

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

www.baufachinformation.de

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 Einzelemente 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

Kurzzusammenfassung	V
Abstract	VI
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Arbeitsablauf und Untersuchungsschwerpunkte	4
2 Grundlagen zu Ultrahochleistungsbeton	6
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
3 Stand der Forschung	14
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

4	Anforderungen und Konzeptionierung des Deckensystems	26
4.1	Anforderungen an die Konstruktion	26
4.2	Konstruktive Ausbildung des Deckensystems	26
4.3	Optimierung hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte	30
5	Voruntersuchungen zur Ausbildung des Deckensystems	31
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	Variantenstudie zu möglichen Anschlüssen	53
5.4.2	Detailierung des Anschlussentwurfs	58
5.5	Voruntersuchungen SSF/Hochschule München - Anschluss zwischen Fahrbahn- platten 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
6	Experimentelle Untersuchungen	70
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
7	Numerische Untersuchungen	201
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
8	Vergleich der Versuchsergebnisse mit Bemessungsansätzen	221
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
9	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit	241
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
10	Zusammenfassung	246
A	Anhang: Pläne der Push-Out-Versuchskörper an der TU München	249
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	Anhang: Versuchsergebnisse der Push-Out Versuche an der TU München	275
B.1	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	276
B.2	Versuchsabläufe	277
B.3	Kräfte in den Zugstangen	281
C	Anhang: Materialkennwerte der Plattenversuche an der TU München	283
C.1	Ergebnisse der Materialprüfungen für die Plattenversuche an der TU München .	284

D Anhang: Trägerversuche an der TU München	286
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
Abbildungsverzeichnis	XII
Literaturverzeichnis	XXII