

**Zeitschrift:** Tec21  
**Herausgeber:** Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein  
**Band:** 129 (2003)  
**Heft:** 21: High-Tech-Beton

**Artikel:** Ultrahochfest, duktil - zementgebunden: moderne, dauerhafte und wirtschaftliche Faserbetone  
**Autor:** Martinola, Giovanni  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-108751>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

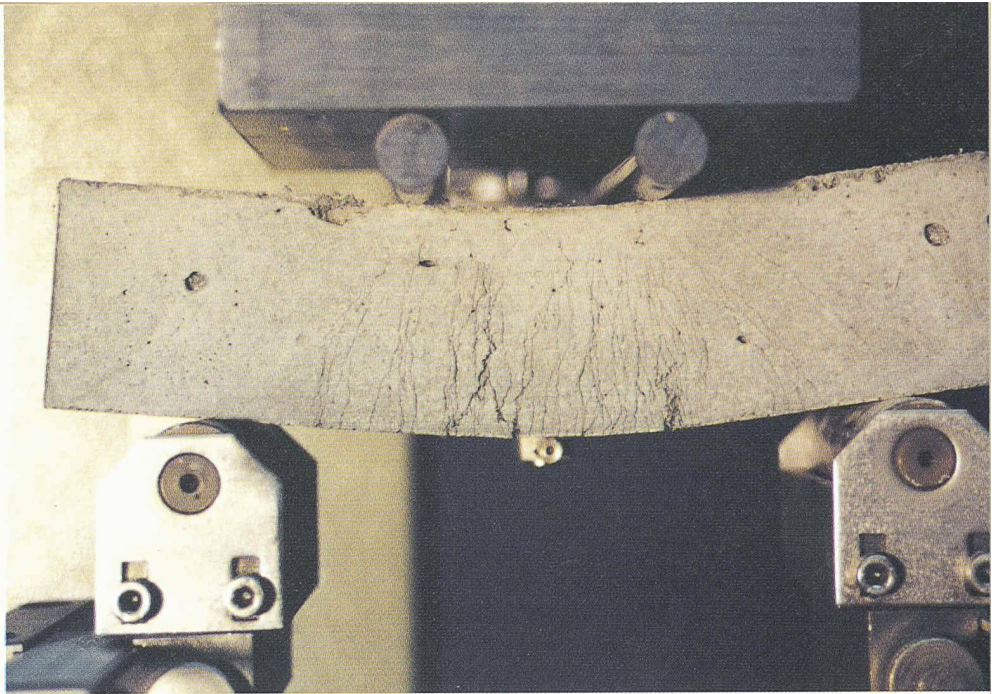
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 29.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



## Ultrahochfest, duktil – zementgebunden

Moderne, dauerhafte und wirtschaftliche Faserbetone

**In den letzten Jahrzehnten hat die Entwicklung von zementgebundenen Werkstoffen grosse Fortschritte gemacht. Neue Erkenntnisse führten zur Formulierung und zum Einsatz einerseits von hochduktilen zementgebundenen Werkstoffen (ECC – Engineered Cementitious Composites) und andererseits von ultrahochfesten Betonen (UHPC). Diese innovativen Baustoffe ermöglichen eine Reihe neuer und differenzierter Anwendungen.**

Seit Mitte der 80er-Jahre kann eine stetige und rasante Weiterentwicklung des Werkstoffs Beton beobachtet werden. Die Innovationen basieren auf der Entdeckung und Einführung neuer Zusatzstoffe, Zusatzmittel und Zemente. Die Verwendung von Silicastaub (hochkonzentrierte Kieselsäure) führte z. B. zur Herstellung dichter, fester und dauerhafter Betone. Gegenwärtig ist man in der Lage, solche Betone vor Ort herzustellen und dabei problemlos Druckfestigkeiten von 100–120 N/mm<sup>2</sup> zu erreichen.

Anfang der 90er-Jahre hat die Entwicklung von Feinzeimenten zur Herstellung von Injektionsmörteln für die Instandsetzung und die Bodenstabilisierung geführt. Die schnell erhärtenden Portlandzemente konnten zur Instandsetzung von Betonpisten und Betonfahrbahnen eingesetzt werden. Innert drei bis fünf Stunden erreichen sie die nötigen Festigkeiten.

Durch die Einführung besonders leistungsfähiger Verflüssiger (Polycarboxylate) ist der selbstverdichtende Beton (SVB resp. SCC) als neuer, viel versprechender

und praxistauglicher Baustoff entstanden. In den letzten Jahren wurde dieser Betontyp besonders in der Fertigteilindustrie, aber auch als Ort beton erfolgreich eingeführt. Dabei können aufgrund der besonderen Fliesseigenschaften Ausbreitmasse von ca. 70 cm und gleichzeitig eine stabile Konsistenz erreicht werden, wobei auf eine konventionelle Verdichtung mittels Vibratoren verzichtet werden kann. Wenn diese Technologie beherrscht wird, können im Vergleich zu klassischen Betonen viel homogenere und somit dauerhaftere Betone hergestellt werden.

Die etablierte Betontechnologie zur Herstellung von Hochleistungsbeton kombiniert mit der Möglichkeit, Beton ohne zusätzlichen Verdichtungsaufwand zu verarbeiten, führt zur Erstellung langlebiger Bauwerke mit einer deutlichen Reduktion des Arbeitsaufwandes und der Bauzeit.

Die vorerst neuste Entwicklung auf dem Gebiet der zementgebundenen Werkstoffe sind einerseits Betone, die eine weitere Steigerung der Druckfestigkeit ermöglichen (die so genannten ultrahochfesten Betone – UHPC) und andererseits Mörtel, die ein ausgeprägtes Verformungsvermögen und eine hohe Duktilität aufweisen (die so genannten Engineered Cementitious Composites – ECC<sup>1</sup>).

1

**4-Punkt-Biegeprüfung eines ECC-Prismas mit deutlich erkennbarer multipler Rissbildung in der Zugzone (Bilder: IBWK ETH Zürich)**



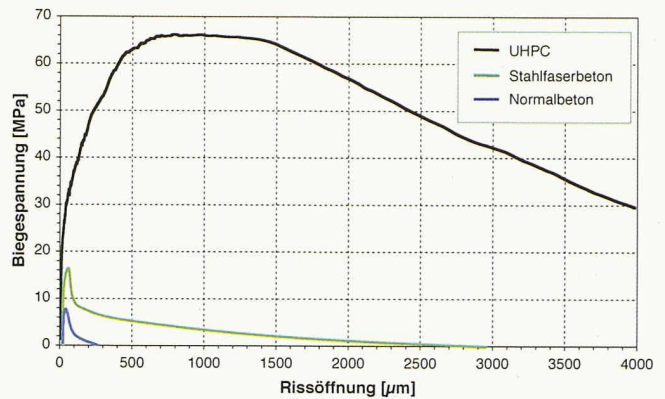
## Ultrahochfeste Betone (UHPC)

Die technologische Grundlage zur Herstellung von UHPC basiert auf schon bekannten Herstellungsprinzipien hochfester Betone. Das Ziel dabei ist die Minimierung von Poren und Mikrorissen, um ein möglichst homogenes und fehlerfreies Gefüge zu erzielen.<sup>2</sup> Im Vergleich zu hochfestem Beton basiert diese Technologie auf:

- einer immer höheren Packungsdichte durch Optimierung der Granulometrie und der Zusammensetzung der feinsten Zuschlagstoffe<sup>3</sup>
- einer Reduktion des Grösstkornes zur Homogenisierung des Gefüges
- einer weiteren Senkung des Wasser-Zementwertes durch sehr leistungsfähige Verflüssiger
- einer präzisen Auswahl der Ausgangsstoffe bezüglich ihres Reinheitsgrades

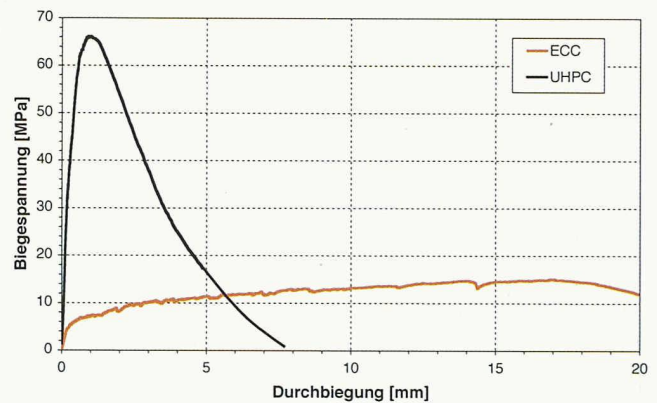
Mit diesem Vorgehen können Betone mit einer Druckfestigkeit von 180 bis 230 N/mm<sup>2</sup> hergestellt werden. Eine weitere Möglichkeit, die Eigenschaften von UHPC zu verbessern, ist eine Wärmebehandlung. Eine ein- bis zweitägige Wärmebehandlung bei 90 °C erhöht die Druckfestigkeit um ca. 20 %. Mit dieser besonderen Nachbehandlung wird die Hydratation des Zementsteins unterstützt und die puzzolanische Reaktion des Silicastaubes beschleunigt. Eine weitere Erhöhung der Nachbehandlungstemperatur auf 250 °C führt zur Bildung von Hydratkristallen und einer zusätzlichen Reduktion der Gesamtporosität.<sup>4</sup>

Zur Erhöhung der Duktilität dieser extrem spröden Werkstoffe werden oft hochwertige Stahldrahtfasern (Durchmesser: 0,15 bis 0,6 mm, Länge: 6 bis 30 mm, siehe Bilder 4 und 5) in einer Dosierung von 1,5 bis 4 Vol.-% zugegeben. Die abgebildeten Fasern werden oft gemeinsam verwendet (fiber cocktail), um eine bestimmte Performance zu erreichen. Der Einsatz von Fasern führt zu einer Steigerung der Druckfestigkeit und insbesondere zu einer deutlichen Steigerung der Biegezugfestigkeit von 20 bis 30 N/mm<sup>2</sup> auf bis zu 90 N/mm<sup>2</sup>.



2

Vergleich der Biegezugspannung-Rissöffnungsdiagramme von Normalbeton, Stahlfaserbeton und faserverstärktem UHPC



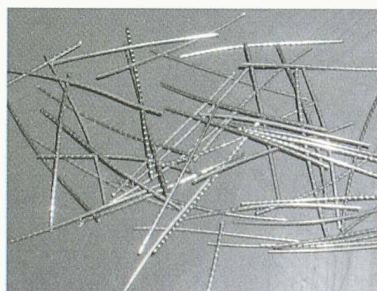
3

Typische Biegezugspannungs-Durchbiegungsdiagramme von ECC und UHPC



4

Mikrostahlfasern mit einem Durchmesser von 0,2 mm, einer Länge von 12 mm und einer Zugfestigkeit von 2000 N/mm<sup>2</sup>



5

Mikrostahlfasern mit einem Durchmesser von 0,6 mm, einer Länge von 30 mm und einer Zugfestigkeit von 1100 N/mm<sup>2</sup>



6

Polymerfasern aus Polyvinylalkohol mit einem Durchmesser von 0,2 mm, einer Länge von 12 mm und einem E-Modul von 30 000 N/mm<sup>2</sup>



7

Polymerfasern aus Polyvinylalkohol, Durchmesser 0,05 mm, Länge 6 mm und E-Modul 40 000 N/mm<sup>2</sup>



Bild 2 zeigt das typische Ergebnis einer 3-Punkt-Biegeprüfung. In diesem Diagramm ist die Rissöffnung als Funktion der Biegespannung eines faserverstärkten UHPC angegeben. Als Vergleich wird im gleichen Diagramm das Verhalten eines Normalbetons und eines klassischen Stahlfaserbetons dargestellt. Die Fasern verbessern bei diesem Werkstoff die Biegezugfestigkeit und die zentrische Zugfestigkeit im Vergleich zu klassischem Stahlfaserbeton deutlich stärker, da die Fasern in der sehr homogenen, dichten und festen Matrix des UHPC optimal eingebettet sind. Auch bei Zugabe von hohen Faseranteilen können diese Werkstoffe selbstverdichtend ausgelegt werden.

Neben den speziellen mechanischen Eigenschaften weist dieser Werkstoff eine sehr hohe Dichtigkeit, Dauerhaftigkeit und Verschleissbeständigkeit auf. Durch Zugabe von organischen Fasern (Bilder 6 und 7 zeigen Beispiele) kann zusätzlich ein hoher Feuerwiderstand erreicht werden (siehe Kasten).

Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften kann UHPC vielseitig und wirtschaftlich auch in Bereichen eingesetzt werden, in denen gegenwärtig andere Werkstoffe vorgezogen werden. In der Fertigteileindustrie können beispielsweise filigrane Tragelemente, ultrahochfeste Rohre oder Auskleidungen für den Tunnelbau produziert werden. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Verstärkung von Tragwerken im Rahmen von Instandsetzungen. In Frankreich werden heute bereits marktfähige Produkte auf der Basis von UHPC angeboten.<sup>5</sup>

### Engineered Cementitious Composites (ECC)

Diese Art faserverstärkter zementgebundener Werkstoffe weist im Vergleich zu UHPC eine deutlich kleinere Druckfestigkeit auf. Normalerweise ist sie nicht grösser als  $70 \text{ N/mm}^2$ . Die Besonderheit dieses Werkstoffes ist sein Verhalten unter Zugbelastung. Nach Erreichen der Erstrissfestigkeit zeigt sich ein metallähnliches Verhalten: Der Werkstoff verfestigt sich mit zunehmender Verformung unter Bildung von Mikrorissen. Im Vergleich zu herkömmlichem Mörtel tritt nach der Entstehung des ersten Risses nicht sprödes Versagen auf, sondern infolge der rissüberbrückenden Wirkung der Fasern ein weiterer Anstieg des Lasttragvermögens.

Bild 3 zeigt vergleichend die Spannungs-Durchbiegungsverläufe einer 4-Punkt-Biegeprüfung (an Prismen

der Abmessungen  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ ) zwischen ECC und faserverstärktem UHPC.

ECC weist im Vergleich zu UHPC einerseits deutlich kleinere Festigkeiten auf, hat andererseits aber ein wesentlich grösseres nutzbares Energieabsorptionsvermögen (Fläche unter der Kurve bis zur Zugfestigkeit), was für dynamisch beanspruchte Elemente von grosser Bedeutung ist. Bild 1 zeigt ein ECC-Prisma während einer 4-Punkt-Biegeprüfung.

Das deutlich erkennbare hohe Verformungsvermögen wird durch die Verwendung von ca. 2 Vol.-% organischer Hochmodulfasern erreicht. Diese Fasern haben einen E-Modul von ca.  $40 \text{ kN/mm}^2$ , einen Durchmesser  $\leq 50 \mu\text{m}$  und eine Länge von maximal 12 mm (Bild 7). Ein typischer Vertreter dieses Fasertyps sind die Polyvinylalkohol-Fasern (PVA-Fasern). Aufgrund der niedrigeren Festigkeit der ECC-Matrix und der grossen spezifischen Oberfläche der Fasern ist ihre Wirkung bezüglich Risseumverteilung und -überbrückung beim ECC bedeutend grösser als beim UHPC.

Anwendungsgebiete für solche Werkstoffe sind vor allem die Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken (Tunnel, Brücken) in gespritzter Form, im Extrusionsverfahren vorgefabrizierte Rohre<sup>6</sup> und die Erstellung von erdbebensicheren Tragelementen.

### Ausblick

In den letzten Jahren wurde eine Reihe neuer leistungsfähiger zementgebundener Werkstoffe entwickelt, die es IngenieurInnen und ArchitektInnen ermöglichen, dauerhafter und kosteneffizienter zu bauen. Um das volle Potenzial dieser neuen Werkstoffe in Zukunft auszunutzen, müssen diese anwendungsspezifisch und gezielt weiterentwickelt werden.

---

Dr. sc. techn. Giovanni Martinola, Dipl. Werkstoff-Ing. ETH, Lehrbeauftragter am Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion IBWK der ETH Zürich  
martinola@ibwk.baug.ethz.ch

### Literatur

- 1 Li, V. C.: Engineered Cementitious Composites – Tailored Composites Through Micromechanical Modeling, in Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future, N. Banthia, A. Bentur, and A. Mufti, Editors. 1998, Canadian Society for Civil Engineering: Montreal, Canada, p. 64–97.
- 2 Richard, P. and M. Cheyrezy: Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement & Concrete Research*, 1995, 25(7), p. 1501–1511.
- 3 De Larrard, F. and T. Sedran: Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of a Packing Model. *Cement & Concrete Research*, 1994, 24(6), p. 997–1009.
- 4 Richard, P., M. Cheyrezy and L. Frouin: Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement & Concrete Research*, 1995, 25(7), p. 1501–1511.
- 5 Aitcin, P. C., Lachemi, M., Adeline, R. and P. Richard: The Sherbrooke Reactive Powder Concrete Footbridge. *Structural Engineering International*, 1998(2), p. 140–144.
- 6 Stang, H. and Li, V. C.: Extrusion of ECC-Material, in High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3 (HPFRCC 3). Ed. H Reinhardt and A. Naaman, Chapman & Hall, 1999, p. 203–212.

### Feuerwiderstand faserverstärkter Betone

Die Bewehrung eines Betons mit synthetischen Kurzfasern (Polymerfasern wie beispielsweise Polyvinylalkoholfasern) erhöht den Feuerwiderstand des Betons erheblich. Unter Hitzeeinwirkung verlieren die Kurzfasern an Volumen, wodurch ein System feiner Kanäle entsteht, durch das der im Falle eines Brandes im Beton entstehende Wasserdampf entweichen kann. Ohne dieses Kanalsystem verursacht der Druckanstieg infolge der Wasserverdampfung innere Spannungen, die zum explosionsartigen Abplatzen grosser Teile des betroffenen Betonbauteils führen können.