

# **Zuverlässigkeit schlanker UHPC-Druckglieder mit räumlich streuenden Materialeigenschaften**

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

DISSERTATION

von

**Dipl.-Ing. Ulf Grziwa**

aus  
Wassertrüdingen

**D 17**

**Darmstadt 2017**

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell

Tag der Einreichung: 22. November 2016

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Februar 2017

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Massivbau  
Franziska-Braun-Straße 3  
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.tu-darmstadt.de/massivbau>

Grziwa, Ulf:

Zuverlässigkeit schlanker UHPC-Druckglieder mit räumlich streuenden Materialeigenschaften

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 33

ISBN 978-3-942886-10-9

Ulf Grziwa

Geboren 1982 in Wassertrüdingen. Von 2002 bis 2008 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2008 bis 2011 Mitarbeiter im Ingenieurbüro CSZ Ingenieurconsult Cornelius-Schwarz-Zeitler GmbH in Darmstadt/Eberstadt. Von 2011 bis 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit auch als freier Mitarbeiter in verschiedenen Ingenieurbüros tätig. Seit 2016 Mitarbeiter im Ingenieurbüro Kleinhofen + Schulenberg GbR in Darmstadt.

# VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich aufrichtig für seine Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

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

Ein besonderer Dank für die hilfreichen wissenschaftlichen Diskussionen und die sorgfältige Durchsicht der Entwurfsfassung dieser Arbeit gilt insbesondere Herrn Dr.-Ing. Ngoc Linh Tran, Herrn Dominik Müller, M.Sc. und Herrn Valentin Förster, M.Sc.

Bedanken möchte ich mich bei den Studierenden, die im Rahmen von Studienarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Massivbau bin ich für das vertrauensvolle und freundschaftliche Verhältnis sehr dankbar. Die gemeinsame Zeit wird mir in freudiger Erinnerung bleiben.

Meinen Eltern Gertrud und Peter sowie meiner Familie danke ich von ganzem Herzen für die fortwährende Unterstützung und die damit verbundenen Möglichkeiten.

Der größte Dank gilt meiner lieben Frau Claudia, die durch ihren stetigen Rückhalt, ihre Unterstützung und ihre Geduld wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Zwingenberg, Februar 2017

Ulf Grziwa



# Zusammenfassung

In den vergangenen 70 Jahren wurde die Entwicklung von Betonen mit immer höheren Druckfestigkeiten kontinuierlich vorangetrieben, so dass derzeit sog. ultrahochfeste Betone (UHPC) mit Festigkeiten von bis zu  $250 \text{ N/mm}^2$  zielsicher hergestellt werden können. Ein wirtschaftlicher Materialeinsatz bedingt in vielen Fällen eine hohe Ausnutzung des Werkstoffes, so dass bei Druckgliedern aus UHPC die Reduzierung der Querschnittsabmessungen angestrebt wird. Sehr schlanke Tragsysteme sind jedoch stabilitätsgefährdet. Aufgrund des im Vergleich zu Bauteilen aus konventionellem Beton geringen Materialeinsatzes haben Stör- bzw. Fehlstellen innerhalb des Querschnitts signifikante Auswirkungen auf die Traglast. Durch die Beimischung von Fasern ist davon auszugehen, dass mit steigendem Fasergehalt auch die Materialinhomogenität und dadurch (im Falle sehr hohen Fasergehaltes) die Wahrscheinlichkeit des Auftretens traglastmindernder Fehlstellen über die Bauteillänge zunimmt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden trag- und zuverlässigkeitsbestimmende Materialstreuungen näher untersucht. Hierbei wurde insbesondere der Einfluss der Faserorientierung und der Faserverteilung auf die Parameter Betondruck- und Betonzugfestigkeit sowie auf den Beton-Elastizitätsmodul betrachtet. Durch die Auswertung umfangreicher experimenteller Versuchsreihen konnten statistische Kennwerte der Materialparameter ermittelt und den Zuverlässigkeitsbetrachtungen zugrunde gelegt werden. Neben der Bestimmung der Korrelation zwischen einzelnen Materialparametern fanden auch deren Streuungsverläufe über die Bauteillänge mit Hilfe von Autokorrelationsfunktionen und der Methodik der Zufallsfelder Eingang in die Modellierung. Auf Grundlage der Ergebnisse durchgeführter Zuverlässigkeitsanalysen wurden die Auswirkungen der räumlichen Materialinhomogenität auf die Tragwerkszuverlässigkeit bestimmt und die zur Bemessung schlanker Druckglieder aus UHPC erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte abgeleitet.

## Abstract

The development of concrete with more and more strength has been pushed forward continuously in the past seventy years which now makes it possible to produce ultra-high strength concrete (UHPC) with a compressive strength up to  $250 \text{ N/mm}^2$ . Economical material consumption requires a high utilization of the material. This results in reduced dimensions of cross-sections and therefore slender structures which could fail due to instability. Because of the reduced usage of material compared to conventional concrete, defects may have a significant impact on the load-bearing capacity of a member. It can be assumed that, by adding fibres, the inhomogeneity and thereby the probability of the occurrence of defects is increased. Within this thesis, the variations of material properties which determine the load-carrying capacity and the reliability of a member were examined. This includes the parameters compressive and tensile strength of the ultra-high strength concrete as well as its modulus of elasticity. By the assessment of extensive experimental series, statistical properties of these material parameters were determined and then used for reliability analyses. In addition to the correlation between different material parameters, the spatial variation of the material properties was included in the model by the use of autocorrelation functions and the method of random fields. Based on the results of the reliability analyses, the effects of this material inhomogeneity on the structural reliability were identified and partial safety factors for the design of slender compression members made from UHPC were derived.



---

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Zielsetzung .....	2
1.3	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2</b>	<b>Materialeigenschaften und Tragverhalten von Druckgliedern aus Faserbeton....</b>	<b>7</b>
2.1	Materialeigenschaften von ultrahochfestem Faserbeton .....	7
2.1.1	Allgemeines .....	7
2.1.2	Ausgangsstoffe .....	7
2.1.3	Stahlfasern .....	8
2.1.4	Druckfestigkeit .....	8
2.1.5	Zugfestigkeit.....	9
2.1.6	Elastizitätsmodul des Betons .....	11
2.2	Faserverteilung und Faserorientierung .....	12
2.2.1	Allgemeines .....	12
2.2.2	Faserorientierungsbeiwert .....	13
2.2.3	Experimentelle Bestimmung des Faserorientierungsbeiwertes .....	17
2.2.4	Beeinflussung der Faserausrichtung.....	22
2.2.5	Korrelation zwischen Faserorientierung und Materialeigenschaften .....	24
2.3	Tragverhalten schlanker Stahlbetondruckglieder .....	28
2.3.1	Allgemeines .....	28
2.3.2	Querschnittstragfähigkeit.....	29
2.3.3	Stabilitätsversagen .....	31
2.4	Bemessung von Stahlbetondruckgliedern .....	36
2.4.1	Allgemeines .....	36
2.4.2	Allgemeines Verfahren.....	39
2.4.3	Nichtlineares Verfahren.....	40
2.4.4	Verfahren mit Nennkrümmung .....	41
2.4.5	Vergleich bestehender Bemessungsverfahren .....	49
2.5	Modellierung des Tragverhaltens von faserbewehrten Betondruckgliedern .....	52
2.5.1	Allgemeines .....	52
2.5.2	Spannungsintegration am Querschnitt.....	53
2.5.3	Iteration der Dehnungsebene mit Hilfe des Newton-Raphson-Verfahrens ....	54
2.5.4	Übertragungsmatrizenverfahren .....	55
2.5.5	EDV-gestützte Modellierung von Stahlbetonstützen .....	56

<b>3</b>	<b>Grundlagen der Zuverlässigkeit von Tragwerken .....</b>	<b>59</b>
3.1	Grundlagen .....	59
3.1.1	Grundbegriffe der deskriptiven Statistik .....	59
3.1.2	Verteilungen von Zufallsgrößen .....	61
3.1.3	Testverfahren zur Überprüfung des Verteilungsmodells.....	65
3.1.4	Korrelation von Zufallsvariablen.....	66
3.1.5	Autokorrelation.....	68
3.1.6	Zufallsvektoren .....	70
3.2	Zufallsfelder.....	73
3.2.1	Allgemeines .....	73
3.2.2	Beschreibung von Zufallsfeldern.....	73
3.2.3	Berücksichtigung von Zufallsfeldern in der FE-Modellierung .....	75
3.2.4	Diskretisierung von Zufallsfelder mit Hilfe der Reihenentwicklung .....	75
3.3	Grundlagen des probabilistischen Sicherheitskonzeptes .....	84
3.3.1	Einführung .....	84
3.3.2	Grundprinzip der Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten.....	84
3.3.3	Zuverlässigkeitsindex und Teilsicherheitsbeiwerte .....	86
3.4	Probabilistische Berechnungsverfahren .....	91
3.4.1	Allgemeines .....	91
3.4.2	Näherungsverfahren zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit .....	92
3.4.3	Stochastische Finite Element Methode (SFEM).....	93
3.4.4	Monte-Carlo-Simulation (MCS).....	94
3.4.5	Dynamisch optimierte Erzeugung von Basisvariablen.....	95
3.4.6	Sensitivitätsanalyse.....	98
3.5	Normatives Zuverlässigkeitsniveau.....	99
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen.....</b>	<b>105</b>
4.1	Allgemeines .....	105
4.2	Untersuchungen zur Bestimmung statistischer Kenngrößen .....	106
4.2.1	Konzept der experimentellen Untersuchungen.....	106
4.2.2	Beton-Druckfestigkeit.....	109
4.2.3	Beton-Elastizitätsmodul.....	111
4.2.4	Beton-Zugfestigkeit .....	114
4.2.5	Faseranzahl und Faserorientierung .....	117
4.2.6	Ergänzende Untersuchungen mit Variation der Fasergeometrie .....	124

4.3	(Auto-) Korrelationen zwischen traglastbestimmenden Materialparametern ....	126
4.3.1	Einleitung.....	126
4.3.2	Ableitung von Korrelationskoeffizienten .....	126
4.3.3	Ermittlung von Autokorrelationsfunktionen .....	132
4.3.4	Streuung geometrischer Parameter .....	137
<b>5</b>	<b>Modellierung des Tragverhaltens von UHPC-Druckgliedern .....</b>	<b>139</b>
5.1	Überblick .....	139
5.2	Materialkennwerte von UHPC .....	139
5.2.1	Spannungs-Dehnungs-Beziehungen.....	139
5.2.2	Kriechen und Schwinden.....	143
5.3	Validierung des FE-Modells.....	143
5.4	Modellierung von Zufallsfeldern mit korrelierten Materialparametern .....	146
5.5	Traglastermittlung schlanker Stützen mit modellierter Materialinhomogenität	150
5.5.1	Allgemeines .....	150
5.5.2	Einfluss des statischen Systems auf die Traglaststreuung.....	151
5.5.3	Einfluss modellierter Materialinhomogenität auf die Traglaststreuung .....	153
5.5.4	Einfluss variierender Autokorrelationslängen auf die Stützentraglast .....	156
5.5.5	Streuung von Materialkennwerten (nicht) korrelierter Zufallsfelder .....	157
5.6	Zusammenfassung .....	161
<b>6</b>	<b>Tragwerkszuverlässigkeit von Druckgliedern aus UHPC.....</b>	<b>163</b>
6.1	Allgemeines .....	163
6.2	Abgrenzung des Untersuchungsraumes.....	164
6.3	Stochastische Kennwerte der Basisvariablen .....	167
6.4	Grenzbetrachtungen unter Ansatz vollständig korrelierter Zufallsfelder .....	167
6.5	Bestimmung des rechnerisch erforderlichen Simulationsumfangs .....	172
6.6	Einfluss des statischen Systems und der Autokorrelationslänge.....	174
6.7	Zuverlässigkeitsanalysen schlanker UHPC-Druckglieder.....	176
6.8	Einfluss von Materialstreuungen auf die Tragwerkszuverlässigkeit.....	178
6.8.1	Allgemeines .....	178
6.8.2	Betondruckfestigkeit.....	178
6.8.3	Betonzugfestigkeit .....	180
6.8.4	Betonelastizitätsmodul.....	181
6.9	Ableitung der Teilsicherheitsbeiwerte.....	183

<b>7</b>	<b>Vorschlag zur Modifikation des bestehenden Bemessungsverfahrens.....</b>	<b>187</b>
7.1	Allgemeines .....	187
7.2	Rissmoment $M_{cr}$ als bemessungsrelevante Schnittgröße.....	188
7.3	Bemessungsmoment unter geringer Normalkraftbeanspruchung.....	191
7.4	Vergleichsrechnungen zur Bestimmung der Traglast schlanker Druckglieder ..	193
7.4.1	Festlegung der Eingangsparameter .....	193
7.4.2	Vergleich von Traglasten mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren .....	197
7.5	Ansatz zur Modifikation des Verfahrens mit Nennkrümmung .....	199
7.6	Ableitung des Korrekturbeiwertes $K_2$ .....	199
7.7	Berechnungshilfen für die Praxis .....	202
7.8	Zusammenfassung .....	205
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>207</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>213</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>223</b>