



28

Martin Heimann

**Tragwerkszuverlässigkeit
hochbeanspruchter Druckglieder
aus ultrahochfestem Beton**

DISSERTATION

Tragwerkszuverlässigkeit hochbeanspruchter Druckglieder aus ultrahochfestem Beton

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Martin Bernd Heimann

aus
Rahden / Nordrhein-Westfalen

D 17

Darmstadt 2013

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell

Tag der Einreichung: 28. März 2013

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Juli 2013

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau
Petersenstrasse 12
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

Heimann, Martin Bernd:

Tragwerkszuverlässigkeit hochbeanspruchter Druckglieder aus ultrahochfestem Beton

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 28

ISBN 978-3-942886-04-8

Dr.-Ing. Martin Heimann

Geboren 1977 in Rahden. Von 1998 bis 2000 Ausbildung zum Bauzeichner bei der Fa. Kampha Haus AG in Minden. Von 2000 bis 2001 zunächst Grundstudium des konstruktiven Ingenieurbaus an der Fachhochschule Bielefeld und von 2001 bis 2006 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von Anfang 2007 bis 2009 Mitarbeiter in der Tragwerksplanung bei der Hochtief Consult IKS Energy in Frankfurt a.M. Von 2009 bis Ende 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau und dem Forschungs- und Prüflabor Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit auch als freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt a.M. tätig. Seit 2013 Projektleiter im Baumanagement der BASF SE in Ludwigshafen a. Rhein.

VORWORT

Die vorliegende Niederschrift über meine Forschungstätigkeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt von 2009 bis 2012.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich aufrichtig für das mir entgegengebrachte Vertrauen, seine Unterstützung, die mir gewährten Freiheiten, insbesondere in der experimentellen Forschung, und die mir eröffneten Möglichkeiten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell möchte ich sehr herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates danken.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Unterstützung der Forschung.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Ulf Grziwa und Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Sebastian Pohl möchte ich mich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit bedanken. Herrn Dr.-Ing. Tilo Proske danke ich für seinen Rat und stetem Interesse bei der experimentellen Forschung. Frau Renate Mohr danke ich für die vielen kleinen Hilfestellungen im Alltag am Institut.

Meinen Kollegen und Kolleginnen danke ich ganz besonders für die in beruflicher und privater Hinsicht ausgesprochen herzliche, angenehme aber auch sehr intensive Zeit am Institut, an die ich mich gerne erinnern werde. Darüber hinaus möchte ich mich auch bei allen Studentinnen und Studenten bedanken, die durch ihre Tatkraft zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders erwähnen möchte ich hierbei Herrn Dipl.-Ing. Lukas Stallmeister, Frau Msc. Johanna Wagenblast und Herrn cand.-Ing. Thomas Hessel. Dem Team des Forschungs- und Prüflabors danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Bedanken möchte ich mich an dieser Stelle auch bei Herrn Dr.-Ing. Linh Ngoc Tran, für sein Interesse am Themenkreis der Forschung. Unser steter wissenschaftlicher Disput hat wesentlich zur Tiefe dieser Arbeit beigetragen hat.

Einen ganz besonderen Dank richte ich an Herrn Dr.-Ing. Holger Schmidt ohne dessen Initiative diese Arbeit nicht entstanden wäre. Es erfüllt mich mit Freude, dass eine fortwährende Freundschaft entstanden ist.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern. Ihre Lebenshaltung in Aufrichtigkeit und Geduld war und bleibt mir ein Vorbild.

Der größte Dank gilt jedoch meiner lieben Frau Daniela, die durch ihren Rückhalt, ihr Verständnis und ihre Geduld großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatte. Du bist mir immer ein sicherer Hort.

Alsbach a.d. Bergstraße, August 2013

Martin Heimann

„Das also war des Pudels Kern! ...Der Casus macht mich lachen.“
[Goethe – Faust I]

Zusammenfassung

Die betontechnologischen Entwicklungen erlauben mittlerweile eine zielsichere Herstellung ultra-hochfester Betone (Ultra-High Performed Concrete) mit Druckfestigkeiten von über 150 N/mm². Insbesondere bei hoch beanspruchten Druckgliedern könnten durch die höhere Druckfestigkeit dieses Hochleistungsbaustoffs die im Massivbau bisher üblichen Grenzhöhen deutlich gesteigert, bzw. die zur Lastabtragung erforderlichen Querschnittsabmessungen reduziert werden. Diese positive Entwicklung führt in vielen Fällen zu sehr schlanken und damit stabilitätsgefährdeten Tragsystemen, die äußerst sensitiv auf die nicht vermeidbaren Streuungen der Material- und Bauteileigenschaften reagieren. Obgleich UHPC vergleichbar bessere Materialeigenschaften aufweist als normalfeste und hochfeste Betone, kann diese Entwicklung unter bestimmten Randbedingungen zu einem Einbruch der Tragwerkszuverlässigkeit des Bauteils führen, die das normativ geforderte Zuverlässigkeits-niveau und damit das Sicherheitsbedürfnis nicht mehr erfüllen. Die Kenntnis der Zuverlässigkeit innovativer Stützensysteme aus UHPC ist somit zwingend erforderlich, da durch diesen Hochleistungsbaustoff Anwendungsfälle realisiert werden könnten, für die noch keine ausreichenden baupraktischen Erfahrungen vorliegen und sich die Erkenntnisse, die für normal- und hochfesten Beton vorliegen, nicht ohne weiteres auf UHPC übertragen lassen. Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsprojektes wurden daher auf Werkstoffebene repräsentative Materialmodelle für UHPC abgeleitet und in ein neuentwickeltes leistungsstarkes numerisches Programm zur Berechnung von Betondruckgliedern implementiert. Zur Abschätzung von Modellunschärfen wurde dieses einer Validierung an experimentellen Traglastversuchen unterzogen. Weiterhin wurde die Zuverlässigkeit der Stützen unter Berücksichtigung streuender Eingangsgrößen auf der Basis eines stochastischen Simulationsverfahrens berechnet und unter zu Hilfenahme einer Sensitivitätsstudie ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen ermöglichten der Ermittlung des erforderlichen Teilsicherheitsbeiwertes zur Bemessung von Druckgliedern aus UHPC.

Abstract

Meanwhile concrete-technological developments allow the production of ultrahigh-performed concrete (UHPC) with a compressive strength of more than 150 N/mm². Thus, the cross-sectional dimensions required for highly stressed compression members can be reduced. However, in many cases this positive development increased the trend to even more slender and therefore likelier to buckle structural systems. Hence, it is to be expected that under certain conditions the safety level of such construction elements decreases. An effective Method to estimate the Reliability of slender UHPC-columns is given by the combination of calculating the bearing capacity of columns and stochastic simulations. Within this project numerical models had been developed. Furthermore a Validation of these models at a series of experimental tests was done. In this context a Software-tool for stochastic Simulations was developed at the IfM. Based on this Tool the Reliability of different types of columns was determined. The investigation program focusses its calculations on conventional systems and also on innovative columns e.g. hollow columns. In addition to these calculations the sensitivities of the system- and material parameters was analyzed by a sensitivity study. Based on the results of these studies it was able to determine the required safety factor for designing UHPC columns according to DIN EN 1990.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Vorgehensweise.....	3
2	Technische Grundlagen	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Materialeigenschaften von UHPC.....	7
2.2.1	Allgemeines	7
2.2.2	Betonfestigkeit unter Druck- und Zugbeanspruchung.....	8
2.2.3	E-Modul.....	10
2.2.4	Spannungs-Dehnungs-Beziehung von UHPC	13
2.3	Tragverhalten stabilitätsgefährdeter Stahlbetondruckglieder	14
2.3.1	Tragverhalten von Stahlbetondruckgliedern	14
2.3.2	Beschreibung des Last-Verformungsverhaltens von Stahlbetondruckgliedern durch M-N- κ -Interaktionsdiagramme	15
2.3.3	Beschreibung des Stabilitätsproblems bei Stahlbetondruckgliedern.....	19
2.4	Numerische Modellierung des Tragverhaltens von Stahlbetondruckgliedern	22
2.4.1	Einleitung.....	22
2.4.2	Konzepte zur numerischen Ermittlung der Tragfähigkeit von Druckgliedern	23
2.4.3	Die Spannungsintegration am Querschnitt nach Gauß.....	26
2.4.4	Das Newton-Raphson Verfahren mit Stabilisierung durch Dämpfung	30
2.4.5	Das Übertragungsmatrizenverfahren	31
2.5	Normatives Konzept zur Bemessung von Stahlbetondruckgliedern	34
3	Zuverlässigkeit tragender Baukonstruktionen.....	39
3.1	Einleitung	39
3.2	Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie.....	39
3.2.1	Einführung	39
3.2.2	Beschreibung der Zufallsvariablen durch Verteilungsanpassungen an Daten.....	40
3.2.3	Korrelation von Zufallsvariablen.....	46
3.2.4	Beschreibung von Modellunschärfen	47
3.2.5	Formulierung des Zuverlässigkeitsproblems.....	48
3.2.6	Probabilistische Approximationsverfahren	52

3.3	Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit	54
3.3.1	Numerische Integration	54
3.3.2	Monte-Carlo-Simulation.....	55
3.3.3	Importance Sampling und Adaptive Importance Sampling	58
3.4	Bestimmung von Sicherheitselementen.....	66
3.4.1	Die Sensitivitätsanalyse	66
3.4.2	Bestimmung des Teilsicherheitsabstands	67
3.5	Zuverlässigkeit im Bauwesen	68
3.5.1	Historische Entwicklung.....	68
3.5.2	Definition von Sicherheit.....	69
3.5.3	Zuverlässigkeitstheoretische Grundlagen der Tragwerksplanung.....	70
3.5.4	Modellierung von Widerständen und Einwirkungen.....	72
3.5.5	Zielwert der Zuverlässigkeit	76
4	Untersuchungen zum Tragverhalten schlanker Stützen aus UHPC	83
4.1	Einführung	83
4.2	Traglastversuche an Stützen – Konzept und Programm.....	83
4.3	Verifizierung der Materialeigenschaften von UHPC	85
4.3.1	Ausgangsstoffe und Herstellung der eingesetzten Betone.....	85
4.3.2	Betondruckfestigkeit.....	87
4.3.3	Betonzugfestigkeit	89
4.3.4	E-Modul.....	90
4.3.5	Spannungs-Dehnungs-Beziehung für einachsige Druckbeanspruchung	93
4.3.6	Spannungs-Dehnungs-Beziehung für einachsige Zugbeanspruchung unter Berücksichtigung des Tension-Stiffening-Effektes.....	96
4.3.7	Kriechen und Schwinden	99
4.4	Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Stützen	104
4.4.1	Herstellung der Versuchskörper	104
4.4.2	Begleitende Untersuchungen des Materials.....	105
4.4.3	Versuchsaufbau, messtechnische Erfassung und Versuchsdurchführung	105
4.4.4	Zusammenfassung der Versuchsaufzeichnungen	107
4.4.5	Vergleich der Ergebnisse von Stützen aus NSC, HSC und UHPC	108
4.4.6	Aufnahme charakteristischer Parameter	112
4.5	Numerische Modellierung von Stahlbetonstützen.....	116
4.5.1	Aufbau der Programmstruktur	116
4.5.2	Validierung von QS	117
4.5.3	Validierung von STAB	119
4.5.4	Herleitung der Modellunschärfe	122
4.5.5	Wirkung des Ansatzes zur Berücksichtigung der Effekte aus Schwinden ...	123

5	Stochastische Untersuchungen auf Querschnittsebene.....	125
5.1	Parameterstudie mit QS	125
5.1.1	Einleitung und Angaben zum Untersuchungsprogramm.....	125
5.1.2	Überlegungen zum Werkstoffverhalten von UHPC auf Grundlage von M-N-Interaktionsdiagrammen und Momenten-Krümmungs-Beziehungen .	126
5.2	Stochastische Parameter der Widerstandseite	132
5.3	Stochastische Untersuchungen auf Querschnittsebene.....	134
5.3.1	Stochastisches M-N-Interaktionsdiagramm	134
5.3.2	Stochastische M- κ -Beziehung.....	138
5.4	Auswertung mittels Variationskoeffizient der Momententragfähigkeit.....	143
5.4.1	Einleitung.....	143
5.4.2	Variationskoeffizient der Momententragfähigkeit	143
5.4.3	Parameterstudie an Stützenquerschnitten	145
5.4.4	Darstellung der Ergebnisse ausgewählter Untersuchungsfälle.....	146
5.5	Wesentliche Schlussfolgerungen aus den Querschnittsuntersuchungen	152
6	Zuverlässigkeit schlanker Stützen aus UHPC	155
6.1	Abgrenzung des Untersuchungsraums	155
6.2	Systemanalyse mit der Softwareapplikation CORA	156
6.2.1	Grundlegende Annahmen	156
6.2.2	Ermittlung der Bemessungsgrößen (Bemessungspunkt).....	157
6.2.3	Stochastische Parameter der Einwirkungsseite	158
6.2.4	Validierung der Software CORA	159
6.3	Stochastische Systemanalyse.....	164
6.3.1	Untersuchungsprogramm.....	164
6.3.2	Einfluss der Systemwahl	165
6.3.3	Auswirkung des Lastverhältnisses Q_k/G_k	168
6.3.4	Zuverlässigkeitsbezogene Merkmale bedeutender Materialparameter	170
6.3.5	Einfluss der Wahl der Querschnittsform	181
6.3.6	Reduzierung von Querschnittsabmessungen	183
6.3.7	Adaption der Modellunschärfe zur Berücksichtigung der Schwindeffekte..	190
6.3.8	Zusammenfassung wesentlicher Erkenntnisse	192
6.4	Modellierung der Betonzugfestigkeit als räumliches Zufallsfeld.....	194
6.4.1	Einleitung und Grundlagen.....	194
6.4.2	Modellbildung der Autokorrelation.....	195
6.5	Zuverlässigkeits- und Sensitivitätsanalyse mit räumlichem Zufallsfeld	197

7	Bestimmung erforderlicher Sicherheitselemente	
	für Druckglieder aus UHPC	199
7.1	Wahl geeigneter Sicherheitselemente.....	199
7.2	Adaption der Sicherheitselemente	200
7.2.1	Methoden zur Bestimmung erforderlicher Werte der Sicherheitselemente	200
7.2.2	Bestimmung erforderlicher Teilsicherheitsbeiwerte.....	201
7.3	Anwendungsempfehlungen für die Baupraxis	206
8	Resümee und Ausblick	209
9	Literaturverzeichnis	215
	Anhang	229

Martin Heimann

Tragwerkszuverlässigkeit hochbeanspruchter Druckglieder aus ultrahochfestem Beton

Der Einsatz ultrahochfester Betone (UHPC) erlaubt eine Erweiterung des Anwendungsbereichs bisher üblicher und bewährter Massivbaukonstruktionen. Da das Tragverhalten eines Bauteiles über seinen Lebenszyklus mit entsprechenden Unsicherheiten bzgl. der Einwirkungen sowie der Material- und Systemeigenschaften behaftet ist, stellt sich hierbei die Frage, bis zu welchen Anwendungsgrenzen schlanke UHPC-Druckglieder die Anforderungen an die normativ geforderte Tragwerkszuverlässigkeit noch erfüllen.

Diese Arbeit enthält eine systematische Untersuchung der Tragwerkszuverlässigkeit von UHPC-Druckgliedern zur Ableitung erforderlicher Teilsicherheitsbeiwerte für das „nichtlineare Verfahren“ nach DIN EN 1992. Hierzu wurden auf Werkstoffebene repräsentative Materialmodelle für UHPC abgeleitet und in ein neuentwickeltes leistungsstarkes numerisches Programm zur Berechnung von Betondruckgliedern implementiert. Zur Abschätzung von Modellunschärfen wurde dieses einer Validierung an Traglastversuchen unterzogen. Darüber hinaus wurde die Zuverlässigkeit der Stützen unter Berücksichtigung streuender Eingangsgrößen auf der Basis eines stochastischen Simulationsverfahrens berechnet und unter zu Hilfenahme einer Sensitivitätsstudie ausgewertet.

