

Experimentelle und numerische Untersuchungen an Hochleistungsverbindungen mit Zahnleisten

vorgelegt von

Jens Martin Tandler Master of Science
aus Pirna

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
Institut für Bauingenieurwesen
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid

Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 11. September 2013

Berlin 2013

D 83

Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen
Book Series of the Department of Civil Engineering
Technische Universität Berlin

Band 15

Jens Tandler

**Experimentelle und numerische Untersuchungen
an Hochleistungsverbindungen mit Zahnleisten**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2013

Experimentelle und numerische Untersuchungen an Hochleistungsverbindungen mit Zahnleisten

Dissertationsschrift von Jens Tandler
Fakultät VI – Planen, Bauen, Umwelt
der Technischen Universität Berlin

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid
Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 11.09.2013

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2480-7
ISSN 1868-8357

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

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Anstellung am Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Verbundstrukturen Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid der TU Berlin in der Zeit von 2007 bis 2013.

In der Dissertation werden Verbindungen mit Zahnleisten zur konzentrierten Lasteinleitung von Stahlbauteilen in Betonscheiben untersucht. Ausgehend von den vorliegenden theoretischen Untersuchungen wurden erstmals Versuche zur experimentellen Bestimmung der Traglast und des Last-Verformungs-Verhaltens dieser Verbindung durchgeführt. Unter Einbeziehung von numerischen Methoden und Überlegungen anhand von Stabwerkmodellen wurden die neu gewonnenen Erkenntnisse für die praktische Bemessung interpretiert.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben zahlreiche Personen beigetragen. Als erstes gilt mein besonderer persönlicher Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid für die Anregung und Einführung in das Thema, die zahlreichen konstruktiven wissenschaftlichen Diskussionen im Verlaufe der Arbeit sowie für die Übernahme des ersten Gutachtens. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich für das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des zweiten Gutachtens.

Eine solche Arbeit wäre ohne die Unterstützung der Kollegen des Instituts nicht möglich. Es sei hiermit insbesondere den technischen und den studentischen Mitarbeitern für die Mitwirkung bei der Ausführung der Versuche gedankt. Besonders sollen hier weiterhin die ehemaligen Studenten Erick Carla, Thomas Goschin und Philipp Willenbrink erwähnt werden, die in Ihren Abschlussarbeiten weitere Aspekte zu diesen Verbindungen bearbeitet haben.

Dr. Stefan Eckardt und Dr. Roger Schlegel der Firma Dynardo möchte ich für die Implementierung der von mir vorgeschlagenen Parameter in das Betonmaterialmodell danken.

Wesentlich zur besseren Lesbarkeit der Dissertation haben Dr. Alexander Gaulke und Dr. Stefan Heyde dank Ihrer kritische Durchsicht der Entwürfe für diese Arbeit beigetragen.

Die Unterstützung meiner Familie, insbesondere meiner Frau, war sehr wichtig für die Entstehung dieser Arbeit. Dafür möchte ich mich an dieser Stelle sehr bedanken.

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der konzentrierten Tangentialkrafteinleitung von Stahlbauteilen in Betonkonstruktionen mittels Zahnleistenverbindungen. Verbindungen mit Zahnleisten bestehen aus einem dicken Stahlblech mit Stahlzähnen, welche sich über Druckkräfte im Beton abstützen. Experimentelle und numerische Untersuchungen wurden zur Klärung der Traglast und des Last-Verformungsverhaltens durchgeführt. Als erster Schritt wurden experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit der Verzahnung zwischen Beton und Stahl unter verschiedenen Druckfeldwinkeln durchgeführt. Zusammen mit dem ebenfalls entwickelten numerischen Modell konnte gezeigt werden, dass die Verzahnung verschieden geneigte Druckfelder mit ungefähr derselben Leistungsfähigkeit abstützt. Der Beton im Verbindungsbereich hat eine vergleichbare Tragfähigkeit wie ungestörter Beton. Weiterhin wurde ein Bauteilversuch mit Zahnleistenverbindung entworfen und durchgeführt. Damit konnte die Traglast und die Last-Verformungseigenschaften für druckgestützte innenliegende Zahnleistenverbindungen in einer realitätsnahen Einbausituation untersucht werden. Mit dem ebenfalls entwickelten numerischen Modell konnten die Versuchsergebnisse interpretiert werden. Im Mittelpunkt der interpretativen Überlegungen steht das Verhalten des Betons im querdehnungsbehinderten Bereich um die Zahnleiste unter Druckbeanspruchung. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurde das Vorbemessungskonzept ergänzt.

Abstract

The presented study looks at the transfer of concentrated loads from structural steelwork into concrete structures using saw tooth connectors. Saw tooth connectors consist of a thick steel plate with steel teeth which transfer forces into the surrounding concrete via compressive action. Experimental and numerical investigations have been undertaken in order to clarify the ultimate load and the load deflection behaviour. Firstly, experimental studies into the load carrying capacity of the steel teeth / concrete interface have been conducted. The compressive forces onto the teeth have been applied at varying angles of action. Together with the developed numerical model, it was possible to show that the connector can support forces with varying angles of action with approximately the same resistance. The concrete at the connection has a similar load capacity as an undisturbed concrete section. Secondly, a test of a complete connection within a concrete slab has been designed. The saw tooth connector used, was a two sided connector in a situation with compressive reaction. With this, a load capacity and load deflection test in a real live situation have been undertaken. In combination with the also developed numerical model, the tests were interpreted. Principal considerations were made regarding the compressive behaviour of the structural concrete surrounding the connector subjected to multi axial load conditions. The investigation concluded in an addition to the structural design concept.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Untersuchung des Lastabtrags und Bemessung von Stahlbetonbauteilen	1
1.2	Beton unter Druckbeanspruchungen.....	1
1.3	Entwicklung von Hochleistungsverbindungen mit Zahnleisten	2
1.4	Problemdarstellung	2
1.5	Dissertationsvorhaben.....	3
1.6	Methodik.....	3
1.7	Forschungsumfeld.....	4
2	Stand der Technik und Forschung	5
2.1	Zahnleistenverbindungen in hybriden Tragwerken	5
2.2	Zum Verständnis des Lastabtrags der Zahnleiste	7
2.3	Mechanisches Verhalten von Beton unter Druckbeanspruchungen	8
2.3.1	Spannungs-Dehnungs-Linie von Beton	8
2.3.2	Betondruck- und Zugfestigkeit unter einachsiger und mehrachsiger Beanspruchung	10
2.3.3	Dehnungslokalisierung und Entfestigung	14
2.3.4	Auswirkungen aus Prüfkörpergröße und Belastungsdauer auf die Druckfestigkeit.....	18
2.4	Zweiachsige Beanspruchung von Stahlbetonquerschnitten.....	20
2.5	Beschreibung der Zahnleiste und des Tragverhaltens	22
2.5.1	Zahnleistenverbindungen in verschiedenen Einbausituationen.....	22
2.5.2	Lastabtrag der Zahnleistenverbindung.....	22
2.5.3	Geometrie der Verzahnung	25
2.5.4	Bereits durchgeführte experimentelle Untersuchungen	26
2.5.5	Last-Verformungsverhalten und Einflüsse auf das Tragverhalten von Zahnleisten.....	27
3	Experimentelle Randbedingungen	29
3.1	Betonzusammensetzung, Einbau und Nachbehandlung	29

3.2	Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul.....	30
3.3	Materialeigenschaften des Bau- und Betonstahls.....	32
3.4	Prüfmaschine und Bestimmung der Vertikallast.....	32
3.5	Steuerung des Maschinenvorschubes zur Bestimmung der Traglast.....	33
3.6	Steuerung des Maschinenvorschubes zur Bestimmung der Entfestigung.....	33
3.7	Bedeutung der Zentrierung der Prüfkörper in der Prüfmaschine.....	34
4	Nummerischer Ansatz	36
4.1	Einführende Überlegungen und Ziele	36
4.2	Überblick zum verwendeten Rechenmodell.....	37
4.3	Gewählte Materialparameter für das dreidimensionale Betonmodell.....	38
4.3.1	Einachsige und mehrachsige Festigkeiten.....	39
4.3.2	Spannungs-Dehnungs-Linie	39
4.3.3	Richtung der plastischen Dehnungen	41
4.3.4	Zusammenfassung der Parameter des räumlichen Betonmodells.....	44
4.4	Gewählte Parameter für das zweidimensionale Betonmodell.....	45
4.5	Gewählte Materialparameter für den Stahl	45
4.6	Elemente.....	46
4.7	Kontaktelemente.....	46
4.8	Auswertung der nicht-linearen Berechnungen.....	47
4.9	Druckversuche an einfachen prismatischen und zylindrischen Probekörpern.....	48
4.10	Nachrechnungen der Würfel- und Zylinderdruckversuche.....	52
4.10.1	Nachrechnungen zur Bestimmung der Fließfläche	52
4.10.2	Nachrechnungen zur Bestimmung der einachsigen und mehrachsigen Festigkeiten	55
4.10.3	Nachrechnungen zur Bestimmung der Entfestigungsparameter unter Druckbeanspruchung.....	57
4.10.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Nachrechnungen	60
5	Zahngemetrieuntersuchungen	62
5.1	Versuche.....	62

5.1.1	Geprüfte Zahnleiste.....	62
5.1.2	Ziele	64
5.1.3	Versuchsaufbau.....	65
5.1.4	Versuchsdurchführung.....	66
5.1.5	Versuchsbeobachtungen.....	67
5.1.6	Bruchlasten	71
5.1.7	Gemessene Dehnungsverteilung im Versuchskörper.....	74
5.1.8	Einfache Spannungsberechnungen.....	76
5.1.9	Erkenntnisse aus den Versuchen zur Verzahnung	76
5.2	Berechnungen zur Zahngeometrie	76
5.2.1	Ebene nicht-lineare Berechnungen	76
5.2.2	Dreidimensionale nicht-lineare Berechnung	78
5.2.3	Untersuchung der Versuchsrandbedingungen.....	86
5.2.4	Einfluss der Neigung der Zahnleiste	87
5.2.5	Tragfähigkeit der Verzahnung	89
5.3	Zusammenfassung	89
6	Untersuchungen an Bauteilen mit Zahnleistenverbindungen.....	91
6.1	Bauteilversuche.....	91
6.1.1	Ziele	92
6.1.2	Entwurf und Herstellung der Versuchskörper.....	92
6.1.3	Lasteinleitung und Prüfeinrichtung.....	99
6.1.4	Ausrichten der Prüfkörper.....	100
6.1.5	Versuchsdurchführung.....	101
6.1.6	Versuchsbeobachtungen.....	103
6.1.7	Traglasten.....	106
6.1.8	Dehnungsmessungen.....	106
6.1.9	Auswertung der experimentellen Untersuchung	109
6.2	Bauteilberechnungen	110
6.2.1	Vergleich der Last-Verformungskurve und Untersuchung numerischer Parameter	111

6.2.2	Plastische Dehnungen und Rissentwicklung	113
6.2.3	Vergleich der lokalen Messungen	115
6.2.4	Spannungsrichtungen und Spannungsverläufe entlang der Leiste im Beton.....	117
6.3	Vergleich mit vorhergehenden Untersuchungen.....	121
6.4	Variation der Eingangsgrößen.....	122
6.5	Zusammenfassung.....	125
7	Betrachtungen zur Vorbemessung dieser Zahnleiste	127
7.1	Berechnungsgang und Schnittführung	127
7.2	Überprüfung des Vorbemessungskonzeptes	129
8	Zusammenfassung.....	131
9	Ausblick.....	132
	Bezeichnungen.....	135
	Literaturverzeichnis.....	139
	Anhänge	143
A	Oktaederspannungen, Spannungsinvarianten, Haigh-Westergaard-Koordinaten	144
B	Bestandteile des physikalisch nicht-linearen Rechenmodells	146
B.1	Grundzüge der FEM.....	146
B.2	Physikalisch nicht-lineares Materialverhalten mit einem Plastizitätsmodell	148
B.3	Fließbedingung.....	148
B.4	Fließregel.....	149
B.5	Verfestigung und Entfestigung.....	149
C	Bestimmung der Betondruckfestigkeiten.....	152
D	Bestimmung des Elastizitätsmoduls des Betons	155
E	Würfeldruckversuche	158
F	Versuche zur Verzahnung.....	159
F.1	Betondruckfestigkeitsmessungen	159

F.2	Berechnung der Probekörperdruckfestigkeiten.....	160
F.3	Bestimmung der Arbeitslinie des Betons der Versuche zur Verzahnung.....	162
F.4	Referenzprismen	163
F.5	ZP1 bis ZP3 Last-Verformungsmessungen	164
F.6	ZP1 Detaillierte Messungen.....	164
F.7	ZP2 Detaillierte Messungen.....	166
F.8	ZP3 Detaillierte Messungen.....	167
F.9	ZP4 Detaillierte Messungen.....	169
F.10	ZP5 Detaillierte Messungen.....	170
F.11	ZP6 Detaillierte Messungen.....	172
F.12	ZP7 Detaillierte Messungen.....	173
F.13	ZP8 Detaillierte Messungen.....	175
F.14	ZP9 Detaillierte Messungen.....	176
G	Bauteilversuch.....	178
G.1	Betondruckfestigkeitsmessungen.....	178
G.2	Berechnung der Bauteildruckfestigkeiten.....	180
G.3	Bestimmung der Arbeitslinie des Betons der Bauteilversuche.....	181
G.4	Bewehrungszeichnung für den Bauteilversuch.....	182
G.5	Last-Verformungskurven Bauteilversuche	183
G.6	Bauteilversuch BTV1	183
G.7	Bauteilversuch BTV2	185
G.8	Bauteilversuch BTV3	187
G.9	Bauteilversuch BTV4	188
G.10	Bauteilversuch BTV5	189