



Dipl.-Ing. Franz Xaver Forstlechner

Dünnwandige Tragkonstruktionen aus Carbonbeton –
Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz
im Massivbau

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters

Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue

Institut für Tragwerksentwurf

Graz, November 2014

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die in den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present doctoral dissertation.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Beruflicher und wissenschaftlicher Werdegang

- 10/2000 - 02/2006 Studium Bauingenieurwesen an der Technischen Universität
Graz, Vertiefung: Konstruktiver Ingenieurbau
- 03/2006 - 03/2008 Tragwerksplaner im Ingenieurbüro BauCon ZT GmbH,
Zell am See
- 04/2008 - 09/2008 Tragwerksplaner im Ingenieurbüro Daninger & Partner
Ziviltechniker KG, Graz
- seit 10/2008 Universitätsassistent an der Technischen Universität Graz,
Institut für Tragwerksentwurf, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters

Kurzfassung

Durch die Entwicklung hochleistungsfähiger Betone mit enormer mechanischer Festigkeit, hoher Widerstandsfähigkeit und verlässlich einstellbarer Konsistenz ist es heute möglich, tragende Betonbauteile mit Dicken im Bereich weniger Zentimeter herzustellen. Auch die Entwicklung korrosionsresistenter und hochfester Bewehrungsformen aus Carbonfasern begünstigt diese Tendenz, da sie Betondeckungen im Bereich weniger Millimeter und geringe Bewehrungsgrade zulässt. Die zentrale Forschungsfrage der vorliegenden Dissertation lautet daher, wie maximal fünf Zentimeter dicke Betonbauteile mithilfe von Carbonfasern bewehrt werden sollen, um unter Biegebeanspruchung eine hohe Steifigkeit auf Gebrauchslast-Niveau, und zugleich eine hohe Tragfähigkeit und Duktilität im Bruchzustand zu erreichen? Der in dieser Arbeit verfolgte Lösungsansatz besteht darin, den Beton mittels Textilgelegen aus Carbonfasern möglichst oberflächennah zu bewehren, und in den Bereichen der größten Beanspruchungen zusätzlich zentrische Spannglieder in Form von CFK-Lamellen anzuordnen, die im Spannbett vorgespannt werden.

Die Beantwortung der Forschungsfrage erfolgt einerseits anhand von Laborversuchen, die das Verbundverhalten von Carbonbewehrung und Hochleistungsbetonen bzw. das Biegetragverhalten von schlaff bewehrten und vorgespannten Carbonbeton-Platten untersuchen. Auf Grundlage der Versuche wird ein Modell zur Abbildung des Tragverhaltens aufgestellt, und ein Bemessungskonzept abgeleitet. Andererseits wird die Anwendbarkeit der entwickelten Leitbauweise im größeren Maßstab durch Herstellung eines Prototypens überprüft, der neben Erfahrungen hinsichtlich des geeigneten Bauverfahrens auch Erkenntnisse über die Wirtschaftlichkeit und das Langzeitverhalten liefert. Die gegenständliche Arbeit stellt einen baupraktischen Beitrag zur Entwicklung dünnwandiger Tragkonstruktionen aus Carbonbeton dar, die aufgrund des geringen Eigengewichts und der hohen Dauerhaftigkeit die Ressourceneffizienz im Massivbau steigern sollen.

Abstract

Due to the development of high-performance concrete types with enormous mechanical strengths, high durability and reliably adjustable consistency, it is possible to fabricate structural concrete elements with a thickness of just a few centimetres today. Also, the development of corrosion-resistant and high-strength reinforcement made of carbon-fibres favours this tendency, since it allows concrete-covers within a few millimetres. Therefore, the central research-question of this doctoral thesis is how thin concrete slabs with a maximum thickness of five centimetres should be reinforced in order to attain both, a high flexural stiffness under service load, and a high bending load capacity and ductility? The method of solution followed in the context of this work is to reinforce the concrete with laid webs made of carbon-fibres, which are placed as close as possible to the surface, and to add centric tendons in the areas of greatest stresses, which are pre-stressed in tensioning-bed.

To answer the research question, laboratory tests are performed in order to investigate the bond-behaviour of carbon-reinforcement and high-performance concrete, and to investigate the bending-behaviour of loosely reinforced and pre-stressed carbon-concrete slabs. Based on the obtained test results, a model is created to describe the structural behaviour, and dimensioning recommendations are derived. Furthermore, the feasibility of the developed lightweight construction method is verified on larger scale by manufacturing a prototype, which provides knowledge about the suitable construction method, the economic efficiency, and about the long-term behaviour. The presented work is a building-practical contribution to the development of thin-walled structures made of carbon-concrete, which should increase the resource-efficiency of structural concrete because of its low own-weight and high durability.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragwerksentwurf der TU Graz. Mein besonderer Dank gilt Institutsleiter *Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters*, der mir in den vergangenen sechs Jahren eine selbständige Durchführung meiner Forschungstätigkeiten ermöglichte, und durch zahlreiche Denkanstöße und wertvolle Hinweise maßgeblich zum Gelingen der vorliegenden Promotionsarbeit beitrug. Ebenso bedanke ich mich bei *Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue*, Leiter des Institutes für Betonbau der TU Graz, für seine geschätzten Ratschläge und Kommentare als Zweitgutachter. Des Weiteren möchte ich *Dr. techn. Bernhard Freytag*, Leiter des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz, meinen herzlichen Dank aussprechen. Die Durchführung der umfangreichen experimentellen Untersuchungen wäre ohne seine Unterstützung nicht möglich gewesen. Zu guter Letzt möchte ich mich bei allen weiteren Kollegen und Freunden bedanken, die mich während des Doktorat-Studiums unterstützt und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind, und natürlich auch ganz besonders bei meiner Familie.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	9
Vorwort	11
Inhaltsverzeichnis	13
1 Einleitung	17
1.1 Historische Entwicklung dünner Betonkonstruktionen	17
1.2 Einflussgrößen auf die Dicke von Betonbauteilen.....	19
1.3 Potentielle Anwendungen für dünne Betonbauteile.....	21
2 Ziel und Umfang der Arbeit	23
2.1 Problemstellung, Forschungsfrage und Methoden.....	23
2.2 Erfassung des Kenntnis-Standes über Carbonbeton	24
2.3 Durchgeführte Labor-Versuche	24
2.4 Umgesetzte prototypische Anwendung	28
3 Grundlagen über Carbonbewehrung	29
3.1 Unterschiede zwischen Stahlbeton, Faserbeton und Textilbeton.....	29
3.2 Eigenschaften von Textilbewehrung.....	32
3.3 Geeignete Betonier-Verfahren	36
3.4 Ausgeführte Anwendungsbeispiele.....	37
4 Grundlagen über Hochleistungsbeton	41
4.1 Historische Entwicklung	42
4.2 Mechanische Eigenschaften.....	43
4.3 Wirtschaftliche Aspekte	46
4.4 Ökologische Aspekte	47
4.5 Brandverhalten	52
4.6 Realisierte Tragkonstruktionen	54
5 Verbundverhalten von Hochleistungsbeton und Carbonbewehrung	57
5.1 Wann und wodurch werden Verbundspannungen zwischen Beton und Bewehrung hervorgerufen?.....	57
5.2 Verbundarten.....	58
5.3 Einflussgrößen auf die Verbundfestigkeit.....	59
5.4 Besonderheiten von Bewehrung aus faserverstärkten Kunststoffen.....	61
5.5 Versuchsmäßige Bestimmung der Verbund-Arbeitslinie	63
5.6 Verbundverhalten nach Model Code 2010	64

5.7	Verbundverhalten nach Eurocode EN 1992-1-1	66
5.8	Aktuelle Forschungsergebnisse über das Verbundverhalten von ultra-hochfestem Beton	68
5.9	Aktuelle Forschungsergebnisse über das Verbundverhalten von Bewehrung aus faserverstärkten Kunststoffen.....	70
6	Ausziehversuche	73
6.1	Verwendete Materialien	74
6.2	Oberflächen-Besandung.....	74
6.3	Versuchsaufbau	75
6.4	Versuchsergebnisse und Interpretation	76
7	Spannkraft-Einleitungsversuche	81
7.1	Hintergrund der Versuche	81
7.2	Verwendete Materialien	83
7.3	Versuchsaufbau	88
7.4	Versuchsergebnisse und Interpretation	90
8	Biegeversuche	97
8.1	Versuchsaufbau	97
8.2	Versuchsergebnisse und Interpretation	98
9	Modellbildung und Bemessung dünner Carbonbeton-Platten	103
9.1	Grundlagen über die Biegebemessung von Stahl- und Carbonbeton	103
9.2	Modellierung der Arbeitslinie von Carbonbeton	107
9.3	Bemessungsrelevante Materialkennwerte.....	112
9.4	Biege-Tragfähigkeit	115
9.5	Querkraft-Tragfähigkeit	116
9.6	Verformungsnachweis	117
10	Entwicklung einer frei geformten Schwimmsel aus textilbewehrtem Beton	119
10.1	Einleitung	120
10.2	Entwurf.....	121
10.3	Herstellung des frei geformten Inselkerns	125
10.4	Betonhülle	127
10.5	Begleitende Laborversuche.....	128
10.6	Nachweiskonzept und Dimensionierung	135
10.7	Herstellung einer Musterfläche	138
10.8	Herstellung des Prototypens vor Ort und Befestigung.....	139
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	143
	Literaturverzeichnis	145

