

Oliver Fischer, Nicholas Schramm, Jörg Jungwirth

**Nachhaltiges Bauen mit  
vorgespannten Tragelementen aus  
ultrahochfestem Beton (UHPC)  
Anwendung für Parkhäuser**

**F 3104**

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 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

2018

ISBN 978-3-7388-0233-7

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)



---

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

LEHRSTUHL FÜR MASSIVBAU  
INGENIEURFAKULTÄT BAU GEO UMWELT

## Schlussbericht

# „Nachhaltiges Bauen mit vorgespannten Tragelementen aus ultrahochfestem Beton (UHPC); Anwendung für Parkhäuser“

UNIV.-PROF. DR.-ING. OLIVER FISCHER  
NICHOLAS SCHRAMM, M.Sc.  
PROF. DR.-ING. JÖRG JUNGWIRTH

MÜNCHEN, DEN 17. SEPTEMBER 2018

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD 10.08.18.7-14.33)

# Kurzzusammenfassung

Der vorliegende Forschungsbericht behandelt die Anwendung von ultrahochfestem, faserbewehrtem Beton (UHPFRC) für den Parkhausbau. Nachdem auf Grundlagen zu Ultrahochleistungsbeton und den Stand der Forschung eingegangen wird, werden die wichtigsten Anforderungen an die Konstruktion definiert und eine entsprechend sinnvolle Ausbildung eines Deckensystems diskutiert und gewählt. Als besonders effizient stellt sich dabei ein aufgelöstes System aus filigranen Rippenplatten und vorgespannten Längsträgern heraus, dessen Einzelelemente über eine entsprechende Fügemethode trocken oder nass verbunden werden können. Zu den jeweiligen Systemelementen sowie zu verschiedenen Fügemethoden für den Anschluss zwischen Fahrbahnplatten und Längsträgern werden experimentelle Untersuchungen vorgestellt, die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens durchgeführt wurden. Die Versuche zeigen, dass eine Plattenstärke von lediglich 35 mm zwischen den Rippen ausreicht, um die statisch erforderlichen Anforderungen zu erfüllen und eine schlaffe Stabbewehrung in den trapezförmigen Rippen die erforderliche Duktilität bzw. Versagensvorankündigung sicherstellen kann. Im Rahmen der Versuche an im sofortigen Verbund vorgespannten Längsträgern aus UHPFRC wird insbesondere das Querkrafttragverhalten untersucht. Die experimentell ermittelten Bruchlasten zeigen, vor allem durch einen sehr hohen Traganteil der Stahlfaserbewehrung, auch für Stegdicken von lediglich 40 mm, einen sehr hohen Querkraftwiderstand der Längsträger. Anhand von Push-Out-Versuchen wird gezeigt, dass verschiedene Möglichkeiten bestehen die Längsträger mit den Plattenelementen zu verbinden und der erforderliche Tragwiderstand für die aufgezeigten Varianten leicht erbracht werden kann. Die experimentellen Untersuchungen werden durch numerische Analysen und einen Vergleich mit Bemessungsansätzen ergänzt. Im Vergleich zu einer Ausführung des Parkdecksystems in Verbundbauweise mit Normalbeton ergeben sich durch die Anwendung von UHPFRC viele Vorteile, wie z.B. ein stark reduzierter Ressourcenverbrauch, weitaus bessere Dauerhaftigkeitseigenschaften, ein möglicher Verzicht auf kostenintensive Beschichtungen sowie Einsparungen beim Transport und dem Bauprozess. Eine abschließende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass unter Einbeziehung aller Faktoren eine Lösung mit UHPFRC, trotz der höheren Materialkosten pro Volumeneinheit, kostengünstiger als das bisherige System sein kann.

# Abstract

This research report deals with the application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) for parking deck systems. After discussing the fundamentals of ultrahigh-performance concrete and the current state of research, the most important requirements for the construction are defined and a correspondingly meaningful design of a ceiling system is discussed and chosen. It turns out that a dissolved system of slender ribbed plates and prestressed longitudinal girders, where the individual elements can be connected dry or wet via a corresponding joining method, is the most effective constellation. For the corresponding system elements as well as for different joining methods for the connection between carriageway slabs and longitudinal beams, experimental investigations are presented, which were carried out within the framework of the present research project. The tests show that a plate thickness of only 35 mm between the ribs is sufficient to fulfill the statical requirements and a non-prestressed reinforcement in the trapezoidal ribs can ensure the required ductility or rather failure prediction. As part of the tests on prestressed UHPFRC girders, the load-bearing behaviour in shear is investigated in particular. The failure loads determined experimentally show a very high shear resistance of the slender girders, especially due to the high contribution of the steel fiber reinforcement, even for web thicknesses of only 40 mm. On the basis of push-out tests it is shown that there are different possibilities to connect the longitudinal girders to the carriageway slabs and the statically required load-bearing capacity for the shown variants can be easily provided. The experimental investigations are complemented by numerical analyzes and a comparison with design approaches. Compared to a design of the parking deck system in composite construction and with normal concrete, the use of UHPFRC offers many advantages, such as: a significantly reduced resource consumption, much better durability properties, a possible avoidance of costly coatings and savings in transport and the construction process. A final economic analysis shows that taking into account all factors, a UHPFRC solution, despite the higher material costs per unit volume, can be more cost effective than the previous system.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzzusammenfassung</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemeines . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	2
1.3 Arbeitsablauf und Untersuchungsschwerpunkte . . . . .	4
<b>2 Grundlagen zu Ultrahochleistungsbeton</b>	<b>6</b>
2.1 Materialeigenschaften . . . . .	6
2.2 Faserwirkung . . . . .	7
2.3 Zugfestigkeit . . . . .	8
2.4 Ausgangsstoffe, Mischzusammensetzung und Herstellung . . . . .	9
2.4.1 Allgemeines . . . . .	9
2.4.2 Ausgangsstoffe . . . . .	10
<b>3 Stand der Forschung</b>	<b>14</b>
3.1 Tragverhalten von Platten aus UHPC . . . . .	14
3.2 Tragverhalten vorgespannter Träger aus UHPC . . . . .	16
3.2.1 Untersuchungen von Heidrich . . . . .	16
3.2.2 Untersuchungen von Bertram . . . . .	16
3.2.3 Offene Fragestellungen . . . . .	18
3.3 Möglichkeiten des Fügens von Bauteilen aus UHPFRC . . . . .	18
3.3.1 Allgemeines . . . . .	18
3.3.2 Verkleben . . . . .	19
3.3.3 Fügemethode mit Verbunddübelleisten . . . . .	20
3.3.4 Fügemethode mit Stahlschare . . . . .	21
3.3.5 Fügemethode mit Schubnocken . . . . .	22
3.3.6 Untersuchungen zu trocken gefügten Flächenelementen aus UHPFRC . . . . .	24

<b>4</b>	<b>Anforderungen und Konzeptionierung des Deckensystems</b>	<b>26</b>
4.1	Anforderungen an die Konstruktion . . . . .	26
4.2	Konstruktive Ausbildung des Deckensystems . . . . .	26
4.3	Optimierung hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Voruntersuchungen zur Ausbildung des Deckensystems</b>	<b>31</b>
5.1	Allgemeines . . . . .	31
5.2	Voruntersuchungen - Geometrie der Plattenelemente . . . . .	32
5.2.1	Allgemeines . . . . .	32
5.2.2	Materialmodell . . . . .	32
5.2.3	Nachrechnung von Versuchen - Modellvalidierung . . . . .	36
5.2.4	Grenzen des Modells . . . . .	40
5.2.5	Parameterstudien Rippenplatte . . . . .	41
5.2.6	Zusammenfassung der Erkenntnisse . . . . .	47
5.3	Voruntersuchungen TU München - Anschluss zwischen Fahrbahnplatten und Längsträgern . . . . .	48
5.3.1	Anforderungskatalog an den Anschluss . . . . .	48
5.3.2	Ermittlung der Einwirkungen . . . . .	50
5.4	Entwurf der Anschlussgeometrie . . . . .	53
5.4.1	Variante studie zu möglichen Anschlüssen . . . . .	53
5.4.2	Detailierung des Anschlussentwurfs . . . . .	58
5.5	Voruntersuchungen SSF/Hochschule München - Anschluss zwischen Fahrbahnplatten und Längsträgern . . . . .	63
5.5.1	Allgemeines . . . . .	63
5.5.2	Entwurfskonzept . . . . .	64
5.5.3	Nockenverbindung (trockenen, verschraubte Fuge) . . . . .	64
5.5.4	Vergossene Verbindung . . . . .	66
5.5.5	Zugehörige Bauteilversuche . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>70</b>
6.1	Versuche an Plattenelementen an der TU München . . . . .	70
6.1.1	Allgemeines . . . . .	70
6.1.2	Versuchsmatrix und Herstellung . . . . .	71
6.1.3	Versuchsaufbau . . . . .	75
6.1.4	Messtechnik . . . . .	76
6.1.5	Versuchsergebnisse . . . . .	79

6.2	Versuche zum Tragverhalten der Längsträger an der TU München . . . . .	85
6.2.1	Allgemeines . . . . .	85
6.2.2	Versuchsstand und Versuchsaufbau . . . . .	86
6.2.3	Messtechnik . . . . .	89
6.2.4	Versuchskörpergeometrien . . . . .	89
6.2.5	Versuchsprogramm . . . . .	91
6.2.6	Ergebnisse Versuchsreihe 1 . . . . .	92
6.2.7	Ergebnisse Versuchsreihe 2 . . . . .	94
6.2.8	Ergebnisse Referenzversuche an ganzen Trägern . . . . .	99
6.3	Push-Out Versuche an der TU München . . . . .	104
6.3.1	Allgemeines . . . . .	104
6.3.2	Konzeption und Dimensionierung der Versuchskörper . . . . .	105
6.3.3	Numerische Untersuchungen . . . . .	111
6.3.4	Material und Herstellung . . . . .	113
6.3.5	Messtechnik . . . . .	124
6.3.6	Versuchsdurchführung . . . . .	127
6.3.7	Versuchsergebnisse . . . . .	129
6.4	Push-Out Versuche an der Hochschule München . . . . .	169
6.4.1	Allgemeines . . . . .	169
6.4.2	Betonkennwerte . . . . .	176
6.4.3	Versuchskonzept Nockenverbindung Schub . . . . .	176
6.4.4	Versuchskonzept glatte Fuge Schub . . . . .	182
6.4.5	Versuchskonzept verzahnte Fuge Schub . . . . .	187
6.4.6	Versuchskonzept verzahnte Fuge Schub mit Normalbeton . . . . .	193
6.4.7	Zusammenfassung der Versuche mit vergossenen Verbindungen . . . . .	198
6.4.8	Erkenntnisse der Versuche . . . . .	199
6.4.9	Auswirkung auf das Tragkonzept . . . . .	200
<b>7</b>	<b>Numerische Untersuchungen</b>	<b>201</b>
7.1	Allgemeines . . . . .	201
7.2	Software und Materialmodellierung . . . . .	201
7.3	Numerische Analyse der UHPC Platten . . . . .	202
7.3.1	Allgemeines . . . . .	202
7.3.2	Vergleich der Modellierungsansätze . . . . .	202
7.3.3	Nachrechnung der Plattenversuche . . . . .	203
7.4	Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten vorgespannter UHPC Träger . .	208
7.4.1	Nachrechnung von Versuchen aus der Literatur . . . . .	208



7.4.2	Numerische Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten der eigenen UHPC-Träger . . . . .	210
<b>8</b>	<b>Vergleich der Versuchsergebnisse mit Bemessungsansätzen</b>	<b>221</b>
8.1	Fügemethode mit Schubnocken an der TU München . . . . .	221
8.1.1	Bemessung einer Schubnocke nach Specker [2001b], Oettel u. Empelmann [2013] . . . . .	221
8.1.2	Eigener Ansatz zur Bemessung einer Schubnocke . . . . .	222
8.2	Fügemethode mit glatter und verzahnter Fuge an der Hochschule München . . .	225
8.3	Plattenversuche - Bemessungsansatz nach der Bruchlinientheorie . . . . .	234
8.3.1	Allgemeines . . . . .	234
8.3.2	Anwendung der Bruchlinientheorie für die Nachrechnung der Plattenversuche . . . . .	235
8.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	240
<b>9</b>	<b>Betrachtung der Wirtschaftlichkeit</b>	<b>241</b>
9.1	Methodik des Kostenvergleichs . . . . .	241
9.2	Kosten des Werkstoffes UHPC . . . . .	242
9.3	Kostenvergleich: Normalbetonbauweise und optimierte UHPC-Bauweise . . . . .	242
9.4	Zusammenfassung . . . . .	244
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>246</b>
<b>A</b>	<b>Anhang: Pläne der Push-Out-Versuchskörper an der TU München</b>	<b>249</b>
A.1	Ausführungspläne . . . . .	249
A.2	Bewehrungspläne . . . . .	253
A.3	Schalpläne der Platte . . . . .	256
A.4	Schalpläne des Trägers . . . . .	266
A.5	Pläne der POM Schalungselemente . . . . .	272
<b>B</b>	<b>Anhang: Versuchsergebnisse der Push-Out Versuche an der TU München</b>	<b>275</b>
B.1	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse . . . . .	276
B.2	Versuchsabläufe . . . . .	277
B.3	Kräfte in den Zugstangen . . . . .	281
<b>C</b>	<b>Anhang: Materialkennwerte der Plattenversuche an der TU München</b>	<b>283</b>
C.1	Ergebnisse der Materialprüfungen für die Plattenversuche an der TU München .	284

<b>D Anhang: Trägerversuche an der TU München</b>	<b>286</b>
D.1 Schal- und Bewehrungspläne der Trägerversuche an der TU München . . . . .	286
D.2 Materialkennwerte der Trägerversuche an der TU München . . . . .	290
D.2.1 Materialkennwerte Referenzversuche an „langen Trägern“ . . . . .	290
D.2.2 Materialkennwerte Versuchsreihe 1 (12 Litzen) . . . . .	295
D.2.3 Materialkennwerte Versuchsreihe 2 (18 Litzen) . . . . .	300
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XII</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XXII</b>