1 Einleitung

1.1 Motivation

Sehr gefügedichter, fein- und grobkörniger ultrahochfester Beton (UHFB) mit einer Druckfestigkeit um 200 N/mm^2 wird bereits seit mehr als 25 Jahren von der Firma Densit in Dänemark hergestellt und mit und ohne Stahlfasern für zahlreiche Spezialanwendungen verwendet [Densit (2004)]. Anwendungsgebiete sind hochbelastete Industrieböden und Verkehrsflächen, z.B. auf Flughäfen (Densiphalt) [Koorsgaard et al. (1998)], Sicherheitsbauwerke wie z.B. Tankanlagen, Offshore-Öl- und -Gasförderanlagen und seit einigen Jahren Fundamente für Windkraftanlagen. So wird z.B. das dynamisch hoch belastete Köcherfundament der weltgrößten Off-shore-Windkraftanlage in Wilhelmshaven mit dem faserhaltigen Produkt Ducorit S4 der Firma Densit hergestellt [Etterdal et al. (2001)]. Ein hoch beanspruchtes, direkt befahrenes Brückendeck in den Niederlanden wurde ebenfalls mit UHFB erneuert; die Platte war dabei herkömmlich schlaff bewehrt mit einem sehr hohen Bewehrungsgrad [Kaptijn, Blom (2004)].

In den letzten 15 Jahren wurden faserbewehrte UHFB in Frankreich bis zur Marktreife entwickelt, die eine zukunftsweisende Entwicklung des Werkstoffs Beton darstellen, wobei v.a. zwei Produkte zu nennen sind. Zunächst ist dies der faserbewehrte ultrahochfeste Feinkornbeton (streng genommen Feinkornmörtel) namens BPR bzw. Ductal® der Firmen Lafarge, Bouygues und Rhodia, der ein Größtkorn kleiner als 0,60 mm aufweist. Solcher ultrahochfester Faserfeinkornbeton (UHFFB) wird im Laufe dieser Arbeit ausschließlich betrachtet, da nur er geringe Bauteildicken mit homogener Faserverteilung ermöglicht. Weiterhin entwickelte die Firma Eiffage, Velizy-Villacoublay einen ultrahochfesten Beton mit einem Größtkorn von 6 bis 8 mm namens BSI (Béton Spécial Industriel), wobei der grobe Kornanteil aus hochfestem gebranntem Bauxit besteht [Thibaux und Tanner (2002)]; dieser UHFB wird jetzt als Ceracem von Eiffage und SIKA weiter entwickelt [Maeder et al. (2004)].

Bei den meisten Bauwerken aus UHFB, die bislang erstellt wurden, handelt es sich um Brücken, wie z.B. die Fußgängerbrücke von Sherbrooke von 1997 [Blais und Couture (1999)], die Seonyu Fußgängerbrücke in Seoul von 2002 [Ricciotti (2001)], die Sakata-Mirai-Fußgängerbrücke von 2002 [Tanaka et al. (2002)] oder die ersten französischen Straßenbrücken in Bourg-Lès-Valence [Thibaux und Tanner (2002); Hajar, Lecointre et al. (2004)].

Bei diesen Brücken handelt es sich meist um biegebeanspruchte Bauwerke, bei denen die wesentlichen Zugbeanspruchungen durch Vorspannung überdrückt werden. Dies ist notwendig, da die Zugfestigkeit von UHFB bzw. UHFFB deutlich unterhalb der Druckfestigkeit liegt. Während die Druckfestigkeit beinahe in der Größenordnung von Baustahl liegt, beträgt die Zugfestigkeit nur etwa 7 bis 15 MPa je nach Fasergehalt. Es scheint deshalb sinnvoller zu sein, UHFFB dort einzusetzen, wo seine Vorteile besser zum Tragen kommen, und ein wesentliches Einsatzgebiet scheinen hierfür die Schalen zu sein. Einige Schalentypen erfahren bei membrangerechter Lagerung nur Druckspannungen, und geringe Zugspannungen, z.B. infolge Biegestörungen, können problemlos vom UHFFB aufgenommen werden. Aufgrund der Tatsache, dass damit UHFFB-Schalen ohne jegliche Stab- oder Mattenbewehrung ausgeführt werden können, und aufgrund der hohen Dichtigkeit bzw. Korrosionsbeständigkeit, sind

für UHFFB-Schalen keine Mindestdicken von 6 bis 8 cm wie für Stahlbeton einzuhalten. Schalendicken von 1 cm stellen kein Problem dar, sofern das Stabilitätsversagen nicht maßgebend wird. Dies erlaubt sehr leichte Konstruktionen und bei Fertigteilbauweise sehr leichte Elemente, die mit relativ kleinen Hebezeugen versetzt werden können.

Mit UHFFB sind teilweise noch schlankere Schalen möglich als die, mit denen sich u.a. Candela [Faber (1965)], Finsterwalder, Isler [Ramm und Schunck (1986)], Maillart, Nervi (1963) oder Torroja einen Namen machten. Zusammen mit entsprechenden Herstellverfahren ist somit die Möglichkeit für eine Wiederbelebung der Schalenbauweise gegeben.

Bei besonderen Anwendungen wie beispielsweise Langzeit-Wärmespeichern kommen neben der Festigkeit weitere Vorteile des UHFFB wie beispielsweise seine hohe Wasser- bzw. Wasserdampfdiffusionsdichtigkeit zum Tragen. Dort übernimmt der UHFFB neben der lastabtragenden auch die dichtende Funktion. Die Anforderungen, die an wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton gestellt werden [Timm (2004)], können mit UHFFB problemlos erfüllt werden. Das Beispiel des Wärmespeichers wird im Verlaufe dieser Arbeit ausführlich betrachtet werden.

Ein hoher Anteil des Energiebedarfs in Mittel- und Nordeuropa entfällt auf Heizung und Warmwasserversorgung von Gebäuden, und dies stellt für Bauingenieure eine große Herausforderung dar, Öl durch Sonnenenergie zu ersetzen. Während der letzten ca. 15 Jahre wurde von Hahne, Fisch und Kübler (1992, 1995) und Fisch et al. (2001) ein Konzept von „zentralen Solarheizanlagen mit saisonaler Speicherung“ entwickelt. Den Kern einer solchen Anlage stellt ein Wasserbehälter dar, der in heißem Wasser die Energie speichert, die im Sommer mittels solarer Wasserkollektoren auf den Dächern von Gebäuden gewonnen wird (Bild 1.1). Die Wärme dient dann im Herbst und im Winter zum Heizen und zur Warmwasserversorgung von Gebäuden.

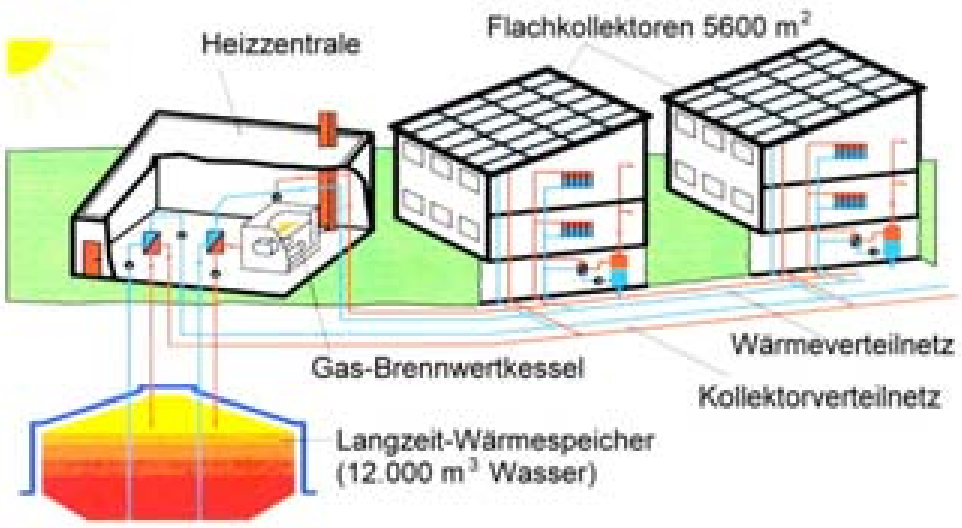


Bild 1.1: Konzept einer solarunterstützten Wärmeversorgung mit Wärmespeicherung

Wie aus Bild 1.1 ersichtlich wird sind Wärmespeicher meist aus Kegelstumpf- und Zylinderschalen zusammengesetzt. Ohne formoptimierte Übergänge zwischen diesen Schalentypen kommt es zu Biegestörungen infolge von geometrischen Unverträglichkeiten. Weitere Biegebeanspruchungen resultieren aus den Temperaturbelastungen infolge der Erwärmung bzw. Abkühlung des Wassers. Dabei sind Temperatursprünge von etwa 32 K über einen Meter Höhe im Wasser aufgrund der Temperaturschichtungen und Temperaturgradienten über die Wanddicke von etwa 10 bis 20 K zu berücksichtigen [Reineck und Lichtenfels (1997)]. Solche Biegestörungen können von UHFFB ohne zusätzliche Bewehrung abgetragen werden.

Der typische Wandaufbau eines Wärmespeichers aus Normalbeton ist in Bild 1.2 dargestellt. Im Inneren des Tanks ist eine Edelstahlauskleidung vorzusehen, um die Dichtigkeit des Speichers, z.B. gegenüber Wasserdampfdiffusion zu gewährleisten. Bei Speichern aus ultrahochfestem Beton kann wie zuvor erwähnt auf dieselbige verzichtet werden. Entsprechende Untersuchungen zur Dichtigkeit wurden beispielsweise von Reinhardt und Jooß (2000; 2004) durchgeführt. Durch die Einsparung der Edelstahlauskleidung und geringere Wandstärken bei UHFFB-Schalen können die höheren Materialkosten für UHFFB im Vergleich zu Normalbeton (mehr als) ausgeglichen werden. Auf der Außenseite der Schale aus Stahl- bzw. Spannbeton ist eine Wärmedämmung angebracht. Um diese vor Durchfeuchtung und somit Funktionseinbußen zu schützen, sind entsprechende Dampfsperren vorzusehen.

Eine ähnliche Anwendung stellen vorgespannte Stahlbetonbehälter zur Wasserversorgung oder für Flüssiggas dar [Inoue et al. (2002)].

Um die Unterschiede von UHFFB gegenüber Normalbeton und hochfestem Beton aufzuzeigen, woraus letztendlich die verbesserten Materialeigenschaften resultieren wird zunächst im folgenden Abschnitt ein kurzer Abriss über die Entwicklung der Betontechnologie gegeben.

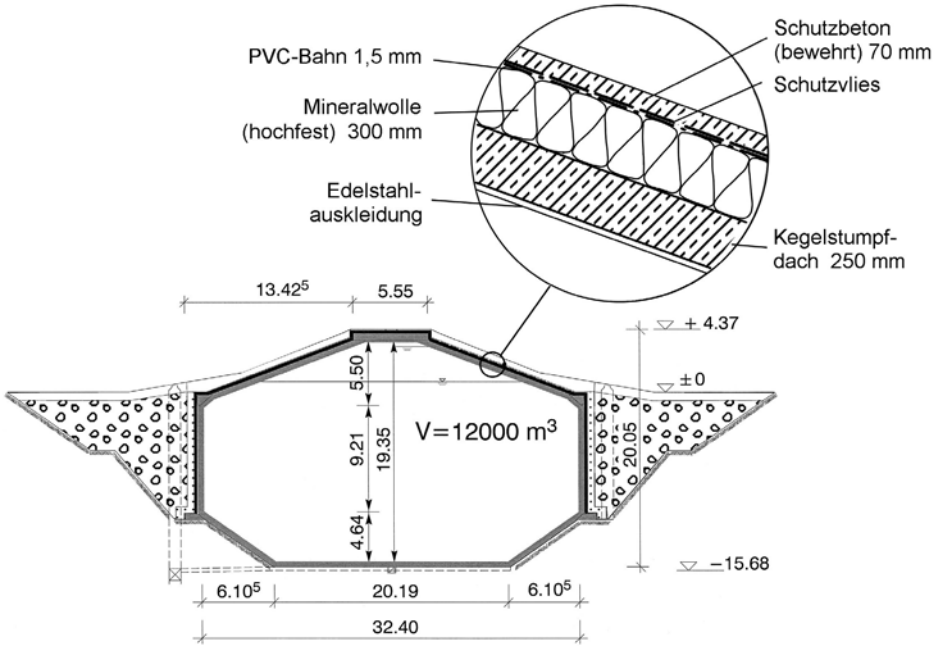


Bild 1.2: Wandaufbau des Wärmespeichers in Friedrichshafen-Wiggenhausen [Reineck und Lichtenfels (1997)]

1.2 Entwicklung von Normalbeton über hochfesten Beton zu ultrahochfestem Beton

Hochleistungs- bzw. hochfeste Betone (HLB bzw. HFB) sind die Weiterentwicklung von herkömmlichem Normalbeton hinsichtlich Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Die namensgebende Festbetoneigenschaft ist die Druckfestigkeit, die mechanisch gesehen durch die schwächste Einzelkomponente des Mehrkomponentenwerkstoffes Beton bestimmt wird. Bei Normalbetonen ist dies meist die Kontaktzone zwischen Zuschlag und Matrix, in der sich vermehrt Hydratationsprodukte geringer Festigkeit wie Calciumhydroxid und Ettringit, größere Poren und teilweise freies Wasser ansammeln. Dies ist auch im Bruchverhalten sichtbar. Während bei hochfestem Beton die Risse meist durch die Zuschlagkörner verlaufen, verlaufen sie bei Normalbeton um die Zuschlagkörner herum [z.B. Simsch (1995)]. Maßgebenden Einfluss auf diese Störzonen hat der Wasserzementwert. Er muss deshalb auf ein erträgliches Maß begrenzt werden, um geringe Porosität und hohe Druckfestigkeiten zu erreichen.

Erst durch die Entwicklung von hochreaktiven Fließmitteln war es möglich, trotz geringen Wassergehalts, eine praxisgerechte Konsistenz und Verarbeitungsdauer des HFB zu erreichen. Es ist eine Senkung des Wasserzementwertes auf $w/z \leq 0{,}4$ möglich. Die benötigte Bindemittelmenge liegt bei 400 bis 500 kg/m^3. Eine höhere Packungsdichte im Vergleich zu Normalbeton wird u.a. durch die Verringerung des Größtkorndurchmessers des Zuschlags von 32 mm auf 8 bis 16 mm erreicht.

Des weiteren werden bei HFB Zusatzstoffe wie Silikastaub als Feststoff oder Suspension, Steinkohlenflugasche oder Metakaolin hinzugegeben, die die Matrix und die Kontaktzone zum einen durch die Füllerwirkung in den Zwickelräumen zwischen den Zementpartikeln (Bild 1.3), was zu geringerer Porosität und höherer Packungsdichte führt, und zum anderen durch die puzzolanische Reaktion unter Bildung zusätzlicher Hydratphasen stärken. Die Folgen sind neben einer Festigkeitssteigerung, eine erhöhte Dichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten und eine erhöhte Dauerhaftigkeit bzw. ein erhöhter Widerstand gegenüber Frost-Tau-Wechseln, Abrieb, etc. [Reinhardt und Jooß (2000); Simsch (1995); König, Tue und Zink (2001)].

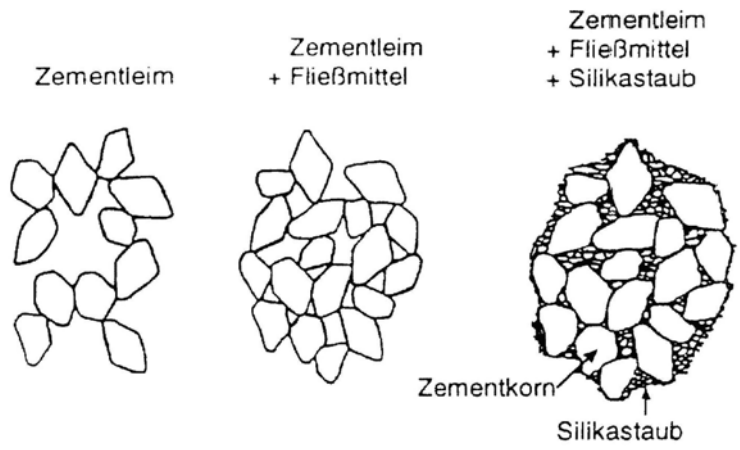


Bild 1.3: Füllereffekt des Silikastaubs [König, Tue und Zink (2001)]

Bild 1.4 zeigt die Kontaktzonen von Normalbeton und HFB im Vergleich. Bei Normalbeton erkennt man noch die großen Anteile der weichen Hydratationsprodukte Ettringit und Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$. Zweiteres liegt fein verteilt vor und hat nur einen geringen Einfluss auf den Verbund zwischen Zementstein und Zuschlag. Beim HFB ist dieser Anteil viel kleiner und die Kontaktzone deutlich dichter [König, Tue und Zink (2001)].

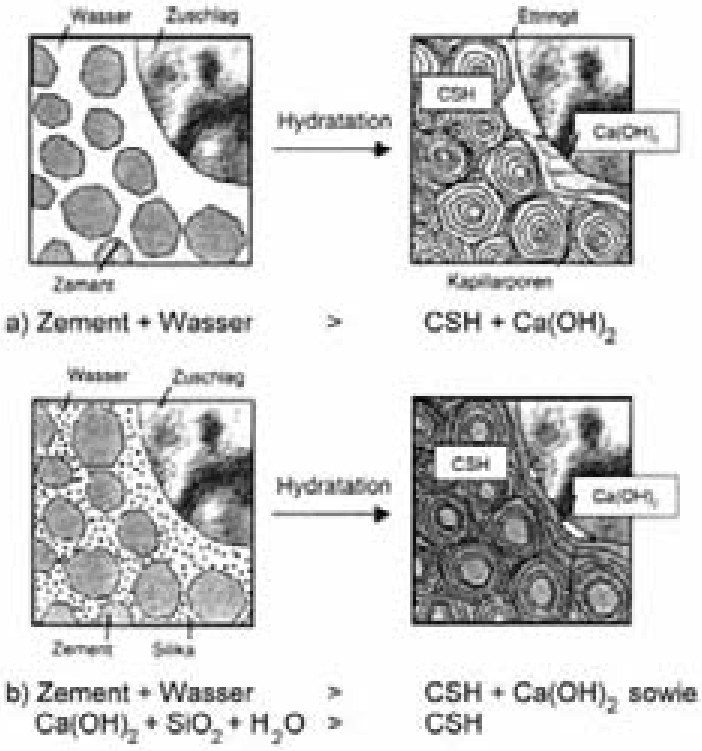


Bild 1.4: Schematische Darstellung der Zementhydratation von Normalbeton in a) bzw. hochfestem Beton in b) [König, Tue und Zink (2001)]

Als Zusatzmittel werden HFB oftmals noch Fließmittel, Luftporenbildner zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit oder Verzögerer, mit welchen höhere Endfestigkeiten erreicht werden können, hinzugegeben.

Tabelle 1.1 zeigt beispielhaft die Mischungszusammensetzung eines C55 und eines C100.

Hochfester Beton zeigt unter Druckbeanspruchung ein etwas anderes Spannungs-Dehnungs-Verhalten als Normalbeton (Bild 1.5). Er weist mit zunehmender Druckfestigkeit auch einen höheren E-Modul auf (vgl. Tabelle 1.2). Die jeweilige Druckfestigkeit wird trotz des höheren E-Moduls bei größeren Dehnungen erreicht. Da der Beton mit zunehmender Festigkeit jedoch auch gleichzeitig spröder wird, nimmt die Bruchdehnung entgegengesetzt zur Druckfestigkeit ab. Bei einer Druckfestigkeit von über 100 MPa ist kaum noch ein bzw. kein abfallender Ast mehr zu erkennen. Ultrahochfeste Betone ohne Fasern zeigen dann unter Druckbeanspruchung ein nahezu explosionsartiges Verhalten. Ultrahochfeste Betone liegen in ihrer Druckfestigkeit oberhalb des HFB. Sie beginnen bei einer Druckfestigkeit von etwa 150 MPa; in den meisten Fällen liegt sie zwischen 180 MPa und 200 MPa.

Tabelle 1.1: Mischungszusammensetzung eines C 55 und eines C 100 in [kg/m^3] nach König, Tue und Zink (2001)

Bestandteile	C 55	C 100
Zement	400	450
Silika	-	45
Flugasche	100	-
Wasser	150	127
Fließmittel	16	9
Verzögerer	-	1,8
Sand 0/2	605	620
Kies 2/8	390	-
Kies 8/16	740	-
Splitt 2/5	-	270
Splitt 5/8	-	210
Splitt 8/11	-	350
Splitt 11/16	-	420
Zuschlag gesamt	1735	1870

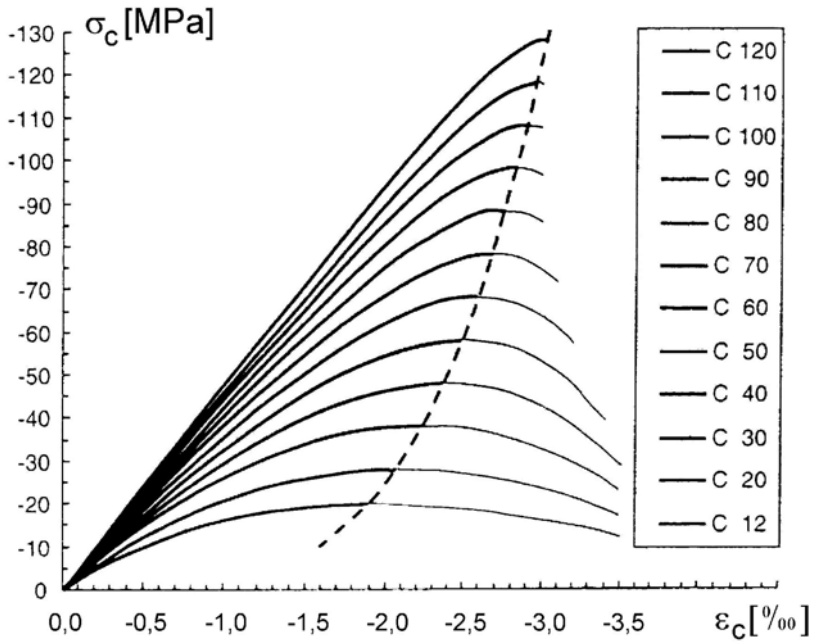


Bild 1.5: Spannungs-Dehnungslinien für Betone verschiedener Festigkeiten [König, Tue und Zink (2001)].

Tabelle 1.2: Elastizitätsmodul [MPa] nach DIN 1045-1 (2001)

Normalbeton				Hochfester Beton					
C 16/ 20	C 20/ 25	...	C 50/ 60	C 55/ 67	C 60/ 75	C 70/ 85	C 80/ 95	C 90/ 105	C 100/ 115
27400	28800	...	36800	37800	38800	40600	42300	43800	45200

Der Begriff „ultrahochfester Beton“ (UHFB) umfasst dabei sowohl Betone ohne und mit Faserzugabe als auch Feinkornbetone mit einem Größtkorn < 1 mm und Grobkornbetone mit einem Größtkorn von 8 oder gar 16 mm. Einen Überblick über UHFB und seine Eigenschaften bietet z.B. der Sachstandsbericht des DAfStb (2006). Für die hier betrachteten Schalentragwerke mit oft nur wenigen Zentimetern Dicke sind Größtkörner von 8 oder 16 mm nicht sinnvoll, und deshalb wird in dieser Arbeit ausschließlich auf Feinkornbeton eingegangen. Das Verhalten von Grobkornbetonen kann in manchen Gesichtspunkten ähnlich sein, dies ist jedoch im Einzelfall zu überprüfen.

Bei ultrahochfesten Faserfeinkornbetonen handelt es sich nach strenger Definition aufgrund ihrer Zusammensetzung und wegen des geringen Größtkorndurchmessers von etwa 0,6 mm nicht um Betone. Es werden Begriffe wie Reactive Powder Concrete (RPC) oder Béton de Poudres Réactives (BPR) verwendet. Ein Produkt dieser Kategorie, welches einen Stahlfasergehalt von 2 Vol-% aufweist, ist das von den Firmen Bouygues, Lafarge und Rhodia hergestellte Ductal® (früher: BPR), das auch für die eigenen Versuche in Abschnitt 2 verwendet wurde. Auf Deutsch werden solche Betone als Feinkorn- oder Reaktionspulverbeton bezeichnet. Ultrahochfeste Betone zeichnen sich neben den sehr guten Festigkeitseigenschaften durch hohe Dauerhaftigkeiten aus. Ein Grund hierfür liegt im geringen Wasser-Zement- bzw. Wasser-Bindemittelwert. Letzterer liegt im Bereich von etwa 0,13 bis 0,15, und der w/z-Wert liegt bei etwa 0,2, weshalb auf Fließmittel im Normalfall nicht verzichtet werden kann.

Bild 1.6 zeigt die Betondruckfestigkeit verschiedener Betone in Abhängigkeit vom Wasser-Zementwert. Normalbeton, HFB und UHFB weisen deutlich unterschiedliche w/z-Werte auf.

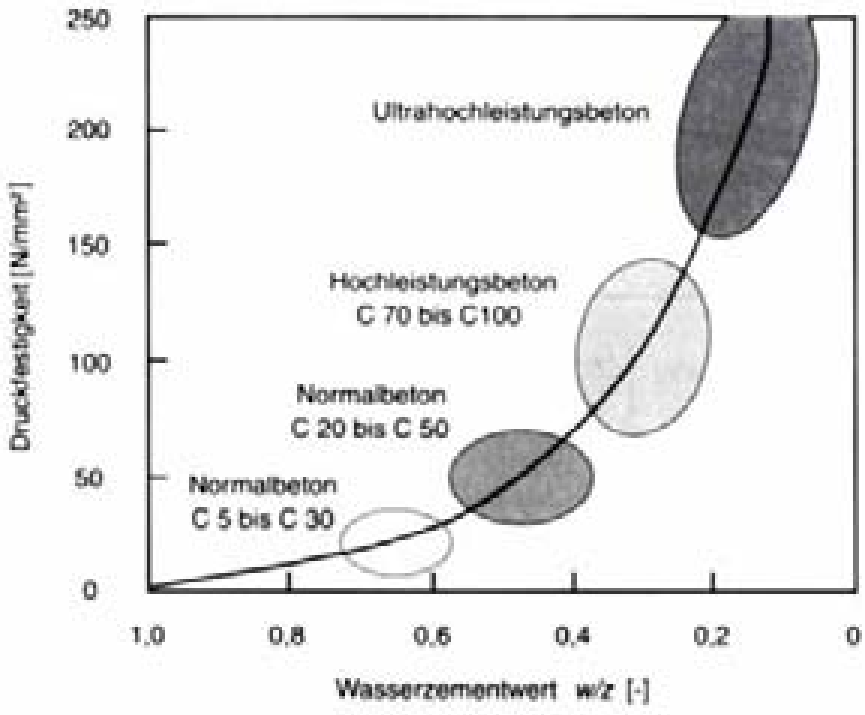
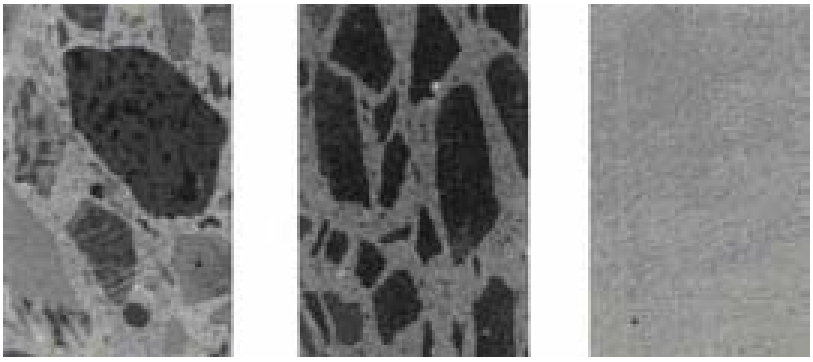


Bild 1.6: Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Wasserzementwert [König, Tue und Zink (2001)]

Konventionelle Betone haben ein heterogenes Gefüge, und hierdurch treten Gefügestörungen zwischen Zuschlag und Zementsteinmatrix, wie z.B. Mikrorisse auf. Das Grundprinzip bei ultrahochfestem Feinkornbeton basiert auf der Minimierung von Gefügestörungen, d.h. Poren und Mikrorisse werden durch die Wahl der Ausgangsstoffe und gegebenenfalls zusätzlich durch eine entsprechende Nachbehandlung reduziert. Dies geschieht durch folgende Maßnahmen [z.B. Richard und Cheyrezy (1995)]:

- Homogeneres Betongefüge durch den Wegfall von groben Zuschlägen.
- Erhöhung der Packungsdichte durch Optimierung des Korngemisches und gegebenenfalls Aufbringen von Druck vor und während des Erstarrens des Betons.
- Die Mikrostruktur kann durch eine optionale Wärmebehandlung nach dem Erstarren des Betons weiter verbessert werden.
- Verbesserung der Duktilität ist durch Zugabe von feinen Stahl- und auch Kunststofffasern möglich.

Der Wegfall an groben Zuschlägen geht einher mit einem höheren Zementbedarf. Für ultrahochfesten (Faser-)Feinkornbeton werden Zementgehalte zwischen 700 und 1000 kg/m^3 Beton benötigt. Als Zuschläge werden Quarzmehl (ca. 200 kg/m^3) und Quarzsand (ca. 1000 kg/m^3) verwendet. Dadurch ergibt sich ein auch optisch deutlich homogeneres Betongefüge (Bild 1.7).



a) Normalbeton Größtkorn 32 mm | b) Hochfester Beton Größtkorn 16 mm | c) Ultrahochfester Feinkornbeton Größtkorn 0,6 mm

Bild 1.7: Vergleich von Normalbeton, hochfestem Beton und ultrahochfestem Beton [Schneider und Horvath (2000)]

Silikastaub mit Partikeldurchmessern von 0,1 bis 0,5 µm (ca. 230 kg/m^3) dient als Porenfüller zwischen den Zement- und Quarzkörnern und verbessert die rheologischen Eigenschaften aufgrund eines Schmierungseffekts. Er führt außerdem wie bei HFB auch zu zusätzlichen CSH-Phasen durch puzzolanische Reaktion mit dem bei der Hydratation des Zements gebildeten Calciumhydroxids [König, Tue und Zink (2001)]. Die Bestandteile eines ultrahochfesten Faserfeinkornbetons UHFFB sind in Bild 1.8 dargestellt. Ein Beispiel für die Mengenverhältnisse wird in Bild 2.1 für das dort verwendete Produkt Ductal® angegeben.

Bild 1.8: Mischungsbestandteile eines ultrahochfesten Betons [Schneider, Horvath, König und Dehn (2001)]

Als wirtschaftliches Optimum geben König et al. (2001) einen Fasergehalt von 2 Vol-% bzw. 160 kg/m^3 an. Gossla (2000) gibt für Stahlfaserbeton einen kritischen Fasergehalt von 100 bis 200 kg/m^3 an. Der kritische Fasergehalt stellt sicher, dass bei zentrischem Zug die Zugkräfte nach dem Reißen der Matrix von den Fasern aufgenommen werden können – ohne dass diese sofort reißen oder ausgezogen werden. Herkömmlicher Stahlfaserbeton weist mit nur etwa 40 bis 50 kg/m^3 eigentlich einen viel zu geringen Fasergehalt auf. Neben wirtschaftlichen Gründen (Preis für Stahlfasern) ist dies auf eine drastische Verschlechterung der Verarbeitbarkeit zurückzuführen, wenn herkömmlichen Grobkornbetonmischungen Stahlfasern zugegeben werden. Bei UHFFB ist dieses Phänomen nicht zu beobachten. Erklären lässt sich der Unterschied mit den unterschiedlichen Größenverhältnissen von Faserlänge und Zuschlag (Bild 1.9).

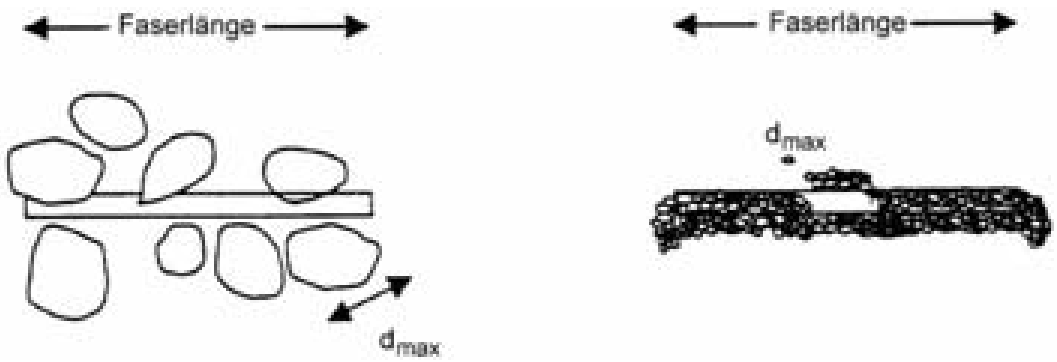


Bild 1.9: Einbindung einer Faser in Normalbeton (links) und in ultrahochfesten Betons (rechts) [Schneider und Horvath (2000)]