

Entwicklung und Herstellung von Fertig- teilen aus ultrahochfestem Beton (UHPC) für punktgestützte Flachdecken

DI Dr. Günter Grass
Sika Österreich GmbH

DI Helmut Zehentner
Fröhlich & Locher ZT GmbH, Wien

1 Einleitung

Seit mehr als zehn Jahren wird vor allem in Frankreich, aber auch in Deutschland im Zusammenhang mit der Entwicklung ultrahochfester Betone (UHPC – Ultra High Performance Concrete) intensiv geforscht.

Die von der ÖNORM B 4710-1 abgedeckten hochfesten Betone bewegen sich hinsichtlich der Druckfestigkeit in einem Bereich zwischen 60 und 115 N/mm². Bei ultrahochfesten Betonen werden Druckfestigkeiten von 200 N/mm² und mehr erreicht. Die herausragenden Materialeigenschaften, die sich von jenen eines herkömmlichen Betons in vielen Bereichen grundlegend unterscheiden, eröffnen Anwendungen im Betonbau völlig neue Möglichkeiten. Damit lassen sich unter anderem besonders schlanke, leichte und weit gespannte Tragwerke herstellen, bei denen der konstruktiven Gestaltung eine erhöhte Bedeutung zukommt.

2 Materialeigenschaften von UHPC

Die wichtigsten Grundforderungen für die Herstellung von ultrahochfesten Betonen sind neben einem sehr hohen Bindemittelgehalt

- eine Reduzierung des W/B-Wertes
- die Optimierung der Homogenität des Betongefüges und
- die Verbesserung der Duktilität durch Stahlfasern.

Der mechanisch begründete Ausgangspunkt für die Herstellung von UHPC ist die Minimierung von Gefügestörungen, wie z. B. Poren und Mikrorisse. Um Kapillarporen in der Zementmatrix zu vermeiden, ist es

erforderlich, den W/B-Wert auf ca. 0,2 zu reduzieren. Außerdem müssen die Ausgangsstoffe sorgfältig ausgewählt werden, sodass die Partikelgröße von Zuschlag und Bindemittel homogenisiert wird. Das angestrebte sehr dichte und homogene Gefüge des Betons wird vor allem durch die Abstimmung der Feinteile erreicht, wobei neben dem Zement (ca. 700–1.000 kg/m³) und Mikrosilica (bis zu 25 % des Zementgehaltes) auch besonders feine Steinmehle eingesetzt werden.

Da bei Betonen mit der Druckfestigkeit auch die Sprödigkeit zunimmt, wird bei diesen Betonen durch die Zugabe von Stahlfasern (Fasergehalte bis 190 kg/m³) die Duktilität verbessert. Ohne Fasern gehen diese Betone explosionsartig zu Bruch (Abb. 1 und 2).

Es sind jedoch nicht nur die herausragenden Festigkeiten, die für die Verwendung von ultrahochfesten Betonen in speziellen Anwendungen sprechen. Durch das außerordentlich dichte Betongefüge sind solche



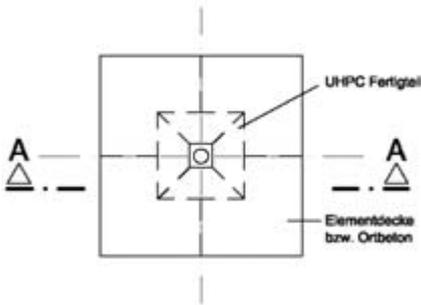
Abb. 1:
Druckprüfung eines
Probewürfels ohne
Fasern nach
56 Tagen

Fotos: © Sika Österreich GmbH



Abb. 2:
Explosionsartiges
Versagen des
Probekörpers

Abb. 3: Fertigteil im stütznahen Bereich



Schnitt A - A

Variante: Elementdecke



Variante: Ortbeton



Betone nicht nur besonders widerstandsfähig gegenüber Chemikalien, sondern sie halten auch einer extremen Verschleißbeanspruchung stand. Die damit verbundene hohe Dauerhaftigkeit rechtfertigt auch die höheren Kosten gegenüber einem Normalbeton, da der Erhaltungsaufwand z. B. im Brückenbau entsprechend niedrig ist. Abgesehen davon ist zu berücksichtigen, dass nur 25 bis 30 % des herkömmlichen Betonvolumens benötigt wird. Um die herausragenden Materialeigenschaften auch nutzen zu können, sind außerdem eigene Bemessungsregeln erforderlich.

3 Entwicklung und Herstellung von UHPC-Pilzen für punktgestützte Flachdecken

Bei der Herstellung von punktgestützten Flachdecken ist der Einsatz von Halbfertigteilen (Elementdecke) mit Ortbetonergänzung für die obere Lage wenig verbreitet, da die Bereiche um die Stützen auf Grund der Durchstanzproblematik ausgespart und in Ortbeton hergestellt werden müssen.

Das Ziel eines von der FFG (Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH) geförderten Forschungsprojektes, welches von der Katzenberger Baustoffindustrie GmbH Graz gemeinsam mit Prof. Sparowitz (TU Graz) und DI Zehentner durchgeführt wird, ist die Entwicklung eines pilzförmigen Fertigteil aus UHPC, welcher im Stützenbereich in die Flachdecke eingesetzt wird und das Durchstanzverhalten der Decke deutlich verbessert. Das Fertigteil aus UHPC soll den durchgehenden Einsatz von Fertigteilen in der unteren Lage ermöglichen; alternativ kann es auch bei Ortbetondecken

zur Erhöhung des Durchstanzwiderstands eingebaut werden (siehe Abb. 3).

Der Durchstanzwiderstand von Decken ohne Durchstanzbewehrung hängt maßgeblich vom Zugbewehrungsgrad und den Betoneigenschaften ab. Durch die Verwendung von faserbewehrtem UHPC (Ultra High Performance Concrete) für das Fertigteil über der Stütze soll der Widerstand gegen Durchstanzen erheblich gesteigert werden. Mittels nichtlinearer FEM-Simulationen wurden wesentliche Randbedingungen für die UHPC-Pilzentwicklung untersucht und mögliche Pilzformen entwickelt. Daraus entstand ein Versuchsprogramm aus zwei Serien zu je 5 Versuchskörpern.

Alle 10 Versuchskörper sind 22 cm stark, mit einer Seitenlänge von 350 cm (siehe Abb. 8). Im Zentrum über der Stütze ist ein UHPC-Fertigteil mit quadratischen Abmessungen angeordnet. Der anschließende Plattenbereich wird aus Ortbeton oder aus einer Kombination Elementdecke mit Ortbeton hergestellt.

Folgende Parameter wurden bei den UHPC-Fertigteilen variiert:

- Geometrie im Grundriss: 7 UHPC-Fertigteile mit einer Seitenlänge von 100 cm, 3 UHPC Fertigteile mit einer von 150 cm.

- Geometrie im Aufriss: Variiert wurde die Neigung der Seitenflächen α und die Höhe der Fertigteile h . Die maximale Höhe der Fertigteile wird mit der oberen Bewehrungslage begrenzt. $30^\circ < \alpha < 60^\circ$, $8 \text{ cm} < h < 16 \text{ cm}$
- Bewehrung im Fertigteil: Alle Fertigteile sind faserbewehrt. 2 Fertigteile wurden zusätzlich mit Stabstahl bewehrt.
- Bewehrung im Ortbeton: 9 Fertigteile mit einem Bewehrungsgrad $\rho = 1,12 \%$, 1 Fertigteil mit $\rho = 2,24 \%$.
- Belastung: 9 Fertigteile wurden symmetrisch belastet, 1 Fertigteil asymmetrisch.
- Betongüte: 9 Fertigteile haben eine UHPC-Festigkeit, 1 Fertigteil hat HPC-Festigkeit.
- Verlegung in einer Decke aus Halbfertigteilen (Elementdecke) und Verlegung in einer Ortbetondecke.

Die Herstellung der Fertigteile erfolgte mit Sika CeraCem. Dabei handelt es sich um eine Fertigmischung, der noch Wasser, Fließmittel und Fasern beigegeben werden müssen. Die Konsistenz ist dabei so eingestellt, dass trotz des hohen Fasergehaltes ein Fließmaß von ca. 65 cm erreicht wird. Das Mischen selbst kann mit herkömmlichen Betonmischern erfolgen, wobei allerdings eine deutlich verlängerte Mischzeit (12 bis 15 Min.) zu beachten ist.

Der angestrebte niedrige W/B-Wert von ca. 0,2 kann nur durch die Verwendung eines auf das System abgestimmten Hochleistungsfließmittels auf PCE-Basis erreicht werden.

Die Zusammensetzung des Betons bestand aus den in Tab. 1 dargestellten Komponenten.

Nach einer Mischzeit von insgesamt 12 Min. wurde der UHPC in den Krankübel gefüllt und mit einem Hubstapler zur Kranbahn gefahren. Die Bedenken, dass es beim

Tab. 1: Zusammensetzung des ultrahochfesten Betons

Premix Sika CeraCem	2.355	kg/m ³
Wasser	195	kg/m ³
Fließmittel Sika ViscoCrete 5–400 F	44,6	kg/m ³
Stahlfasern (Ø 0,3 mm, L = 20 mm)	150	kg/m ³



Abb. 4: Mischen des UHPC

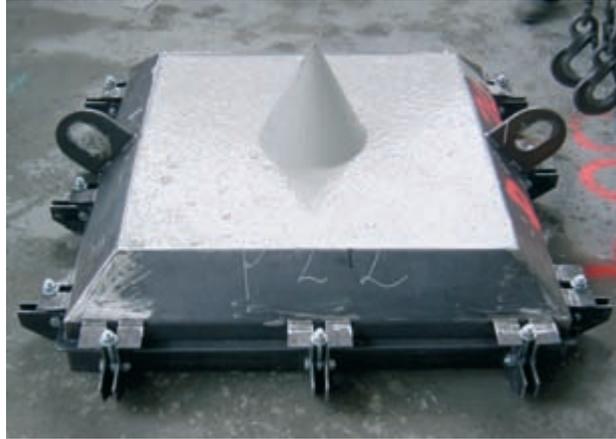


Abb. 5: Befüllte Schalung eines Pilzes Fotos: © Sika Österreich GmbH

Transport zu einer Entmischung kommen könnte, haben sich als unbegründet herausgestellt. Der ultrahochfeste Beton wurde anschließend in die vorbereitete Stahlschalung (Abb. 5) gegossen.

Nach dem Ausschalen wurde die Oberfläche der Pilze sandgestrahlt, um später einen besseren Verbund des UHPC-Fertigteils mit dem Ortbeton zu erreichen.

Die Herstellung der Fertigteile wurde vom Laboratorium für Betontechnologie und Bodenprüfung in Graz begleitet, wobei anschließend die relevanten Material-

kennwerte ermittelt wurden. Die Entwicklung der Druckfestigkeit ist in Abb. 6 dargestellt. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die Druckfestigkeit nach 6 Monaten auf ca. 230 N/mm² ansteigt. Während die Biegezugfestigkeit im Bereich von 30 N/mm² anzusiedeln ist, beträgt die Zugfestigkeit ca. 10 N/mm².

In weiterer Folge wurde noch vom Labor für Felsmechanik und Tunnelbau der TU-Graz die Arbeitslinie an Zylindern mit einer Länge von 93 mm und einem Durchmesser von 47 mm ermittelt (Abb. 7). Dabei stellte sich ein E-Modul von 64 GPa ein.

4 Durchführung der praxisnahen Großversuche

Im Jahre 2006 wurde von Februar bis April die 1. Versuchserie und von November bis Dezember die 2. Versuchsserie im Labor der Konstruktiven Institute der TU Graz (LKI) durchgeführt.

Bei der Versuchsdurchführung wird die in der Mitte der Versuchsplatte angeordnete Stütze verformungsgesteuert von einer Presse nach oben gedrückt. Im Radius von 150 cm vom Stützenmittelpunkt sind symmetrisch 8 Zugstangen zur Rückhaltung der

Abb. 6: Entwicklung der Druckfestigkeit von Sika CeraCem

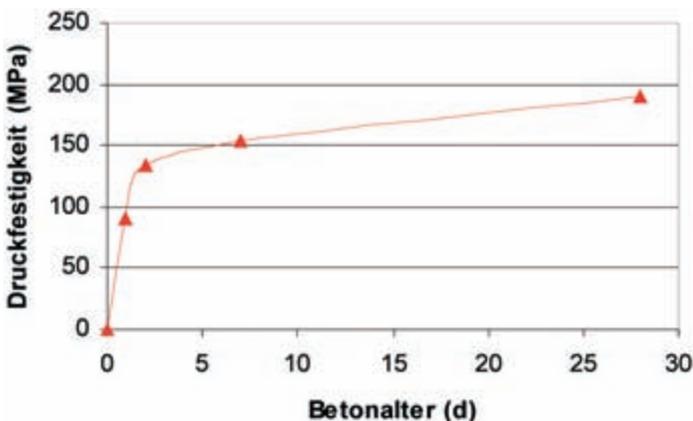
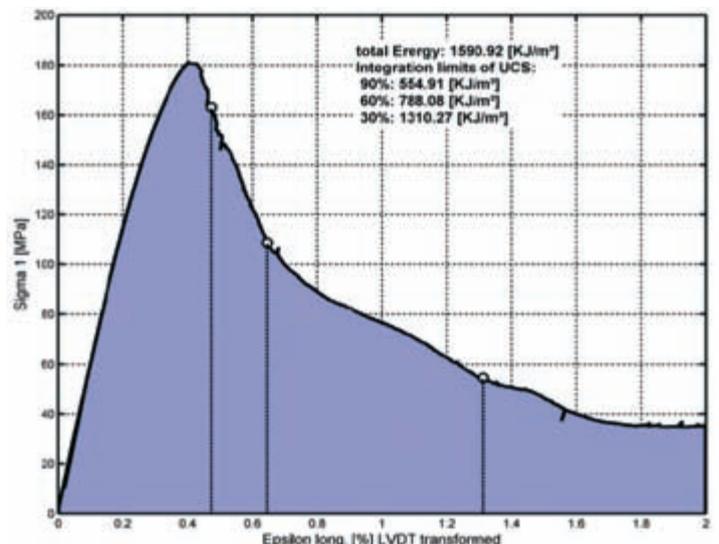
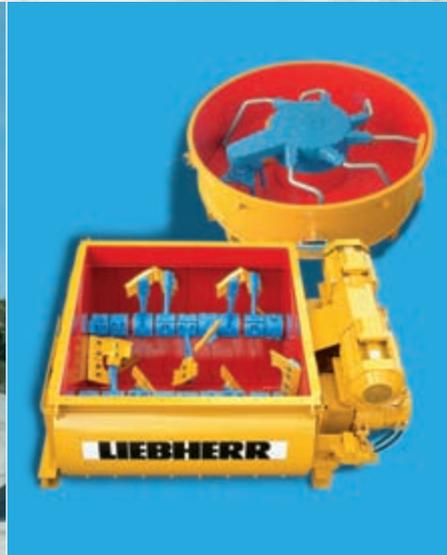
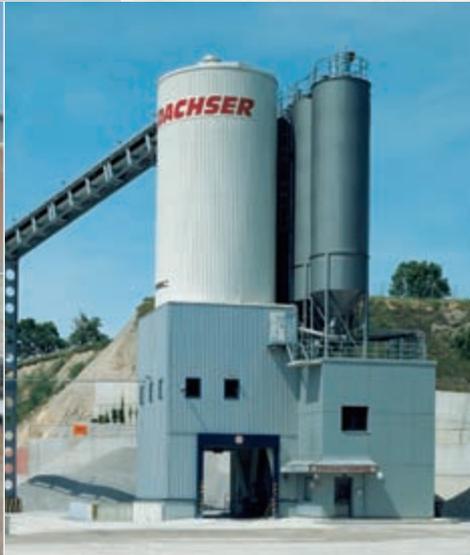


Abb. 7: Arbeitslinie von Sika CeraCem

Grafiken: © Sika Österreich GmbH



Den Fortschritt erleben.



Liebherr-Werk Bischofshofen GmbH
Dr. Hans Liebherr-Straße 4
A-5500 Bischofshofen
Tel.: (0 64 62) 88 8-0
Fax: (0 64 62) 88 82 87
www.liebherr.com

LIEBHERR

Die Firmengruppe

Platte angeordnet (siehe Abb. 8 und 9). Diese Versuchseinrichtung entspricht einer symmetrischen punktgestützten Flachdecke mit einem Stützenraster von ca. 6,5 m.

Die Versagenslasten liegen je nach Versuch zwischen 1.500 kN und 1.850 kN. Im Vergleich zu einer 22 cm starken Platte aus C25/30 mit gleicher Bewehrung (Biegebewehrungsgrad $\rho = 1,12\%$) ergibt sich eine Erhöhung des Durchstanzwiderstandes um über 100 %.

Zusammengefasst ergeben sich aus den Versuchen folgende Erkenntnisse:

- Die Versuchskörper verhalten sich abhängig vom gewählten Biegebewehrungsgrad sehr duktil. Das Versagen wird bei einem Bewehrungsgrad von $\rho = 1,12\%$ durch große Verformungen angekündigt (siehe Abb. 10). Es bildet sich bei der maximalen Last ein ausgeprägtes Fließplateau aus. Das duktile Verhalten der Versuchskörper sowie die Versagenslast können mit einer nicht-linearen FE-Simulation gut nachverfolgt werden. 3 Versuchskörper (P24, P26 und P13) haben zwar die prognostizierte Versagenslast erreicht, das Verhalten war allerdings nicht so duktil wie bei den anderen Versuchen. Die Gründe dafür werden derzeit untersucht. Mit der Erhöhung des Bewehrungsgrades wird das Verhalten zunehmend spröder.
- Eine zusätzliche Bewehrung im UHPC-Pilz wirkt sich weder positiv auf die Traglast noch auf die Duktilität aus.
- Die getesteten Fertigteile mit Grundrissabmessungen von 100 cm und 150 cm verhalten sich weitgehend ähnlich. Eine Reduktion der Seitenabmessungen auf 100 cm ist aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll.
- Die Minimierung der Pilzhöhe auf 8 cm Stärke bewirkt eine Reduktion der Traglast um ca. 10 %.

Derzeit werden die umfangreichen Messergebnisse der Versuche ausgewertet. Ziel ist die Ausarbeitung eines einfachen Bemessungskonzepts als Grundlage für den praktischen Einsatz.



Abb. 8: Draufsicht auf eine Versuchsplatte. Zu sehen sind die Messeinrichtungen der Plattenoberseite und die symmetrisch angeordneten Zugstangen mit den Verankerungsplatten. Die farbige Markierung dient der Orientierung, der Linienabstand beträgt 25 cm.

Abb. 9: Versuchsaufbau mit mittig situierter Presse und den 8 Zugstangen



5 Zusammenfassung

Der Einsatz von UHPC-Fertigteilen bei punktgestützten Flachdecken bewirkt eine Erhöhung des Durchstanzwiderstands im Vergleich zu einer Decke aus C25/30 bei gleicher Bewehrung um über 100 %. Bei der Kombination des UHPC-Fertigteils mit einer Elementdecke ergeben sich zusätzlich folgende Vorteile:

- Herstellung von punktförmig gestützten Flachdecken nahezu ohne Schalmaterial
- Verlagerung der Bauleistung von der Baustelle in das Fertigteilwerk mit entsprechender Bauzeitverkürzung
- Deckenuntersichten hoher Qualität

Weitere sinnvolle Einsatzgebiete von Fertigteilen aus ultrahochfestem Beton sind überall dort gegeben, wo herausragende Festigkeiten und eine extrem hohe Chemikalienbeständigkeit gefordert werden.

Literatur

[1] Zehentner, H.: Innovative Ansätze zum Durchstanzproblem, Dissertation am Institut für Betonbau der TU Graz, in Arbeit.

[2] Zehentner, H.: Die Entwicklung von punktgestützten Flachdecken aus Fertigteilen, Tagungsband Betontag 06, Wien, März 2006.

[3] Grass, G.: Herstellung und Einsatz von Fertigteilen aus Ultrahochfestem Beton, Kurzfassung der Beiträge des Kolloquiums des VÖZ, Wien, November 2006.

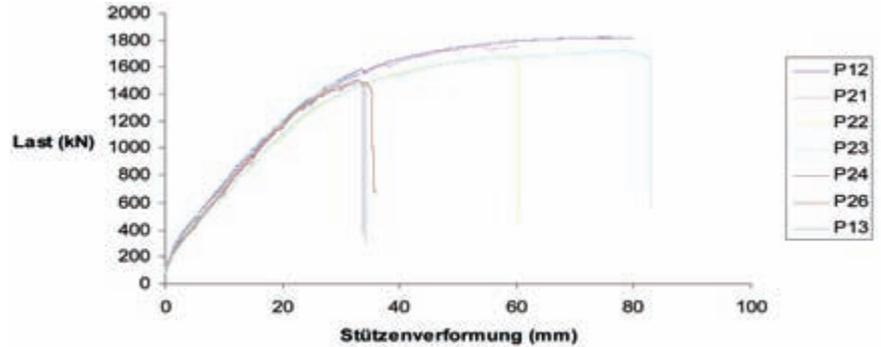


Abb. 10: Last-Verformungslinien von 7 Versuchskörpern (Biegebewehrungsgrad $\rho = 1,12\%$)
 Grafik: © Sika Österreich GmbH



Abb. 11: Aufgeschnittener Versuchskörper mit einem großen UHPC-Pilz. Der Versuch wurde bei einer Stützenverformung von 80 mm abgebrochen.
 Fotos: © Sika Österreich GmbH



Wir machen mehr aus Beton.