

– Ultrahochfester Beton –

der Werkstoff für das neue Schöck Isokorb-Drucklager

Jürgen Schubert, Ingo Schachinger, Hubert Fritschi

Im Rahmen eines Kooperationsforschungsvorhabens zum ultrahochfesten Beton wurden an der TU München und den beteiligten Partnern aus der Industrie betontechnische Maßnahmen entwickelt und optimiert, um ihn für eine Anwendung in der Praxis einsatzfähig zu machen. So gelang es innerhalb der vergangenen fünf Jahre, aufbauend auf dem Kenntnisstand zum „Reactive Powder Concrete (kurz: RPC), den ultrahochfesten Beton mit hohen Druckfestigkeiten von rund 200 N/mm², einem duktilen Bruchverhalten und einer hohen Dauerhaftigkeit sowohl im Labor, als auch im halbtechnischen Maßstab herzustellen.

Gegen Ende des Forschungsvorhabens wurde in Zusammenarbeit mit der Schöck Bauteile GmbH die erste Anwendung für ultrahochfesten Beton in Deutschland erfolgreich realisiert. Der Ersatz des Edeldrucklagers im Schöck Isokorb durch ein ultrahochfestes Betondrucklager führte zu einer verbesserten Wärmedämmung und einem besseren Handling des Schöck Isokorbes bei der Verarbeitung.

1 Einleitung

Frankreich und Kanada haben bereits vor über zehn Jahren Pionierarbeit in dem Bereich des ultrahochfesten Betons, dem sogenannten Reactive Powder Concrete (RPC), geleistet. Die auf sein Gewicht bezogenen höheren aufnehmbaren Lasten ermöglichten größere Spannweiten bzw. Schlankheiten von Betonkonstruktionen, was in ersten Bauvorhaben wie den Brücken in Sherbrooke und Seoul eindrucksvoll unter Beweis gestellt wurde. Die gleichzeitig infolge der hohen Gefügedichte gegenüber Normalbeton deutlich gesteigerte Dauerhaftigkeit in einer aggressiveren Umgebung wurde bei der Unterbaukonstruktion des Kühlturms Cattenom ausgenutzt.

2 Betontechnologische Maßnahmen

Die gegenüber genormten hochfesten Betonen rund 2-fach größere Festigkeit von ca. 200 N/mm² bei ultrahochfesten Betonen beruht auf folgenden Prinzipien:

- **Beschränkung des Größtkorns auf 0,5 mm der groben Gesteinskörnungen** [1], [2]. Das unterschiedliche Verformungsverhalten von Zementstein und Gesteinskörnungen bewirkt bei Belastung eine ungleiche Spannungsverteilung im Material, die das Versagen des Materials auslöst. Durch die feine Verteilung der Zuschläge treten keine lokalen Spannungsspitzen in dem Umfang mehr auf.
- **Optimierung der Kornzusammensetzung aller Ausgangsstoffe (Korngrößenbereich von 15 nm bis 600 µm)**. Die mittlere Korngröße des Feinsandes von 250 µm wurde auf die der nächst kleineren Korngruppe, den Zement (11-15 µm), abgestimmt [1]. Dabei wurde das Größtkorn des Sandes aus Homogenitätsgründen auf 600 µm und das Kleinstkorn, um Überschneidungen mit den groben Zementkörnern zu vermeiden, auf 150 µm begrenzt. Durch die Erhöhung des Anteils des Zementes und der Feinststoffe werden die Zwickel gefüllt, die Sandkörner mehr separiert und somit die Verarbeitbarkeit verbessert.
- **Reduzierung des w/b-Wertes**. Durch den geringen Wassergehalt (w/b-Wert ≤ 0,25) kommt es zu einer unvollständigen Hydratation des Zementes und somit zur Vermeidung von Kapillarporen. Der unhydratisierte Teil des Zementes liegt als hochfester Zuschlag in der Matrix vor.
- **Einsatz von Silikastaub**. Silikastaub verdichtet die Kontaktzone, reagiert mit dem Ca(OH)₂ zu festen CSH-Phasen (puzzolanische Reaktion) [1], [3] und verbessert so den Verbund zwischen Zementstein und Zuschlag.
- **Einsatz von hochwirksamen Fließmitteln**. Um bei den geringen w/b-Werten noch fließfähige Konsistenzen zu erreichen, ist der Einsatz leistungsfähiger Fließmittel notwendig. Hier kommt es auf die optimale Abstimmung des Fließmittels auf den verwendeten Zement an [1]. Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern zeichnen sich durch eine sehr gute Verflüssigung und lange Verarbeitungszeiten aus.
- **Wärmebehandlung**. Die für die Dichtigkeit und Festigkeit wichtige puzzolanische Reaktion wird durch eine Temperaturbehandlung bei 90° C beschleunigt, wodurch

die dem Tobermorit und Xonotlit ähnlichen silikatreichen CSH-Phasen entstehen. Die Proben werden meist zwei Tage nach Herstellung für die Dauer von ein - zwei Tagen bei 90° C wärmebehandelt, wodurch ihre Druckfestigkeit um ca. 40 % [2] ansteigt.

- Einsatz von kurzen, hochfesten Stahlfasern eventuell in Kombination mit feinen PP-Fasern. Zur Verbesserung der Duktilität und somit Vermeidung eines schlagartigen Versagens werden dem ultrahochfesten Beton Stahlfasern beigemischt. Diese bewirken eine feine Verteilung und Vernähung der Risse, wodurch hohe Biegezugfestigkeiten erreicht werden können [1], [2], [4]. Eine einfache Methode ein duktileres Verhalten ohne eine Faserzugabe zu erzeugen, ist die Umschnürung mittels dünnwandiger Stahlrohre [5].

3 Herstellung und mechanische Eigenschaften des ultrahochfesten Betons

3.1 Herstellung des Frischbetons

Fließmittel sind für die Herstellung von ultrahochfesten Betonen, die sich durch eine große zu benetzende Oberfläche von rund 1,3 m²/g und einen darauf bezogenen geringen Wassergehalt von nur drei Tropfen H₂O/m² auszeichnen, unbedingt erforderlich. Die aktuell erhältlichen Fließmittel sind extrem leistungsfähig, so dass die ultrahochfesten Betone in einer fließfähigen, selbstverdichtenden Konsistenz hergestellt werden können.

Zur Vermeidung eines spröden Bruchversagens werden dem Beton Stahlfasern und eventuell Polypropylenfasern (PP-Fasern) beigemischt, was zu einer Verschlechterung der Entlüftungsneigung führt. Aufgrund der gegenüber dem Beton 3-fach höheren Dichte der Stahlfasern kommt es bei zu weichen Konsistenzen zum Absetzen der Stahlfasern.

Für eine gute Homogenisierung der feinststoffreichen Mischungen ist ein intensives Mischen erforderlich, welches zu einem Einschlagen von Luftporen mit Durchmessern von 0,1-1 mm in den klebrigen Frischbeton führt. Dadurch können die Frischbetonluftporengehalte bis über 4 Vol.-% ansteigen. Selbst durch längere Vibration bei der Probekörperherstellung können die Luftporengehalte nur sehr begrenzt reduziert werden.

Nur mit Hilfe einer geeigneten Mischtechnik und -reihenfolge ist es möglich, den Frischbeton mit einem Stahlfasergehalt von bis zu 3,5 Vol.-% in einer technisch sinnvollen Konsistenz herzustellen, so dass die Probekörper nur noch einen LP-Gehalt von bis zu 2,0 Vol.-% aufweisen. Höhere

Gehalte dieser Verarbeitungsporen würden zu einer deutlichen Verminderung der Druckfestigkeit führen.

3.2 Druckfestigkeitsentwicklung

Die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit bei einer 20° C-Lagerung zeigt eine über die 28 Tage hinausgehende Nacherhärtung (siehe Abb. 1). Je nach Betonzusammensetzung und Auswahl der Ausgangsstoffe können 28-Tage-Druckfestigkeiten von 160 bis 210 N/mm² erreicht werden.

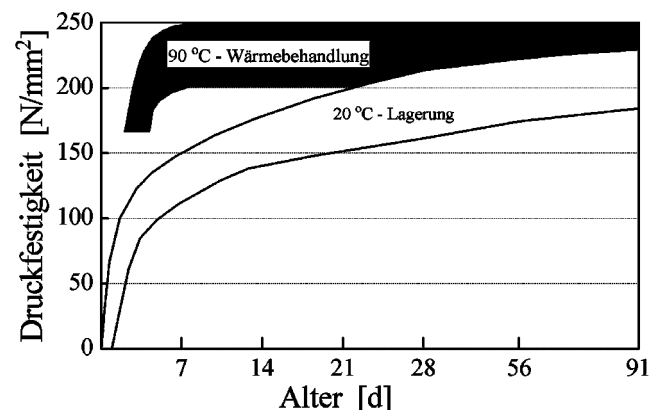


Abb. 1: Druckfestigkeiten in Abhängigkeit des Alters und der Lagerung der Probekörper

Um die Druckfestigkeit zu steigern oder rasch die Endfestigkeit zu erreichen, wird der ultrahochfeste Beton i.d.R. in einem Alter von ein bis zwei Tagen bei Temperaturen bis zu 90° C wärmebehandelt. Auf diese Weise können Druckfestigkeiten von knapp 250 N/mm² erreicht werden [6]. Die gegenüber der 20° C-Lagerung höhere Festigkeit ist maßgeblich auf die Beschleunigung der puzzolanischen Reaktion des Silikastaubes durch die erhöhte Temperatur zurückzuführen.

3.3 Verbesserung der Duktilität durch Einsatz von Fasern

Ein Versagen des Betons ohne Ankündigung ist im Bauwesen ungeeignet, da in diesem Fall mit hohen Sicherheitsfaktoren bemessen werden muss. Üblicherweise wird dies bei hochfesten Betonen durch die Anordnung einer verstärkten Quer- oder Umschnürungsbewehrung vermieden.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Stahl- und Polypropylenfasern. Untersuchungen [7] zum Fasereinsatz bei hochfesten Betonen der Festigkeitsklasse B85 haben gezeigt, dass die Kombination der beiden Fasern sich besonders günstig auswirkt.

In umfangreichen Untersuchungen an der TU München zur Erreichung einer für die Praxis ausreichenden Duktilität des ultrahochfesten Betons durch die Zugabe von hochfesten Stahlfasern und Polypropylen-Fasern wurden die maßgebenden Parameter aufgedeckt. Die Beurteilung der Verbesserung der Duktilität erfolgte anhand des Nachbruchverhaltens im weggesteuerten 3-Punkt-Biegezugversuch an gekerbten $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ Prismen.

Das Nachbruchverhalten wurde in Anlehnung an das DBV-Merkblatt „Stahlfaserbeton“ durch zwei äquivalente Biegezugfestigkeiten $f_{eq,I}$ (Gebrauchstauglichkeit) und $f_{eq,II}$ (Tragfähigkeit) charakterisiert, die aus Integralen der Last-Durchbiegungskurven ermittelt wurden.

Bei einer Stahlfaserlänge von nur 2mm konnte aufgrund der geringen Verbundlänge keine befriedigende Tragwirkung (siehe Abb. 2) im Bereich größerer Durchbiegungen mehr erzielt werden (vgl. Abbildung 2). Die Einbindelänge beträgt nach Kützing [7] lediglich $\frac{1}{4}$ der Faserlänge.

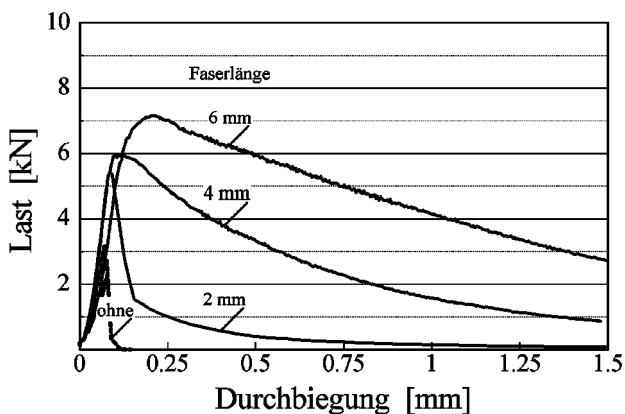


Abb. 2: Nachbruchverhalten der Probekörper in Abhängigkeit der Stahlfaserlänge (Fasergehalt 3,5 Vol.-%)

Mit steigendem Stahlfasergehalt stiegen die äquivalenten Biegezugfestigkeiten unabhängig von der Faserlänge linear an. Während im Falle der 6mm-Fasern die beiden äquivalenten Biegezugfestigkeiten $f_{eq,I}$ und $f_{eq,II}$ aufgrund der

langen Einbindelänge immer identisch waren, fiel $f_{eq,II}$ bei den 4mm Fasern unabhängig von dem Fasergehalt niedriger aus.

Durch den Einsatz von feinen PP-Fasern ($\varnothing = 0,016 \text{ mm}$) konnte aufgrund der eingebrachten vielen „Mikro-Fehlstellen“ ein weicherer Bruch festgestellt werden. Die Stahlfasern wurden infolge der ausgeprägten Mikrorissbildung früher und kontinuierlicher aktiviert, so dass die äquivalenten Biegezugfestigkeiten von rund 21 auf 34 N/mm² im Falle des PP-Fasergehaltes von 0,45 Vol.-% gesteigert werden konnte.

4 Erste realisierte Anwendung von ultrahochfestem Beton

Der Schöck Isokorb (siehe Abb. 3) wird als tragendes, wärmedämmendes Verbindungselement zwischen Betonbauteilen, wie z.B. Balkon und Deckenplatte verwendet. Entsprechend den neuen Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2002 wurde das Original von Schöck nochmals verbessert und die Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem Vorgängermodell um bis zu 30 % reduziert.

Möglich wurde diese Verbesserung durch das neu entwickelte Drucklager (siehe Abb. 4) aus faserbewehrtem, ultrahochfestem Beton, das die auftretenden Druckkräfte sicher überträgt. Die herausragenden Materialeigenschaften, wie Duktilität und Druckfestigkeit erlaubten bei der Konstruktion der Drucklagerelemente eine filigrane Geometriegestaltung, so dass das Verhältnis zu übertragende Druckkraft/ Betonquerschnitt ein Optimum darstellt.

Die Geometrieoptimierung des Betondrucklagers und die gegenüber nichtrostendem Stahl ~ 10 -fach geringere Wärmeleitfähigkeit des faserbewehrten, ultrahochfesten Betones, ermöglichten die Verbesserung der Wärmedämmung des Isokorbes um bis zu 30 %.

Infolge von Temperaturunterschieden kommt es bei wärmedämmten Balkonplatten zu Relativverschiebungen im Fugenbereich. Die Stirnflächen der Drucklager sind so ausgebildet, dass diese wie Pendelstäbe (siehe Abb. 5) die Längenänderungen individuell durch Schiefstellung ausglei-

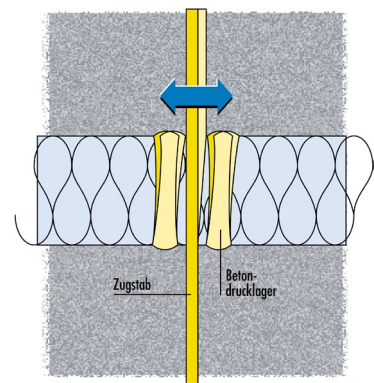
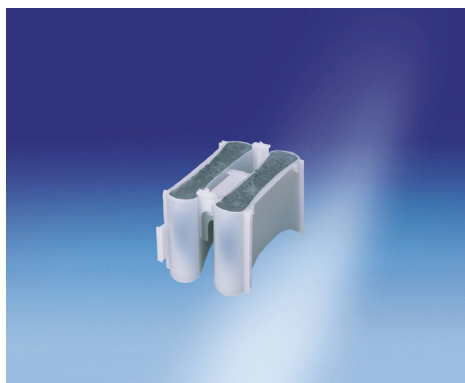
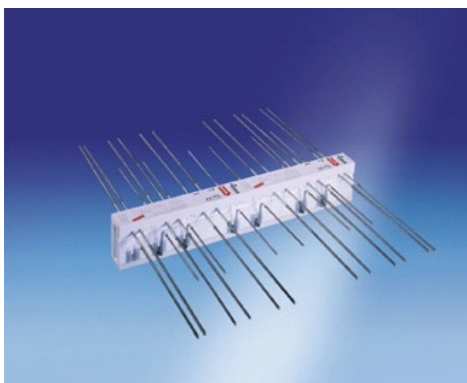


Abb. 3: Schöck Isokorb mit Betondrucklagern

Abb. 4: Betondrucklager

Abb. 5: Horizontalverschieblichkeit

chen können. Die Kunststoffummantelung am Drucklagerkopf übernimmt dabei die Funktion einer Trennschicht und gewährleistet so einen störungsfreien Bewegungsablauf. Bei der Drucklagerherstellung dient die Kunststoffummantelung zusätzlich als sogenannte „verlorene Schalung“ (s. Abb. 4), in die der ultrahochfeste Beton gegossen wird.

Für den Spannungsnachweis im Gebrauchszustand müssen die Druckelemente wegen des geforderten Sicherheitsfaktors von $\gamma \geq 3$ einer Druckspannung von $\geq 103 \text{ N/mm}^2$ standhalten. Die Betonrezeptur wurde so gewählt, dass darüber hinaus eine ausreichende Festigkeitsreserve vorhanden und ein duktiler Nachbruchverhalten sichergestellt ist.

Über die verbesserte Wärmedämmung hinaus, bringt das Drucklager aus ultrahochfestem Beton weitere Vorteile für den Isokorb. Die Drucklagerlänge konnte auf annähernd Dämmstoffstärke verringert werden, so dass ein perfektes Handling bei der Verarbeitung gewährleistet ist. Weiterhin konnte das Gewicht des Isokorbes® reduziert werden.

Hinsichtlich der Praxisreife des ultrahochfesten Betons war diese Anwendung ein erster Erfolg, was nicht zuletzt der guten Zusammenarbeit der Fa. Schöck und der TU München zu verdanken war. Im Juli 2002 wurde nach umfangreichen Zulassungsversuchen die „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung“ für den Schöck Isokorb® mit Betondrucklager durch das Deutsche Institut für Bautechnik erteilt. Die Drucklager werden in einer eigens dafür konzipierten Produktionsanlage hergestellt, bei der die speziellen Anforderungen hinsichtlich der Aufbereitung und Verarbeitung des ultrahochfesten Betons von Anfang an berücksichtigt und umgesetzt werden konnten.

- [5] Dallaire E., Bonneau O., Lachemi M., Aitcin P.-C.: Mechanical Behavior of Confined Reactive Powder Concretes. American Society of Civil Engineers Materials Engineering Conference, Washington, DC, November 1996, Vol. 1, pp. 555-563.
- [6] Schachinger, I.: Untersuchungen an Hochleistungs-Feinkorn-Beton. 38. Forschungskolloquium des DAfStb, München, März 2000, Tagungsband S.55-66.
- [7] Kützing, L.: Ein Beitrag zur Tragfähigkeitsermittlung stahlfaserverstärkter Betone unter besonderer Berücksichtigung bruchmechanischer Kenngrößen. Dissertation an der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig, 1999. 1. Auflage Oktober 2000, ISBN 3-519-05267-9.

Autoren:

**Dipl.-Ing. Jürgen SCHUBERT (cbm, TU München),
Dipl.-Ing. Ingo SCHACHINGER (cbm, TU München),
Dipl.-Ing. Hubert FRITSCHI (Schöck Entwicklungsgesellschaft mbH)**

Literaturverzeichnis

- [1] Richard P., Cheyrezy M.: Composition of REACTIVE POWDER CONCRETES. Scientific Division BOUYGUES, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.
- [2] Richard P.: Reactive Powder Concrete: A new Ultra-High-Strength Cementitious Material. 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete, Paris, 1996.
- [3] de Larrard F.: Ultrafine particles for making very high performance concretes. LCPC, Paris, Frankreich, 1992, ISBN 0419 176004.
- [4] Richard P., Cheyrezy M.: Reactive Powder Concrete with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength. ACI SPI 144-24, pp. 507-518, 1994.