

Milan Schultz-Cornelius, Stefan Carstens, Matthias Pahn

**FIUHFA –  
Unbewehrte Ultrahochleistungs-  
Fassadenplatten**

Wirklichkeitsnahes Tragverhalten von  
unbewehrten, filigranen Ultrahochleistungs-  
Fassadenplatten

F 3239

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) 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 reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2021

ISBN 978-3-7388-0656-4

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/bauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung)

**FIUHFA -**

## **Unbewehrte Ultrahochleistungsbeton Fassadenplatten**

Wirklichkeitsnahes Tragverhalten von unbewehrten,  
filigranen Ultrahochleistungsbeton Fassadenplatten

**Milan Schultz-Cornelius; Stefan Carstens; Matthias Pahn**

Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Autorinnen und Autoren wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Förderkennzeichen: SWD-AZ 10.08.18.7-18.49

Projektlaufzeit: 01.03.2019 – 28.02.2021

Gefördert durch:



**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Kurzfassung

Innovative Entwicklungen im Bereich der Ultrahochleistungsbetone (UHPC) ermöglichen den Bau filigraner, energieeffizienter und nachhaltiger Architekturbetonfassaden mit wenigen Zentimetern Bauteildicke. Allerdings stellen aufwendige und teure Bewehrungslösungen ein Hemmnis für deren flächendeckenden Einsatz dar. Erst durch den Verzicht auf Bewehrungsmaterialien ist es möglich, Fassaden aus Ultrahochleistungsbeton wirtschaftlich bei vollständiger Recyclbarkeit einzusetzen. Die dafür verwendeten Ultrahochleistungsbetone zeichnen sich durch Biegezugfestigkeiten von bis zu 20 N/mm<sup>2</sup> aus. Durch die hohen Biegezugfestigkeiten des Ultrahochleistungsbetons können neben kleinformatischen Betonwerksteinfassaden auch großformatige Fassaden aus Ultrahochleistungsbeton ausgeführt werden. Die Ausführung als kleinformatische Betonwerksteinfassade ist normativ geregelt und Stand der Technik. Für die Anwendung als großformatige Fassadenplatte fehlen weitergehende Erkenntnisse zu den Einwirkungen und den Widerständen in der Bemessung. Die großformatige Ausführung der Fassadenplatten bedingt jedoch eine mehrfach punktgestützte Lagerung, die eine statische Unbestimmtheit aufweist. Indirekte Einwirkungen wie Temperaturänderungen, das Schwinden der Vorsatzschale aus Ultrahochleistungsbeton oder hygrische Einwirkungen bewirken daher zusätzliche Beanspruchungen der Fassadenplatte und dessen Verankerung, die in der Bemessung zu berücksichtigen sind. In der Bemessung sind weiterhin mehraxiale Spannungszustände, Maßstabeffekte und der Einfluss erhöhter Temperaturen auf die Festigkeit des Ultrahochleistungsbetons zu berücksichtigen.

Zentrale Zielstellung des Forschungsprojektes ist die Erforschung des wirklichkeitsnahen Tragverhaltens von unbewehrten, punktgestützten UHPC-Fassadenplatten und die Erarbeitung eines allgemeingültigen Bemessungsmodells. Die Ermittlung der Widerstände des Ultrahochleistungsbetons für die Bemessung soll zur Vereinfachung aus den Ergebnissen von 3-Punkt-Biegeversuchen abgeleitet und weitere Einflüsse durch vordefinierte Parameter berücksichtigt werden.

Dazu werden an kleinformatischen Probekörpern experimentelle Untersuchungen zum Maßstabeffekt, zur Korrelation zwischen zentrischer Zugfestigkeit, der uni- und der biaxialen Zugfestigkeit durchgeführt. Weiterhin werden Untersuchungen zum Einfluss erhöhter Temperaturen und zum Einfluss der Gesteinsart und des Größtkorndurchmessers auf die uniaxiale Biegezugfestigkeit durchgeführt. Zur Beschreibung wirklichkeitsnaher Einwirkungen werden Oberflächentemperaturen für Vorsatzschalen aus UHPC ermittelt sowie der Einfluss der Gesteinsart auf den Temperaturexpansionskoeffizienten und auf die Schwinddehnung bestimmt.

Das wirklichkeitsnahe Tragverhalten der Fassadenkonstruktion unter Windbelastung wird an großformatigen Probekörpern im Unterdruckprüfstand experimentell untersucht. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen bilden die Grundlage zur Validierung der nachfolgenden Parameterstudie mittels Finiter Elemente Methode. Mittels der FE-Methode wird eine Konvergenzuntersuchung durchgeführt, um Hinweise für die Ermittlung der Schnittgrößen zu definieren. Nachfolgend wird eine Sensitivitätsanalyse zum Einfluss von Imperfektionen der Unterkonstruktion durchlaufen. Abschließend werden Ingenieur- und Bemessungsmodelle abgeleitet sowie Konstruktionsregeln für großformatige unbewehrte Fassadenplatten aus Ultrahochleistungsbeton definiert. Das im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Bemessungskonzept basiert auf den Ergebnissen von 3-Punkt-Biegeversuchen und ermöglicht simultan die Modifikation an die jeweils vorliegende Betonrezeptur unter Verwendung regionaler Zuschläge.

# Abstract

Innovative developments in the field of ultra-high performance concrete (UHPC) enable the construction of filigree, energy-efficient and sustainable architectural concrete façades with a component thickness of only a few centimetres. However, complex and expensive reinforcement solutions are an obstacle to their widespread use. Only by dispensing with reinforcement materials is it possible to use façades made of ultra-high performance concrete economically and with complete recyclability. The ultra-high performance concretes used for this purpose are characterised by bending tensile strengths of up to 20 N/mm<sup>2</sup>. Due to the high bending tensile strength of the ultra-high performance concrete, large-format façades can be made of ultra-high performance concrete in addition to small-format concrete block façades. The design as a small-format concrete block façade is normatively regulated and state of the art. For the application as a large-format façade panel, however, there is a lack of further knowledge about the actions and the resistances in the design. However, the large-format design of the façade panels requires a multiple point-supported bearing, which has a static indeterminacy. Indirect effects such as temperature changes, shrinkage of the facing shell made of ultra-high performance concrete or hygric effects, therefore cause additional stresses on the façade panel and its anchoring, which must be taken into account in the design. Furthermore, multi-axial stress conditions, scale effects and the influence of increased temperatures on the strength of the ultra-high performance concrete must be taken into account in the design.

The central objective of the research project is to investigate the realistic load-bearing behaviour of unreinforced, point-supported UHPC façade panels and to develop a generally valid design model. The determination of the resistances of the ultra-high performance concrete for the design is to be derived from the results of 3-point bending tests for simplification and further influences are to be taken into account by predefined parameters.

Experimental investigations on the scale effect, the correlation between centric tensile strength, uniaxial and biaxial tensile strength are carried out on small-sized specimens. Furthermore, investigations are carried out on the influence of increased temperatures on the uniaxial bending tensile strength as well as on the influence of the rock type and the maximum grain diameter on the uniaxial bending tensile strength. To describe realistic actions, surface temperatures for facing shells made of UHPC are determined and the influence of the type of rock on the temperature coefficient of expansion and on the shrinkage strain is determined.

The realistic load-bearing behaviour of the façade construction under wind load is investigated experimentally on large-format test specimens in the negative pressure test stand. The results of the experimental investigations form the basis for the validation of the subsequent parameter study using the finite element method. Using the FE method, a convergence investigation is carried out to define indications for the determination of the internal forces. Subsequently, a sensitivity analysis is carried out on the influence of imperfections of the substructure. Finally, engineering and design models are derived and design rules for large-format unreinforced façade panels made of ultra-high performance concrete are defined. The design concept developed within the framework of the research project is based on the results of 3-point bending tests and enables simultaneous modification to the respective concrete formulation using regional aggregates.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Fassaden aus Betonfertigteilen	3
2.2 Einwirkungen auf Betonfassaden	4
2.2.1 Eigenlast	5
2.2.2 Wind	5
2.2.3 Temperatur	5
2.2.4 Feuchtigkeit	6
2.2.5 Frost-Tau-Wechsel, Schnee- und Eislasten	6
2.2.6 Schwinden	6
2.3 Ultrahochleistungsbeton	7
2.4 Verbindungsmittelkonzepte für mehrschichtige Stahlbetonwände	7
2.5 Verbindungsmittel aus glasfaserverstärktem Kunststoff	8
<b>3 Kleinformatige Materialuntersuchungen</b>	<b>11</b>
3.1 Betonmischungen	11
3.2 Maßstabeffekt	13
3.3 Einfluss der Temperatur auf die uniaxiale Biegezugfestigkeit	22
3.4 Einfluss der Gesteinsart und des Größtkorndurchmessers auf die Biegezugfestigkeit	24
<b>4. Ermittlung wirklichkeitsnaher Einwirkungen</b>	<b>29</b>
4.1 Oberflächentemperatur von Vorsatzschalen aus UHPC	29
4.2 Einfluss der Gesteinsart auf den Temperaturexpansionskoeffizienten	35
4.3 Einfluss der Gesteinsart auf die Schwinddehnung	37
<b>5. Großbauteilversuche</b>	<b>45</b>
5.1 Allgemeines	45
5.2 Probekörpergeometrie und -herstellung	45
5.3 Versuchsaufbau und -durchführung	48
5.4 Versuchsergebnisse	49
5.5 Auswertung der Großbauteilversuche	51
<b>6. Parameterstudie mittels der FE-Methode</b>	<b>53</b>
6.1 Allgemeines	53
6.2 Werkstoffe	54
6.3 Diskretisierung und durchgeführte Konvergenzuntersuchung	54
6.4 Nachrechnung der Großbauteilversuche	56
6.5 Sensitivitätsanalyse zum Einfluss der Unterkonstruktion	57
6.6 Untersuchungen zur Spannungsverteilung bei einspringenden Ecken	61

<b>7. Ableitung von Ingenieur- und Bemessungsmodellen</b>	<b>64</b>
7.1 Allgemeines	64
7.2 Schnittgrößenermittlung	64
7.3 Nachweiskonzept	65
7.4 Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	66
7.4.1 Verformungsnachweis	66
7.4.2 Nachweis der Rissfreiheit	66
7.5 Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit	66
7.5.1 Nachweis gegen Biege- und Normalkraftversagen der Fassadenplatte	66
7.5.2 Biegespannungs- und Schubspannungsnachweis der Verbindungsmittel	68
7.5.3 Nachweis gegen Stabilitätsversagen der Verbindungsmittel	69
7.5.4 Nachweis gegen Versagen der Verankerung der Verbindungsmittel	69
7.6 Konstruktionsregeln	70
<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>72</b>
<b>9 Literaturverzeichnis</b>	<b>74</b>