirkung abbilden. In Anwendung auf die präsentierten Versuche in Publikation [1], lieferten das GPC-Modell und die Theorie der Spannungsfelder die zuverlässigsten Ergebnisse. Weiters wird mit dem GPC-Modell ein mögliches Versagen entlang des gesamten Diskontinuitätsbereichs, welcher durch die zwei maßgebenden Schnittebenen vereinfacht wird, abgebildet. Dadurch kann eine sichere Bemessung gewährleistet und eine ressourceneffiziente Planung der Bewehrung in der

Lastübertragungszone ermöglicht werden.

Auf der Ebene der strukturellen Verbesserungsmaßnahme bestätigen sowohl die Ergebnisse der Grundlagenversuche in Publikation [2] als auch die der Großversuche [3], dass die Traglastkapazität einer an die Kontaktfläche geführten Längsbewehrung voll aktiviert werden kann. Zur Quantifizierung der Traglaststeigerung wird die Verwendung eines additiven Ansatzes vorgestellt. Der additive Ansatz, welcher in den Publikationen [2] und [3] verifiziert wurde, kann auch als Erweiterung des GPC-Modells gemäß Gleichung (5.1) verwendet werden.

$$F_{cal.GPC0}^* = F_{cm} + \Delta F_c + \Delta F_{s.cc} + F_{sj} \quad (5.1)$$

mit

$F_{cal.GPC0}^*$	Rechnerische Tragfähigkeit des GPC-Modells im Schnitt 0-0 unter Berücksichtigung des Traglastanteils der wirksamen Längsbewehrung
F_{cm}	Querschnittswiderstand gemäß der mittleren Druckfestigkeit des Betons
ΔF_c	Traglastanteil der geometrischen Umschnürungswirkung
$\Delta F_{s.cc}$	Traglastanteil der passiven Umschnürungswirkung
F_{sj}	Traglastanteil der wirksamen Längsbewehrung in der Kontaktfläche

Die vorliegende Erweiterung wurde im Zuge dieser Arbeit noch keinen experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Als Grundlage für die Anwendung von Gleichung (5.1) auf Tübbing-Längsfugen sollte das GPC-Modell im ersten Schritt anhand von konventionell bewehrten Großversuchen verifiziert werden. Im zweiten Schritt sollten Großversuche unter Verwendung von stumpf gestoßenen Bewehrungsstäben herangezogen werden. Ein Ausblick dazu findet sich in Abschnitt 5.2.

Es konnte festgestellt werden, dass mit dem TU Wien Bewehrungskonzept die Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfuge auf das Niveau des Regelquerschnitts angehoben bzw. die Dicke der Tunnelsegmente bei gleichbleibender Tragfähigkeit reduziert werden kann. Die Reduktion der Tübbingdicke führt nicht nur zu Einsparungen bei den Betonkubaturen, sondern reduziert auch das anfallende Ausbruchsmaterial, den notwendigen Durchmesser der Tunnelbohrmaschine und die Menge des Ringspaltverfüllmaterials.

5.2 Ausblick und laufende Forschung

Basierend auf dieser Dissertation ergeben sich weitere Fragestellungen, welche in zukünftigen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht werden sollten. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf folgende Themenschwerpunkte gelegt werden:

- **Validierung des GPC-Modells an großformatigen Bauteilversuchen**

In Publikation [1] wurde das GPC-Modell anhand von rotationssymmetrischen

Grundlagenversuchen mit einem Durchmesser von 150 mm validiert. Der weiterführenden Verifizierung mit den Daten der Literatur liegen ebenfalls kleinformatige Versuchskörper zu Grunde. Im Gegensatz dazu sind eine Dicke von 400 mm und eine Breite von 2000 mm durchaus übliche Abmessungen für ein Tunnelsegment. Es sollte daher eine Validierung des GPC-Modells anhand von großformatigen Versuchskörpern durchgeführt werden, um mögliche unerwünschte Skalierungseffekte ausschließen zu können. Dazu werden im Zuge eines aktuellen Forschungsprojektes am Institut für Tragkonstruktionen großformatige Versuchskörper getestet.

- **Anwendung des GPC-Modells bei Tübbing-Längsfugen**

Die Anwendung des GPC-Modells für Lastübertragungszonen im Segmenttunnelbau ist auf Grund des hohen Einsparungspotentials durch die Verbesserung eines einzelnen Detailnachweises (siehe dazu Abschnitt 1.1) von besonderem Interesse. Es sind dabei Beschaffenheiten der Geometrie und des Bewehrungslayouts zu beachten. Die geometrische Umschnürungswirkung in Breitenrichtung b unterscheidet sich wesentlich von jener in Dickenrichtung d . Bezüglich der passiven Umschnürungswirkung muss im Vergleich zu den rotationssymmetrischen Versuchskörpern auch der Lageunterschied der Bewehrungsebenen in Breiten- und Dickenrichtung berücksichtigt werden. Die Verifizierung des GPC-Modells in Anwendung bei Tübbing-Längsfugen mit stumpf gestoßener Bewehrung gemäß Gleichung (5.1) ist ebenfalls anzustreben. Aktuell wird zu diesen Fragestellungen am Institut für Tragkonstruktionen ein Forschungsprojekt abgehandelt. Konkret werden dabei zentrisch belastete Versuche zu Tübbing-Längsfugen mit unterschiedlichen Geometrien und Bewehrungslayouts untersucht.

- **Momenten- Normalkraftinteraktion**

Eine weitere mögliche Fragestellung ist die Validierung des Modells für Lastübertragungszonen bei auftretenden Momenten-Normalkraftkombination. Durch die Vereinfachung der Spannungszustände zu resultierenden Spannungsblöcken kann das GPC-Modell auch für M-N-Kombinationen verwendet werden. Eine Validierung anhand von Versuchsdaten der Literatur ist für diese Anwendung ebenfalls erstrebenswert.

- **Ressourcenverbrauch**

Ein verbessertes mechanisches Modell zur präziseren Bemessung führt unmittelbar zur Möglichkeit, Tragstrukturen ressourceneffizienter planen zu können. Für die Detailplanung einer strukturellen Verbesserungsmaßnahme, wie das vorgestellte Bewehrungskonzept der TU Wien, sollte als Entscheidungsgrundlage eine ökologische Bewertung herangezogen werden. Begleitend zu dieser Dissertation wurde der ökologische Impact des TU Wien Bewehrungskonzepts vom Institut für Tragkonstruktionen in bereits veröffentlichten Beiträgen [43, 44, 45] untersucht. Für

zukünftige Forschungsarbeiten wird empfohlen, weitere Bewehrungskonzepte, wie z.B. mit Stahlfasern, nichtmetallischen Bewehrungen oder hochfesten Werkstoffen, unter Berücksichtigung der ökologischen Aspekte miteinander zu vergleichen.

In der vorliegenden Forschungsarbeit konnte das Potential eines neuen mechanischen Modells und einer einfachen strukturellen Verbesserungsmaßnahme aufgezeigt werden. Die langfristigen Ziele sind die normative Verankerung des vorgestellten Bemessungsmodells in Mitteleuropa und der erstmalige praktische Einsatz des TU Wien Bewehrungskonzeptes in einem Tunnelbauprojekt.

Literatur

- [1] PROKSCH-WEILGUNI, C.; DECKER, M.; KOLLEGGER, J. Load distribution and passive confinement in reinforced concrete: Development of a mechanical model. *Engineering Structures*. 2024, Jg. 304, Nr. 117562. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117562>.
- [2] PROKSCH-WEILGUNI, C.; DECKER, M.; KOLLEGGER, J. Hochbelastete Lastübertragungszonen mit stumpf gestoßener Bewehrung: Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2022, Jg. 117, Nr. 11, S. 913–927. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1002/best.202200075>.
- [3] PROKSCH-WEILGUNI, C.; WOLFGER, H.; KOLLEGGER, J. Optimized reinforcement in longitudinal joints of segmental tunnel linings. *Geomechanics and Tunnelling*. 2021, Jg. 14, Nr. 4, S. 390–399. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.202000046>.
- [4] BAUSCHINGER, J. Versuche mit Quadern aus Naturstein. *Mitteilungen aus dem Mechanisch Technischen Laboratorien der Technischen Hochschule München*. 1876, Jg. 6, S. 1–20.
- [5] DAUB: *Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen*. Köln: Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen, 2013.
- [6] ÖNORM EN 1992-1-1: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 2015.
- [7] ÖNORM FprEN 1992-1-1: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Regeln – Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 2023.
- [8] SCHMIDT-THRÖ, G. *Zum Tragverhalten der Tübbinglängsfuge*. Technische Universität München, [Dissertation], 2019. Auch verfügbar unter: <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1484068>.
- [9] WICHERS, M. *Bemessung von bewehrten Betonbauteilen bei Teilflächenbelastung unter Berücksichtigung der Rissbildung*. Technische Universität Braunschweig, [Dissertation], 2013. Auch verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:084-13052911495>.

- [10] BERGMEISTER, K. The Brenner Base Tunnel – geological, construction and logistical challenges and innovations at half time. *Geomechanics and Tunneling*. 2019, Jg. 12, Nr. 5, S. 555–563. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201900038>.
- [11] KROMOSER, B. Ressourceneffizientes Bauen mit Betonfertigteilen Material – Struktur – Herstellung. In: *Beton Kalender 2021*. Hrsg. von BERGMEISTER, K.; FINGERLOOS, F.; WÖRNER, J.-D. Wien: Ernst & Sohn, 2021, S. 305–356. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1002/9783433610206.ch3>.
- [12] MAIDL, B.; HERRENKNECHT, M.; MAIDL, U.; WEHRMEYER, G. *Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb*. 2. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 2011. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1002/9783433600757>.
- [13] JODL, H. G.; ALTINGER, G.; BICHLER, M.; KRIEBAUM, W.; WOLFGANG, S. Vortriebsmethoden und Ausbau von Tunneln. In: *Beton-Kalender 2005: Fertigteile, Tunnelbauwerke*. Hrsg. von BERGMEISTER, K.; WÖRNER, J.-D. Berlin: Ernst & Sohn, 2005, Kap. Kapitel II, S. 19–119.
- [14] ITA-AITES. *Tunnel Market Survey 2019*. Châtelaine, Switzerland: International Tunneling und Underground Space Association, 2019.
- [15] FISCHER, O.; SCHMIDT-THRÖ, G. Bemessung und Konstruktion von Längsfugen beim Tübbingausbau. In: *Taschenbuch für den Tunnelbau*. Hrsg. von DEUTSCHER GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK E.V. München: Ernst & Sohn, 2016, Kap. Baustoffe und Bauteile, S. 81–134.
- [16] *ÖNORM B 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2018.
- [17] *ÖVBB: Tübbingsysteme aus Beton*. Wien: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2009.
- [18] ZILCH, K.; ZEHETMAIER, G. *Bemessung im konstruktiven Betonbau*. 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2010. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70638-0>.
- [19] KAUFMANN, W.; MARKIĆ, T.; MARTIN, B. *Betongelenke - Stand der Technik und Entwicklungspotential*. 2017. [Forschungsbericht]. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000257076>.
- [20] MARKIĆ, T.; KAUFMANN, W.; AMIN, A. Stress field solution for strip loaded reinforced concrete blocks. *Engineering Structures*. 2018, Jg. 171, S. 911–920. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.027>.

- [21] HAVLÁSEK, P. Numerical modeling of axially compressed circular concrete columns. *Engineering Structures*. 2021, Jg. 227, Nr. 111445. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111445>.
- [22] SAINT-VENANT, A. *Memoire sur la torsion des prismes: avec des considérations sur leur flexion ainsi que sur l'équilibre intérieur des solides élastiques en général, et des formules pratiques pour le calcul de leur résistance à divers efforts s'exerçant simultanément*. Paris: Imprimerie nationale, 1856.
- [23] KUPFER, H. *Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung (DAfStb Heft 229)*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, 1973. Deutscher Ausschluß für Stahlbeton.
- [24] MÖRSCH, E. Über die Berechnung der Gelenkquader. *Beton und Eisen*. 1924, Jg. 23, Nr. 12, S. 156–161.
- [25] HILTSCHER, R.; FLORIN, G. Darstellung der Spaltzugspannungen unter einer konzentrierten Last (Druckplatte) nach Guyon-Jyengar und nach Hiltcher und Florin. *Die Bautechnik*. 1967, Jg. 47, Nr. 6, S. 196–200.
- [26] *fib: Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2013.
- [27] *SIA 262: Betonbau*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2013.
- [28] SPIETH, H.-P. *Das Verhalten von Beton unter hoher örtlicher Pressung und Teilbelastung unter besonderer Berücksichtigung von Spannbetonverankerungen*. Technische Hochschule Stuttgart, [Dissertation], 1959.
- [29] SPIETH, H.-P. Das Verhalten von Beton unter hoher örtlicher Pressung. *Beton- und Stahlbetonbau*. 1961, Jg. 56, Nr. Heft 11, S. 257–262.
- [30] WURM, P.; DASCHNER, F. *Teilflächenbelastung von Normalbeton Versuche an bewehrten Scheiben (DAfStb Heft 344)*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1983. Deutscher Ausschluß für Stahlbeton.
- [31] LEONHARDT, F.; REIMANN, H. *Betongelenke: Versuchsbericht, Vorschläge zur Bemessung und konstruktiven Ausbildung (DAfStb Heft 175)*. Ernst & Sohn Verlag, 1965. Deutscher Ausschluß für Stahlbeton.
- [32] MARX, S.; SCHACHT, G. Berechnungsmodelle für Betongelenke. *Der Prüfenieur*. 2010, Jg. 36, S. 15–26.
- [33] SCHLAPPAL, T.; KALLIAUER, J.; VILL, M.; MANG, H. A.; EBERHARDSTEINER, J.; PICHLER, B. L. A. Ultimate limits of reinforced concrete hinges. *Engineering Structures*. 2020, Jg. 224, Nr. 110889. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110889>.

- [34] MARKIĆ, T.; MORGER, F.; KAUFMANN, W. Partially loaded areas in reinforced concrete: Mechanical modelling. *Engineering Structures*. 2022, Jg. 271, Nr. 114938. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114938>.
- [35] KOLLEGGER, J.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; WOLFGER, H.; DECKER, M. *Tübbing aus bewehrtem Beton*. Patentanmeldung AT, eingereicht am 14. Mai 2019.
- [36] KOLLEGGER, J.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; WOLFGER, H.; DECKER, M. *Reinforced concrete tubbing*. Patentanmeldung PCT, eingereicht am 4. Februar 2020.
- [37] KOLLEGGER, J.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; WOLFGER, H. *Reinforced concrete tubbing segment*. Patent CN 113423919 B, erteilt am 24. Oktober 2023.
- [38] ÖNORM prEN 1992-1-1: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Regeln – Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke; prEN 1992-1-1:2021*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 2021.
- [39] PORR BAU GMBH. *Verbundsegment, Tunnelschale und Verfahren*. Patentanmeldung AT 518840 A1, veröffentlicht am 24. Juni 2016.
- [40] DAHL, J. *Tubing segment for a tunnel lining, in particular a high performance tubing element*. Patent EP 1 243752 B1, erteilt am 23. Mai 2007.
- [41] OGER, J. F. M. *Ausbauelement für den Schachtausbau oder dergleichen und Verfahren zu seiner Herstellung*. Patent DE 25 22 789 C3, erteilt am 8. Dezember 1977.
- [42] HIROHIDE, H.; SUSUMU, U. *Joint structure of segment*. Patentanmeldung JP 11287093, eingereicht am 19. Oktober 1999.
- [43] KOLLEGGER, J.; DECKER, M.; PROKSCH-WEILGUNI, C. Dünnwandiger und ressourceneffizienter Tübbing für den Tunnelbau. In: *Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser*. München: Universität der Bundeswehr München, 2022.
- [44] PROKSCH-WEILGUNI, C.; DECKER, M.; KOLLEGGER, J. Longitudinal joint design for eco-efficient tunnel structures. In: *Tagungsband zum fib International Congress 2022*. Oslo: fib, 2022.
- [45] PROKSCH-WEILGUNI, C.; KOLLEGGER, J. Resource efficient reinforcement concept for precast tunnel segments. In: *Tagungsband zum IABSE Symposium Prague 2022*. Prag: IABSE, 2022. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.2749/prague.2022.1352>.

Teil II - Publikationen

Publikation [1]

Titel: Load distribution and passive confinement in reinforced concrete:
Development of a mechanical model

Autoren: Clemens Proksch-Weilguni, Marion Decker, Johann Kollegger

Veröffentlichungstyp: Aufsatz in Fachzeitschrift

Titel des Mediums: Engineering Structures

ISSN (Online): 0141-0296

ISSN (Print): 1873-7323

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117562>

Chefredakteur: Prof. Jie Yang, PhD

Verlag: Elsevier

Erscheinungsjahr: 2024

Peer Reviewed: Ja, Impact Factor (Zitate/Artikel) 5,779 im Jahr 2022

Status: Veröffentlicht

Formatierung: Veröffentlichtes Original

Publikation [2]

Titel: Hochbelastete Lastübertragungszonen mit stumpf gestoßener Bewehrung: Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen

Autoren: Clemens Proksch-Weilguni, Marion Decker, Johann Kollegger

Veröffentlichungstyp: Aufsatz in Fachzeitschrift

Titel des Mediums: Beton- und Stahlbetonbau

ISSN (Online): 1437-1006

ISSN (Print): 0005-9900

DOI: <https://doi.org/10.1002/best.202200075>

Ausgabe: Volume 117, Issue 11

Seiten: 10

Chefredakteur: Prof. Dipl.Ing. DDr. Dr.-Ing. E.h. Konrad Bergmeister

Verlag: Ernst & Sohn

Erscheinungsjahr: 2022

Peer Reviewed: Ja, Impact Factor (Zitate/Artikel) 1,094 im Jahr 2022

Status: Veröffentlicht

Formatierung: Veröffentlichtes Original

Publikation [3]

Titel: Optimized reinforcement in longitudinal joints of segmental tunnel linings
Autoren: Clemens Proksch-Weilguni, Hannes Wolfger, Johann Kollegger
Veröffentlichungstyp: Aufsatz in Fachzeitschrift
Titel des Mediums: Geomechanics and Tunnelling
ISSN (Online): 1865-7389
ISSN (Print): 1865-7362
DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.202000046>
Ausgabe: Volume 14, Issue 4
Seiten: 10
Chefredakteur: Dr.-Ing. Helmut Richter
Verlag: Ernst & Sohn
Erscheinungsjahr: 2021
Peer Reviewed: Ja, Impact Factor (Zitate/Artikel) 0.587 im Jahr 2021
Status: Veröffentlicht
Formatierung: Veröffentlichtes Original

Publikationen und Konferenzbeiträge

Dieser kumulativen Dissertation liegen die folgenden drei Publikationen zugrunde:

- Publikation [1] PROKSCH-WEILGUNI, C.; DECKER, M.; KOLLEGGER, J. Load distribution and passive confinement in reinforced concrete: Development of a mechanical model. *Engineering Structures*. 2024, Jg. 304, Nr. 117562. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117562>.
- Publikation [2] PROKSCH-WEILGUNI, C.; DECKER, M.; KOLLEGGER, J. Hochbelastete Lastübertragungszonen mit stumpf gestoßener Bewehrung: Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2022, Jg. 117, Nr. 11, S. 913-927. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1002/best.202200075>.
- Publikation [3] PROKSCH-WEILGUNI, C.; WOLFGER, H.; KOLLEGGER, J. Optimized reinforcement in longitudinal joints of segmental tunnel linings. *Geomechanics and Tunneling*. 2021, Jg. 14, Nr. 4, S. 390-399. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.202000046>.

Darüber hinaus sind im Rahmen der Forschungstätigkeit des Autors noch weitere Publikationen entstanden, welche sowohl im Forschungsgebiet der Dissertation als auch außerhalb davon liegen.

Zeitschriftenartikel

1. KOLLEGGER, J.; SUZA, D.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; TRÄGER, W. First application of the balanced lowering method to build two bridges in Austria. *Structural Concrete*. 2022, Jg. 23, Nr. 3, S. 1413-1425. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.202100629>.
2. WOLFGER, H.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; KOLLEGGER, J. Longitudinal joints of tubbings with newly designed high-strength reinforcement. *Structural Concrete*.

2021, Jg. 22, Nr. 3, S. 1708-1719. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.202000670>.

3. KOLLEGGER, J.; SUZA, D.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; TRÄGER, W. Entwicklung und erste Anwendung des Brückenklappverfahrens. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2020, Jg. 115, Nr. 7, S. 484-494. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.1002/best.202000010>.

Konferenzbeiträge

Der/Die jeweils vortragende Autor:in ist unterstrichen

4. PROKSCH-WEILGUNI, C.; DECKER, M.; KOLLEGGER, J. Butt-jointed reinforcement bars in the longitudinal joints of tunnel segments: Experimental investigation. In: *Tagungsband zum IABSE Congress 2023*. New Delhi: IABSE, 2023.
5. DECKER, M.; PROKSCH-WEILGUNI, C. ; KOLLEGGER, J. A comparison of the resource-efficiency of different reinforcement concepts motivated by tunnel segments. In: *Tagungsband zum IABSE Congress 2023*. New Delhi: IABSE, 2023.
6. DECKER, M.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; KOLLEGGER, J. Load Transfer in Tunnel Segments: A Contribution to Emphasize the Importance of the Load Introduction System in Experimental Testing. In: *Tagungsband zum fib Symposium 2023*. Istanbul: fib, 2023, Springer Nature Switzerland, Abger. unter DOI https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_179.
7. PROKSCH-WEILGUNI C.; KOLLEGGER, J. Resource efficient reinforcement concept for precast tunnel segments. In: *Tagungsband zum IABSE Symposium Prague 2022*. Prag: IABSE, 2022. Abger. unter DOI: <https://doi.org/10.2749/prague.2022.1352>.
8. PROKSCH-WEILGUNI C.; DECKER, M.; KOLLEGGER, J. Longitudinal joint design for eco-efficient tunnel structures. In: *Tagungsband zum fib International Congress 2022*. Oslo: fib, 2022.
9. KOLLEGGER, J.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; TRÄGER, W.; FASCHING, S.; RATH, M.; UNTERMARZONER, F. Balanced lift and balanced lowering methods for cost and material efficient concrete bridges. In: *Tagungsband zum fib International Congress 2022*. Oslo: fib, 2022.
10. KOLLEGGER, J.; DECKER, M.; PROKSCH-WEILGUNI, C. Dünnwandiger und resourceneffizienter Tübbing für den Tunnelbau. In: *Festschrift zum 70. Geburtstag*

von Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser. München: Universität der Bundeswehr München, 2022.

11. KLEISER, M.; KOLLEGER, J.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; STEINER, A. Brückenklappverfahren auf der S 07. In: *Tagungsband zum 22. Symposium Brückenbau*. Leipzig: Verlagsgruppe Wiederspahn, S. 44-51, 2022.
12. PROKSCH-WEILGUNI, C.; WOLFGER, H.; KOLLEGER, J. Continuous reinforcement in radial joints of tubbings. In: *Tagungsband zum China-Austria Forum for Postgraduates of Civil Engineering*, J.-L. Zhang and B. Pichler L.A., Editors. Vienna: Technische Universität Wien, 2019.

Patente

13. KOLLEGER, J.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; WOLFGER, H.; AND DECKER, M. Tübbing aus bewehrtem Beton. Patentanmeldung AT, eingereicht am 14. Mai 2019.
14. KOLLEGER, J.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; WOLFGER, H.; AND DECKER, M. Reinforced concrete tubbing. Patentanmeldung PCT, eingereicht am 4. Februar 2020.
15. KOLLEGER, J.; PROKSCH-WEILGUNI, C.; WOLFGER, H. Reinforced concrete tubbing segment. Patent CN 113423919 B, erteilt am 24. Oktober 2023.

Betreute Diplomarbeiten

1. DECKER, M. *Umschnürungswirkung bei teilflächenbelasteten Lastübertragungszonen*. Betreuer: Kollegger, J. und Proksch-Weilguni, C. Institut für Tragkonstruktionen - Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau. TU Wien: Wien, 2022.
2. AL-SARRAY, H. *Übertragung der Kraft von druckbeanspruchten Bewehrungsstäben über eine trocken gestoßene Bauteilfuge*. Betreuer: Kollegger, J. und Proksch-Weilguni, C. Institut für Tragkonstruktionen - Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau. TU Wien: Wien, 2021.
3. BACHOFNER, W. *Untersuchung des Tragverhaltens hoch beanspruchter Tübbing-Längsfugen*. Betreuer: Kollegger, J. und Proksch-Weilguni, C. Institut für Tragkonstruktionen - Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau. TU Wien: Wien, 2020.

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Clemens Proksch-Weilguni
Geburtsdatum: 
Geburtsort: 
Staatsbürgerschaft: 

Ausbildung:

07/2019 - heute	Dr.-Studium der techn. Wissenschaften Bauingenieurwesen an der TU Wien
11/2023	Abgelegte Ziviltechnikerprüfung für das Fachgebiet Bauingenieurwissenschaften, abgenommen vom Amt der Wiener Landesregierung
07/2017 - 06/2019	Masterstudium Bauingenieurwissenschaften an der TU Wien (Auslandssemester an der TU Delft)
10/2013 - 06/2017	Bachelorstudium Bauingenieurwesen und Infrastrukturmanagement an der TU Wien
06/2012 - 01/2013	Absolvierung des Präsenzdienstes als Rettungssanitäter
09/2007 - 06/2012	Höhere technische Bundeslehranstalt Krems, Ausbildungsschwerpunkt Hochbau (Matura mit Auszeichnung bestanden)

Berufserfahrung

04/2020 – heute	TU Wien: Universitätsassistent am Institut für Tragkonstruktionen
07/2019 – 03/2020	TU Wien: Projektassistent am Institut für Tragkonstruktionen
03/2019 – 02/2020	Kostmann GesmbH: Technischer Mitarbeiter
06/2015 – 07/2015	STRABAG AG: Techniker
06/2014	Ingenieurbüro ste.p ZT-GmbH: Technischer Mitarbeiter
02/2013 – 08/2013	Ingenieurbüro ste.p ZT-GmbH: Technischer Mitarbeiter
2010, 2011, 2014	Firma Stella Stengel ZT-GmbH: Ferialmitarbeiter

Arbeitsgruppen

ÖBV Richtlinie: Tübbingsysteme aus Beton

Mitarbeit bei der Erstellung einer Richtlinie zur Planung und Bemessung von Tübbingsystemen aus Beton

Auszeichnungen und Preise

2023	IABSE - Best Presentation Award, New Delhi 2023. Titel des Konferenzbeitrages: „Butt-jointed reinforcement bars in the longitudinal joints of tunnel segments: Experimental investigation”
2022	Innovation Award 2022 in der Kategorie: Open class, fib International Congress 2022, Oslo. Titel der Publikation: „Balanced lift and balanced lowering methods for cost and material efficient concrete bridge”
2020	Forschungspreis der Bundeskammer der ZiviltechnikerInnen in der Kategorie: Bauwesen, Titel der Diplomarbeit: „Erstanwendung des Brückenklappverfahrens - numerische Simulation der Bauphasen der Brücke über den Lahnbach”