

Oliver Fischer, Thomas Lechner, Martin Mensinger,  
Joseph Ndogmo, Günter Seidl, Mislav Stambuk

**Entwicklung dünnwandiger,  
flächenhafter Konstruktionselemente  
aus UHPC und geeigneter  
Verbindungstechniken zum Einsatz im  
Hoch- und Industriebau**

F 2912

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9285-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

Lehrstuhl für Massivbau  
Institut für Baustoffe und Konstruktion  
Technische Universität München

Abschlussbericht

# Entwicklung dünnwandiger, flächenhafter Kon- struktionselemente aus UHPC und geeigneter Verbindungstechniken zum Einsatz im Hoch- und Industriebau

Prof. Oliver Fischer  
Dipl.-Ing. Thomas Lechner  
Prof. Martin Mensinger  
Dr. Joseph Ndogmo  
Dr. Günter Seidl  
Dipl.-Ing. Mislav Stambuk

München, den 28.02.2014

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

(Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.14 / II 3-F20-10-1-132)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

## **DANKSAGUNG**

Das vorliegende Projekt wurde seitens des BBR begleitet durch:

### **Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. (FH) Michael Brüggemann**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung  
Deichmanns Aue 31-37  
53179 Bonn

Als Mitglieder des wissenschaftlichen Beirats stellten sich zur Verfügung:

### **Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach**

Technische Universität Dresden  
Institut für Massivbau  
Helmholtzstr. 10  
01069 Dresden

### **Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell**

Technische Universität Kaiserslautern  
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktionen  
Paul-Ehrlich-Straße  
Gebäude 14  
67663 Kaiserslautern

### **Dr.-Ing. Walter Streit**

Büchting + Streit AG  
Gunzenlehstr. 22  
80689 München

Die Forschungsnehmer und Autoren dieses Berichts bedanken sich bei Herrn Dr. Brüggemann für die Unterstützung bei diesem Projekt. Weiterhin sei den Mitgliedern des wissenschaftlichen Beirats für die konstruktive Unterstützung gedankt.

Die Forschungsarbeit wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (SF – 10.08.18.7-11.14 / II 3-F20-10-1-132). Zusätzlich erfolgte eine Unterstützung durch die Firmen Max Bögl GmbH und Hentschke Bau GmbH, wofür sich die Forschungsnehmer ebenfalls bedanken möchten.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Vorbemerkung .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivation.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3</b>	<b>Methodik .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>STAND DER TECHNIK.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Ultrahochleistungsbeton (UHPC).....</b>	<b>4</b>
2.1.1	Allgemeines zum UHPC.....	4
2.1.2	Ausgangsstoffe.....	5
2.1.3	Festbetoneigenschaften .....	9
2.1.4	Hinweise zur Wirtschaftlichkeit und den Lebenszykluskosten.....	18
<b>2.2</b>	<b>Verbunddübelleisten .....</b>	<b>19</b>
2.2.1	Entwicklung der kontinuierlichen Verbundmittel.....	19
2.2.2	Aktuelle Bemessungsgrundsätze.....	20
2.2.3	„Liegende“ Verbunddübelleisten .....	26
<b>2.3</b>	<b>Alternative Verbindungstechniken .....</b>	<b>27</b>
2.3.1	Lokale Krafteinleitung und Verbindung mittels Implantaten .....	27
2.3.2	Fügen von UHPC-Bauteilen mit Epoxidharz.....	27
2.3.3	Fügen von UHPC-Bauteilen mit RPC .....	29
2.3.4	Bewertung der nicht-mechanischen Verbindungstechniken .....	30
<b>3</b>	<b>KONSTRUKTION DER WANDELEMENTE VOR DEM HINTERGRUND BAUPRAKTISCHER ANFORDERUNGEN .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Anwendungsgebiete .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Konstruktion der Wandelemente .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Baupraktische Spezifikationen .....</b>	<b>35</b>
3.3.1	Lastannahmen .....	36
3.3.2	Beanspruchungen in der Verbunddübelleiste.....	36
3.3.3	Beanspruchung der Wandscheiben .....	37
3.3.4	Konstruktive Randbedingungen.....	38
3.3.5	Bauphysikalische Anforderungen .....	38
3.3.6	Anforderungskatalog.....	40
<b>3.4</b>	<b>Anwendungsbeispiel: Aufstockung einer historischen Zigarrenfabrik .....</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>UNTERSUCHUNG VON VERBUNDDÜBELLEISTEN IN DÜNNEN UHPC-SCHEIBEN .....</b>	<b>45</b>

<b>4.1</b>	<b>Verbundmittel in UHPC.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>46</b>
4.2.1	Versuchskörper .....	47
4.2.2	Versuchsaufbau und –durchführung .....	51
4.2.3	Versuchsergebnisse und Auswertung .....	52
4.2.4	Untersuchungen bei nicht-ruhender Belastung .....	59
4.2.5	Untersuchungen zu Push-Out-Körpern mit Randeinfassung .....	62
<b>4.3</b>	<b>Ergebnisse der optischen Messungen.....</b>	<b>64</b>
<b>4.4</b>	<b>Numerische Untersuchungen.....</b>	<b>68</b>
4.4.1	Nichtlineare Finite Elemente Berechnungen .....	68
4.4.2	Materialmodellierung von Beton .....	71
4.4.3	Modellbildung in ABAQUS .....	74
4.4.4	Ergebnisse der Finite Elemente Berechnungen .....	78
<b>4.5</b>	<b>Numerische Formoptimierung .....</b>	<b>82</b>
4.5.1	Grundlagen zur Strukturoptimierung .....	82
4.5.2	Ablauf einer Formoptimierung .....	83
4.5.3	Formoptimierung der Stahldübel .....	85
<b>4.6</b>	<b>Einfluss eines nachträglichen Verschweißens .....</b>	<b>90</b>
4.6.1	Vorbereiten der Versuchskörper .....	90
4.6.2	Durchführung der Schweißversuche .....	93
4.6.3	Ergebnisse der Thermoelemente.....	93
4.6.4	Ergebnisse der Thermographie .....	96
4.6.5	Auswertung und Schlussfolgerungen der Schweißversuche.....	97
<b>5</b>	<b>STABILITÄTSVERHALTEN DÜNNER SCHEIBEN AUS UHPC.....</b>	<b>100</b>
<b>5.1</b>	<b>Beulversuche in der Literatur.....</b>	<b>100</b>
5.1.1	Beuluntersuchungen mit normal- und hochfestem Beton .....	100
5.1.2	Beuluntersuchungen mit UHPC.....	102
<b>5.2</b>	<b>Finite Elemente Simulation der Beulversuche mit UHPC .....</b>	<b>105</b>
5.2.1	FE-Berechnungen anderer Forscher .....	105
5.2.2	Eigene FE-Berechnungen .....	106
<b>5.3</b>	<b>Ermittlung des Einspanngrades von dünnen Scheiben aus UHPC mit Verbunddübelleisten.....</b>	<b>110</b>
5.3.1	Vordimensionierung durch eine FE-Simulationen .....	110
5.3.2	Versuchsaufbau und Messtechnik.....	111
5.3.3	Herstellung der Versuchskörper .....	112
5.3.4	Versuchsdurchführung und -ergebnisse.....	117
5.3.5	Ermittlung des Einspanngrades.....	127
5.3.6	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse.....	130
5.3.7	Nachrechnungen der Versuche zur Ermittlung des Einspanngrades mit ABAQUS	130

<b>5.4</b>	<b>Tragfähigkeit dünner Scheiben ohne Öffnungen - Bemessungsvorschlag .....</b>	<b>134</b>
<b>5.5</b>	<b>Einfluss von Öffnungen auf die Stabilität.....</b>	<b>136</b>
5.5.1	Numerische Berechnungen .....	136
5.5.2	Empfehlungen für verschiedene Öffnungstypen.....	138
<b>6</b>	<b>DIMENSIONIERUNG DER WANDELEMENTE UND ANSCHLUSSKONSTRUKTIONEN.....</b>	<b>139</b>
<b>6.1</b>	<b>Tragfähigkeit von Wandelementen aus UHPC .....</b>	<b>139</b>
<b>6.2</b>	<b>Verbunddübelleisten in Wandelementen aus UHPC .....</b>	<b>139</b>
6.2.1	Filigrane Wände mit geringer Beanspruchung .....	140
6.2.2	Wände mit höheren Beanspruchungen.....	140
<b>6.3</b>	<b>Öffnungen in Wandelementen aus UHPC .....</b>	<b>140</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>141</b>
	<b>LITERATUR.....</b>	<b>144</b>
	<b>ANHANG A – VERSUCHSSKIZZEN UND PLÄNE .....</b>	<b>A-1</b>