Optimierungsgestützter Entwurf von Stahlbetonbauteilen am Beispiel von Tunnelschalen

Vorgelegte Dissertation

zur

Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der
Ruhr-Universität Bochum

von

Dipl.-Ing. Thomas Putke

Bochum, im November 2015

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:
Geschäftsführender Direktor des
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2016-3

Thomas Putke

**Optimierungsgestützter Entwurf von Stahlbeton-
bauteilen am Beispiel von Tunnelschalen**

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4593-2

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

KURZFASSUNG

Optimierungsmethoden finden im Bauingenieurwesen vielfache Anwendung. Die Strukturoptimierung wird jedoch zur Entwicklung verbesserter Entwurfskonzepte im Ingenieurbau bislang hauptsächlich zur Lösung akademischer Fragen genutzt. Ein Grund ist es, dass optimierungsgestützte Berechnungen aufwendig und erst für Serienprodukte rentabel sind. Typische seriell produzierte Bauteile sind Tüblings, die im Verband die Schale maschinell aufgefahrener Tunnel bilden und in großer Anzahl gleichbleibender Qualität benötigt werden. Ungünstige Konstruktionen können zu wiederholten Schadensbildern und aufwendigen Instandsetzungsarbeiten führen.

In dieser Arbeit wird ein Optimierungskonzept für einen verbesserten Entwurf von Stahlbetonbauteilen am Beispiel der Querkraftübertragungspunkte in der Ringfuge der Tunnelschale erarbeitet. Ausgangspunkt ist eine ganzheitliche Analyse des Tragsystems der Tunnelschale, die neben dem Endzustand auch zwischenzeitliche Bauzustände, z. B. Bettungsausfall, Verpressdruck oder Vortrieb, einschließt. Zu diesem Zweck werden geeignete parametrisierte numerische Bettungsmodelle mit Zugfederausfall sowie iterativer Drehfederberechnung in den Tunnellängsfugen entwickelt, durch Vergleichsrechnungen untereinander sowie in Gegenüberstellung zu analytischen Lösungen verifiziert und erweitert. Für den Endzustand werden mittels Sensitivitätsanalysen zentrale Modellierungsparameter identifiziert. Die Analyse der Bauzustände charakterisiert die Querkraftkopplung in der Ringfuge als kritischen Beanspruchungsort, für den mit Strukturoptimierungsmethoden ein verbesserter Entwurf gefunden wird. Neben der Formoptimierung wird im Wesentlichen die Topologieoptimierung verwendet, deren Ergebnis sich durch einen sichtbar gemachten Kraftfluss auszeichnet und direkt in bemessbare Fachwerkmodelle überführt werden kann. Grundlagen und Steuerungsparameter der Methode werden systematisch analysiert und anwendungsorientiert aufbereitet. Die Verifizierung erfolgt über den Vergleich zu Ergebnissen der Literatur, wobei der Nutzen der Methode an Beispielen klassischer Diskontinuitätsbereiche demonstriert wird. Topologie- und Formoptimierung werden schließlich für den Entwurf verbesserter Ringkopplungskonzepte genutzt, die in variantenreichen experimentellen Serien getestet werden. Unter Variation der geometrischen Randbedingungen werden verschiedenartige Bewehrungskonzepte für das klassische System Topf-Nocke analysiert und bewertet. Eine verbesserte Alternative für ein duktileres und robusteres Bauteiltragverhalten wird letztlich über einen Ansatz mit einbetonierten Stahlscherbolzen, definiertem Lastabtrag und optimierungsgestütztem Entwurf gefunden.

Diese Arbeit wurde von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Ruhr-Universität Bochum als Dissertation angenommen und genehmigt.

Tag der Einreichung: 24.11.2015

Tag der mündlichen Prüfung: 07.03.2016

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. P. Mark

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2011 bis 2015 im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 837 „Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau“ am Lehrstuhl für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum. Sie wurde von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation angenommen. An dieser Stelle bedanke ich mich herzlich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark gilt mein besonderer Dank für seine Förderung, Motivation, die wissenschaftliche Leitung und das mir entgegen gebrachte Vertrauen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher danke ich für die freundliche Übernahme des zweiten Gutachtens und die hilfreichen Anregungen. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg für die Übernahme des fachfremden Gutachtens sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Knobloch für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionsprüfungskommission.

Insbesondere gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau – Konstruktionsteilprüfung für die wertvolle Unterstützung bei der Planung und die erfolgreiche Umsetzung meiner experimentellen Versuchsreihen.

Die Fertigstellung meiner Arbeit wäre ohne die freundschaftliche und hilfsbereite Unterstützung der Kollegen am Lehrstuhl nicht möglich gewesen. Dafür bedanke ich mich sehr herzlich. Ebenfalls gilt mein Dank den Kollegen vom SFB 837 für die konstruktive Zusammenarbeit und den Kollegen der HOCHTIEF Engineering GmbH, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Hans-Wilhelm Dorgarten und Herrn Stephan Hamm.

Für ihre Freundschaft, hilfreiche Diskussionen und wertvollen Anregungen bei der fachlichen Durchsicht des Manuskripts danke ich besonders Herrn Dr.-Ing. Mark Alexander Ahrens und Herrn Dr.-Ing. Steffen Schindler.

Für ihre Unterstützung, ihr Verständnis und den bedingungslosen Rückhalt während der gesamten Entstehungszeit dieser Arbeit bedanke ich mich insbesondere bei meinen Eltern Gerda und Reinhard, meiner Schwester Kathrin, meinen Freunden und meiner Freundin Dr.-Ing. Sandra Hohmann.

Bochum, im Juni 2016

Thomas Putke

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Struktur der Arbeit	3
2 Allgemeine Grundlagen der Kontinuumsmechanik und der Finite-Elemente-Methode	7
2.1 Einführung in die Grundlagen der Kontinuumsmechanik	7
2.1.1 Definitionen	8
2.1.2 Deformation und Verzerrung	9
2.1.3 Spannung	11
2.1.4 Bilanzgleichungen	12
2.1.5 Virtuelle Verschiebungen	14
2.1.6 Konstitutivbeziehung und Materialmodellierung	14
2.2 Einführung in die Grundlagen der Finite-Elemente-Methode	16
3 Entwicklung numerischer Berechnungsmodelle zur ganzheitlichen Analyse von Tübbingtunnelschalen	21
3.1 Allgemeine Modellunterteilung	21
3.2 Analytische Berechnungsmodelle	22
3.3 Eigene numerische Berechnungsmodelle	25
3.3.1 Balkenmodell	25
3.3.2 Schalenmodell	27
3.3.3 Bettung der Tunnelschale	29
3.3.4 Ringkopplung	30
3.4 Vergleichsuntersuchungen	34
3.4.1 Analytische und numerische Modelle	34

3.4.2	Einfluss der Lastaufbringung – Erddruckverteilung	38
3.4.3	Modellansätze zur Längsfugenkopplung	42
3.4.4	Gegenüberstellung von Schalen- und Balkenmodell	48
3.5	Beispiel einer Sensitivitätsanalyse für den Endzustand	51
3.5.1	Modellbeschreibung, Entwurfsparameter und Zielgrößen	51
3.5.2	Ausgewählte Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	53
3.6	Untersuchung ausgewählter Bauzustände	57
3.6.1	Bettungsausfall	57
3.6.2	Tulpenform und Sägezahnstellung	60
3.6.3	Zwei Bodenschichten	63
3.6.4	Berücksichtigung von Vortriebspresenkräften	64
3.6.5	Verallgemeinernde Bewertungen	67
4	Optimierungsmethoden für einen verbesserten Entwurf von Stahlbe-	
	tonbauteilen	69
4.1	Methoden der Strukturoptimierung	69
4.2	Formoptimierung und Optimierungsalgorithmen	71
4.2.1	Subproblem Approximation Method	72
4.2.2	First Order Methods	74
4.2.3	Vergleich: Subproblem Approximation und First Order Method	75
4.3	Weiterentwicklung einer anwendungsorientierten Topologieoptimierung	76
4.3.1	Entwicklung und grundsätzliche Möglichkeiten	76
4.3.2	Kontinuumsmechanischer Hintergrund	78
4.3.3	Ablauf des Optimierungsprozesses	82
4.3.4	Zielfunktionen und Restriktionen	83
4.3.5	Verifikation und Benchmarking	86
4.3.6	Netzfeinheit	88
4.3.7	Volumen- und Flächenreduktion	91
4.3.8	Genauigkeitsanforderung und Konvergenz	93
4.3.9	Spannungsverteilung	94
4.3.10	Überführung in Fachwerkmodelle	96
4.3.11	Hinweise zur Robustheit	99
4.3.12	Erweiterung auf den dreidimensionalen Raum	101
4.4	Anwendung am Beispiel der Querkraftkopplung	103
4.4.1	Geometrische Anpassung der Nocke	104

4.4.2	Entwicklung von Fachwerksystemen zum gezielten Lastabtrag . . .	105
4.5	Globale Tragwerksentwürfe	108
5	Experimentelle Untersuchung optimierter Querkraftkopplungskonzepte	111
5.1	Übersicht des Versuchsprogramms	111
5.2	Verwendete Baustoffe und Materialeigenschaften	118
5.2.1	Betone	118
5.2.2	Bewehrungsstahl	120
5.2.3	Stahlfasern und Mikrobewehrung	121
5.3	Versuchsaufbau und Messtechnik	123
5.4	Ergebnisse und Auswertung: Serie S1 – Nocke	126
5.4.1	Einfluss der Geometrie – günstig	126
5.4.2	Einfluss der Geometrie – ungünstig	129
5.4.3	Ausreißertests	132
5.4.4	Zwischenfazit	133
5.5	Ergebnisse und Auswertung: Serie S2 – Topf	135
5.5.1	Fachwerkmodell – abgesetztes Auflager	135
5.5.2	Ohne Bewehrung des Topfes	136
5.5.3	Lokal eingebrachter Stahlfaserbeton	139
5.5.4	Mikrobewehrte Topfkonstruktion	142
5.5.5	Stahlplatte mit angeschweißtem Bewehrungsstab	144
5.5.6	Ausreißertests	147
5.5.7	Zwischenfazit	147
5.6	Ergebnisse und Auswertung: Serie S3 – Stahlbolzen	150
5.6.1	Theorie einbetonierter Stahlbolzen	150
5.6.2	Lokales Betonversagen	155
5.6.3	Fachwerkmodell A	157
5.6.4	Fachwerkmodell B	164
5.6.5	Zwischenfazit	167
5.7	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	168
6	Schlussfolgerungen	173
A	Ergänzungen zur Berechnung von Tübbingtunneln	177
A.1	Ablaufschema Ringkopplung	178

A.2	Ermittlung der Auftriebskraft der Tunnelschale	180
A.3	Ermittlung des Formfaktors f	182
A.4	Ergänzung der numerischen Ergebnisse	183
A.5	Ermittlung der Vortriebspresenkraft	185
B	Optimierungsgrundlagen, Tragwerksentwurf	189
B.1	Grundlagen eines mathematischen Optimierungsproblems	189
B.2	Analytische Lösung eines Dimensionierungsproblems	191
B.3	Topologieoptimierung – Tragwerksentwurf	194
C	Dokumentation der experimentellen Untersuchungen	197
	Literaturverzeichnis	229