

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

Sachstandsbericht

Ultrahochfester Beton

von

Michael Schmidt
Kai Bunje
Frank Dehn
Klaus Droll
Ekkehard Fehling
Stefan Greiner
Johannes Horvath
Eugen Kleen
Christoph Müller
Karl-Heinz Reineck
Ingo Schachinger
Thomas Teichmann
Manfred Teutsch
Roland Thiel
Nguyen V. Tue

© 2008 Beuth Verlag GmbH
Berlin · Wien · Zürich
Burggrafenstraße 6
10787 Berlin

Telefon: +49 30 2601-0
Telefax: +49 30 2601-1260
Internet: www.beuth.de
E-Mail: info@beuth.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronischen Systemen.

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb
Fachbereich 07 des NABau im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
dafstb@din.de

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden vom Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

Druck: druckmuck@digital, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN 6738

ISSN 0171-7197
ISBN 3-410-65045-4

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

Sachstandsbericht

Ultrahochfester Beton

von

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt
Dipl.-Ing. Kai Bunje
Jun.-Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn
Dr. Klaus Droll
Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling
Dr.-Ing. Stefan Greiner
Dr. Johannes Horvath
Dipl.-Min. Eugen Kleen
Dr.-Ing. Christoph Müller
Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Reineck
Dr.-Ing. Ingo Schachinger
Dipl.-Ing. Thomas Teichmann
Dr.-Ing. Manfred Teutsch
Dipl.-Ing. Roland Thiel
Dr.-Ing. Nguyen V. Tue

1. Auflage 2008

Herausgeber:

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb
Fachbereich 07 des NA Bau im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Beuth Verlag GmbH · Berlin · Wien · Zürich

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung und Zielsetzung	7
2.	Anwendungen von ultrahochfesten Betonen (UHFB) und Bauwerke aus UHFB.....	8
2.1.	Einführung und Überblick zur Entwicklung von UHFB	8
2.2.	Dauerhaftigkeit von ultrahochfesten Betonen.....	9
2.3.	Umweltverträglichkeit von ultrahochfesten Betonen	9
2.4.	Hinweise zur Wirtschaftlichkeit.....	10
2.5.	Beispiele für Anwendungen	10
2.5.1.	Fußgängerbrücke von Sherbrooke, Kanada	10
2.5.1.1.	Allgemeines	10
2.5.1.2.	Aufbau und Tragverhalten	11
2.5.1.3.	Fertigung im Fertigteilwerk	13
2.5.1.4.	Montage	13
2.5.1.5.	Zusammenfassung der technischen Daten	14
2.5.2.	Seonyu-Fußgängerbrücke in Seoul	14
2.5.3.	Sakata-Mirai-Fußgängerbrücke in Sakata	15
2.5.4.	Die ersten französischen Straßenbrücken aus UHFB.....	16
2.5.5.	Die Kasseler „Brückenfamilie“ aus UHFB.....	17
2.5.6.	Träger im Kernkraftwerk Cattenom.....	21
2.5.7.	Weitere Beispiele	22
2.5.7.1.	Ausnutzung von Festigkeit und Duktilität.....	22
2.5.7.2.	Einsatz bei hohen Anforderungen an Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit.....	23
2.5.7.3.	Anwendungen von UHFB bei hohen architektonischen Anforderungen.....	24
2.6.	Aktuelle Forschungsprojekte in Deutschland und Österreich zur Erschließung weiterer Einsatzgebiete für UHFB.....	25
2.7.	Literatur zum Abschnitt 2	26
3.	Ausgangsstoffe und Grundlagen der Mischungszusammensetzung.....	29
3.1.	Übersicht	29
3.2.	Gesteinskörnungen	29
3.3.	Zement	30
3.4.	Reaktive und inerte Zusatzstoffe	31
3.4.1.	Übersicht	31
3.4.2.	Silikastaub.....	32
3.4.3.	Flugasche	33
3.4.4.	Metakaolin	33
3.4.5.	Gesteinsmehle	34
3.4.6.	Feinsthüttensandmehle	34
3.5.	Zusatzmittel.....	34
3.6.	Fasern	36
3.7.	Mischungszusammensetzung.....	38
3.7.1.	Grundlagen der Mischungsoptimierung bei UHFB	38
3.7.2.	Einfluss der Kornpackung	39
3.7.3.	Typische Mischungen	43
3.8.	Literatur zum Abschnitt 3	44
4.	Herstellung von UHFB	49
4.1	Allgemeines.....	49
4.2	Mischen	49
4.3	Transportieren, Fördern, Lagern und Einbauen	51
4.4	Anforderungen an die Schalung	53

4.5	Verdichtung.....	54
4.6	Oberflächenbearbeitung und Nachbehandlung	54
4.7	Wärmebehandlung und Autoklavierung.....	55
4.8	Qualitätssicherung	55
4.9	Prüfverfahren	56
4.10	Literatur zum Abschnitt 4	56
5	Eigenschaften des jungen Betons	57
5.1	Allgemeines.....	57
5.2	Zwangsspannungen im jungen Alter.....	57
5.3	Gefahr der Rissbildung in jungem Alter.....	58
5.4	Frühschwinden	59
5.5	Hydratationswärme	60
5.6	Literatur zum Abschnitt 5	60
6	Festbeton	61
6.1	Allgemeines.....	61
6.2	Mikrostruktur des Ultrahochleistungsbetons	61
6.2.1	Mineralphasenbestand.....	61
6.2.2	Porosität und Porengrößenverteilung.....	61
6.2.3	Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementleim	62
6.2.4	Mikrorisse im Betongefüge.....	62
6.3	Verhalten unter Druckbeanspruchung	62
6.3.1	Spannungs-Dehnungs-Linie von UHFB ohne Fasern	62
6.3.2	Querdehnzahl.....	63
6.3.3	Spannungs-Dehnungs-Linie von UHFB mit Stahlfasern	64
6.3.4	Einflüsse auf die Festigkeit	65
6.3.4.1	Prüfkörpergeometrie	65
6.3.4.2	Prüfmaschine.....	65
6.3.4.3	Wärmebehandlung	65
6.4	Verhalten unter Zugbeanspruchung.....	66
6.4.1	Zentrischer Zug.....	66
6.4.2	Biegezug.....	67
6.4.3	Ableitung der zentrischen Zugfestigkeit aus der Druckfestigkeit	69
6.4.4	Ableitung der zentrischen Zugfestigkeit aus Biegezugversuchen	69
6.4.5	Spaltzugfestigkeit.....	69
6.4.6	Einfluss der Prüfmaschine auf das Zugtragverhalten	70
6.4.7	Einfluss der Fasergeometrie und -orientierung auf das Tragverhalten von UHFB unter Zugbeanspruchung	70
6.4.8	Bruchmechanisches Verhalten	72
6.5	Zeitabhängige Verformungen.....	72
6.5.1	Autogenes Schwinden	72
6.5.2	Trocknungsschwinden.....	73
6.5.3	Frühschwinden (Plastisches Schwinden oder Kapillarschwinden)	74
6.5.4	Kriechen	75
6.5.4.1	Nicht wärmebehandelter UHFB	75
6.5.4.2	Wärmebehandelter UHFB	76
6.6	Wärmedehnzahl	76
6.7	Verhalten unter dynamischer Belastung.....	76
6.8	Festigkeit unter mehraxialer Belastung und Teilflächenpressung.....	77
6.9	Verbund zwischen UHFB und Betonstahl bzw. Spannstahl.....	77
6.10	Widerstand gegen Brandeinwirkung	79
6.10.1	Allgemeines.....	79
6.10.2	Stahlfasern	81

6.11	Dauerhaftigkeit und besondere Eigenschaften	81
6.11.1	Alkalität der Porenlösung	81
6.11.2	Diffusion und Permeabilität	82
6.11.3	Widerstand gegen chemischen Angriff	83
6.11.3.1	Treibender Angriff	83
6.11.3.2	Lösender Angriff	84
6.11.4	Widerstand gegen physikalischen Angriff	85
6.11.4.1	Frost-Tau-Widerstand	85
6.11.4.2	Frost-Taumittel-Widerstand	85
6.11.5	Korrosionsschutz	85
6.11.5.1	Carbonatisierung	85
6.11.5.2	Chloridinduzierte Korrosion	86
6.11.6	Verschleißwiderstand	86
6.12	Literatur zum Abschnitt 6	86
7	Bemessung und Konstruktion	91
7.1	Einführung und Vorbemerkungen	91
7.2	Bemessungsgrundlagen für ultrahochfeste Betone	91
7.2.1	Bemessungswert der Druckfestigkeit	91
7.2.1.1	Richtlinie AFGC/SETRA [7.4]	91
7.2.1.2	JSCE-Richtlinie für USC [7.5]	91
7.2.1.3	Bemessungswert auf Grundlage der DIN 1045-1 [7.1]	92
7.2.1.4	Vergleich der Vorschläge und Diskussion	93
7.2.2	Bemessungswert der Zugfestigkeit	94
7.2.2.1	Definition	94
7.2.2.2	Theoretische Abschätzung der Zugfestigkeit aufgrund von Fasergehalt und -orientierung	94
7.2.2.3	Ableitung der Zugfestigkeit aus Biegezugversuchen nach AFGC/SETRA	95
7.2.2.4	Ableitung der Zugfestigkeit aus Biegezugversuchen in Anlehnung an die Stahlfaserbetonrichtlinien von DBV [7.2] und DAfStb [7.3]	95
7.2.3	Weitere Materialeigenschaften für die Bemessung	96
7.2.3.1	Elastizitätsmodul von UHFB	96
7.2.3.2	Querdehnzahl	96
7.2.3.3	Wärmedehnzahl	96
7.2.3.4	Schwinden und Kriechen	96
7.2.4	Spannungs-Dehnungs-Linie für nichtlineare Verfahren der Schnittgrößenermittlung und für die Verformungsberechnungen	96
7.2.4.1	Spannungs-Dehnungs-Beziehung nach AFGC/SETRA [7.4]	96
7.2.4.2	Spannungs-Rissbreiten-Beziehung auf Grundlage der theoretischen Abschätzung der Zugfestigkeit aufgrund von Fasergehalt und -orientierung	97
7.2.4.3	Spannungs-Dehnungs-Beziehung für UHFB in Anlehnung an DIN 1045-1 [7.1]	99
7.2.4.3.1	Druckspannungs-Dehnungs-Beziehung für UHFB	99
7.2.4.3.2	Spannungs-Dehnungs-Linie im Zugbereich in Anlehnung an das Stahlfaserbetonmerkblatt des DBV [7.2] und den Richtlinienentwurf des DAfStb [7.3]	100
7.2.4.4	Diskussion der Vorschläge für das Zugtragverhalten	101
7.2.5	Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Querschnittsbemessung	101
7.2.5.1	Spannungs-Dehnungs-Beziehung für die Querschnittsbemessung nach AFGC/SETRA	101
7.2.5.2	USC-Richtlinie der JSCE (2004)	102
7.2.5.3	Spannungs-Dehnungs-Beziehung für UHFB auf Druck für die Querschnittsbemessung auf Grundlage der DIN 1045-1	103
7.3	Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit	106
7.3.1	Allgemeines	106
7.3.2	Biegung mit Längskraft	106
7.3.3	Querkraft und Torsion	106
7.3.4	Durchstanzen	107
7.3.5	Stabwerkmodelle	107
7.3.6	Teilflächenbelastung und Einleitung konzentrierter Lasten	107
7.3.7	Nachweis gegen Ermüdung	107
7.4	Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit	108

7.4.1	Begrenzung der Spannungen.....	108
7.4.2	Begrenzung der Rissbreiten und Nachweis der Dekompression.....	108
7.4.3	Begrenzung der Verformungen.....	108
7.5	Literatur zum Abschnitt 7	108
8	Zusammenfassung und Forschungsbedarf	111
8.1	Allgemeines.....	111
8.2	Umfang und Inhalt des DFG-Schwerpunktprogrammes „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton“	111
8.3	Zusammenfassungen der Arbeitsberichte über die Projekte der ersten Förderperiode 2005–2007	114
8.3.1	Werkstoffverhalten von ultrahochfestem Beton im frühen Alter (Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann, Dr.-Ing. M. Krauß, TU Braunschweig).....	114
8.3.2	Versuchstechnische Ermittlung und mathematische Beschreibung der mehraxialen Festigkeit von ultrahochfestem Beton (UHFB) (Prof. Dr.-Ing. M. Curbach, TU Dresden).....	114
8.3.3	Zum Tragverhalten von UHFB mit Kombination aus Faser- und Stabstahlbewehrung unter Zugbeanspruchung (Prof. Dr.-Ing. E. Fehling, Universität Kassel)	115
8.3.4	Beständigkeit von UHFB gegenüber chemischem Angriff (Prof. Dr.-Ing. L. Franke, Dr.-Ing. G. Deckelmann, TU Hamburg-Harburg).....	116
8.3.5	Erhöhung der Duktilität von UHFB durch die Kombination von Fasern und nanoskalierten Partikeln (Prof. Dr.-Ing. P. Grübl, Dr. rer. nat. O. Kroggel, Prof. Dr. rer. nat. J. J. Schneider, TU Darmstadt)	116
8.3.6	Ermüdung von UHFB unter ein- und mehraxialer Beanspruchung (Prof. Dr.-Ing. J. Grünberg, Prof. Dr.-Ing. L. Lohaus, Leibniz-Universität Hannover)	117
8.3.7	Vorgespannte Träger mit und ohne Stegöffnungen aus ultrahochfestem Beton (Prof. Dr.-Ing. J. Hegger, RWTH Aachen)	117
8.3.8	Zur Wirkungsweise von Verbundmitteln in Verbundkonstruktionen aus ultrahochfestem Beton (Prof. Dr.-Ing. habil. N. V. Tue, Prof. Dr.-Ing. J. Hegger, Universität Leipzig, RWTH Aachen)	117
8.3.9	Betone mit verminderten Gehalten an energieintensiven Bindemitteln (Prof. Dr.-Ing. D. Heinz, TU München)	118
8.3.10	Charakterisierung der UHFB Mikrostruktur in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung und deren Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und Dauerhaftigkeit (Dr. rer. nat. B. Möser, Bauhaus-Universität Weimar)	119
8.3.11	Materialgesetze für das Spannungs-Dehnungs-Zeitverhalten von ultrahochfestem Beton (Prof. Dr.-Ing. H. Müller, Universität Karlsruhe)	120
8.3.12	Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich (Dr.-Ing. R. Niedermeier, TU München).....	120
8.3.13	Schwindreduzierende Fließmittel für ultrahochfesten Beton (Prof. Dr. J. Plank, TU München).....	121
8.3.14	Untersuchungen zum Frost-/Frost-Taumittel-Widerstand, dem autogenen Schwinden und der Gefügestruktur von UHFB (Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. J. Setzer, Universität Duisburg-Essen).....	121
8.3.15	Optimierung des Mischprozesses ultrahochfester Betone (Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. P. Schießl, TU München)	122
8.3.16	Nachhaltigkeitsanalyse von UHFB mit Hilfe von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung (Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. P. Schießl, TU München)	122
8.3.17	Einfluss der Kornform von Feinststoffen auf die Packungsdichte und das rheologische Verhalten von UHFB (Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt, Universität Kassel).....	123
8.3.18	Selbstverdichtender ultrahochfester Beton mit neuartiger Mikrobewehrung (Prof. Dr.-Ing. M. Schnellenbach-Held, Prof. Dr.-Ing. W. Buschmeyer, Universität Duisburg-Essen)	123
8.3.19	Gefährdungspotenzial für ultrahochfesten Beton durch Rissbildung im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit (Dr.-Ing. Ch. Müller, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf)	124
8.3.20	Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von hochbeanspruchten Druckgliedern aus ultrahochfestem Faserbeton (UHPFRC) mit hochfester Längsbewehrung (Dr.-Ing. M. Teutsch, Prof. Dr.-Ing. H. Falkner, TU Braunschweig).....	125
8.3.21	Fügen von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton (UHFB) durch Verkleben (Prof. Dr.-Ing. K. Zilch, TU München)	126

1 Einleitung und Zielsetzung

Ultrahochfester Beton (engl. Ultra-High-Performance-Concrete, UHPC) ist ein sehr gefügedichter, fein oder grobkörniger Beton mit einer charakteristischen Druckfestigkeit über der in DIN EN 206-1 definierten höchsten Druckfestigkeitsklasse für Hochfesten (Normal-)Beton C 100/115. Je nach Zusammensetzung und Herstellverfahren werden Druckfestigkeiten zwischen rd. 150 und 250 N/mm² erreicht. Derzeit existiert in Deutschland noch keine Norm oder Richtlinie für UHFB. Für seine Anwendung im bauaufsichtlichen Bereich ist deshalb eine Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich.

Ultrahochfester Beton ist ein Hightech-Werkstoff, der es ermöglicht, mit Beton hoch tragfähige, dabei besonders leichte und filigrane Bauwerke zu erstellen, wie sie bislang in erster Linie dem Stahl vorbehalten waren. Rohstoffe und Energie werden eingespart und das geringere Eigengewicht und die höhere Festigkeit ermöglichen noch größere Spannweiten und höhere Bauwerkshöhen. Er ist weit korrosionsbeständiger und die damit hergestellten Bauwerke sind dementsprechend dauerhaft.

International wurden bisher in wenigen Einzelfällen Bauprojekte mit UHFB verwirklicht. Die dabei gesammelten Erfahrungen wurden u. a. in einer vorläufigen französischen Richtlinie für die Bemessung von Bauteilen mit UHFB niedergelegt. In Japan erschien 2004 ebenfalls eine entsprechende Richtlinie. Ein Ausschuss der Fédération International du Béton (fib) erarbeitet derzeit Baustoff- und Bemessungsregeln für UHFB. Der vorliegende Sachstandsbericht ist international das erste umfassende Kompendium, das den Stand des Wissens über UHFB von den Ausgangsstoffen über die Herstellung und Verarbeitung, die wesentlichen Stoffkennndaten bis hin zur Bemessung und Konstruktion umfassend beschreibt.

Die Technologie des Ultra-Hochleistungsbetons beruht weitgehend auf dem „Reactive Powder Concrete“, der bereits in den 60er Jahren entwickelt wurde. Das Gefüge des Zementsteins wird durch die gezielte Auswahl optimal aufeinander abgestimmter, reaktiver und inerter Feinststoffe in Verbindung mit einem sehr niedrigen Wasser-Zementwert sehr feststoffreich und zugleich sehr porenarm gestaltet. Dadurch werden die Festigkeit, die Dichtigkeit und die Dauerhaftigkeit des Betons verbessert und gleichzeitig der Wasseranspruch des Betons so herabgesetzt, dass mit den heute verfügbaren, sehr wirksamen Fließmitteln sowohl erdfeuchte als auch sehr fließfähige, selbstverdichtende Frischbetone hergestellt werden können. Während der klassische „Reactive Powder Concrete“ ein Größtkorn von höchstens 0,5 mm aufweist, ist es heute möglich, mit geeigneten Gesteinskörnungen auch ultrahochfeste Betone mit einem Größtkorn von bis zu 16 mm zielsicher herzustellen.

Die hohe Festigkeit, das sehr dichte Gefüge und die daraus resultierende sehr hohe Dauerhaftigkeit beruhen im Wesentlichen auf drei Faktoren:

- einem niedrigen Wasser-Bindemittelwert von in der Regel weniger als 0,25,
- der Verwendung von Zementen und gezielt ausgewählten mineralischen Zusatzstoffen zur Erzielung einer möglichst dichten, hohlraumarmen Kornpackung,
- dem Einsatz hoch wirksamer Betonzusatzmittel zur Einstellung der Konsistenz.

Bei Belastung verhält sich ultrahochfester Beton praktisch bis zur Höchstlast linear elastisch. Dabei speichert er sehr viel Energie, die ohne ausreichende Bewehrung im Bruchzustand schlagartig freigesetzt wird. Das spröde Bruchverhalten würde seine Anwendung auf Sonderfälle beschränken oder dazu führen, dass seine hohe Festigkeit nur begrenzt ausgenutzt werden könnte.

UHFB wird deshalb in der Regel mit Fasern hergestellt, um das Bruch- und Nachbruchverhalten so zu steuern, dass eine ausreichende Duktilität und eine ausreichend hohe Resttragfähigkeit sichergestellt wird. Fasern erhöhen auch die Zug- und Biegezugfestigkeit. Die zentrische Zugfestigkeit von ultrahochfestem Beton mit Stahlfasern kann bis zu rd. 15 N/mm², die Biegezugfestigkeit bis zu rd. 50 N/mm² erreichen. Wie bei herkömmlichem Stahlfaserbeton kann dadurch auch bei Bauteilen, die auf Zug oder Biegezug beansprucht werden, auf herkömmliche schlaaffe Bewehrung ganz oder teilweise verzichtet werden. Die ausreichende Duktilität von Bauteilen mit UHFB im Druckbereich kann auch durch andere Maßnahmen erreicht werden, wie etwa durch eine Umschnürung mit Stahlwendeln und Stahlrohren.

Bei vorgespannten Konstruktionen ermöglicht UHFB wegen seiner hohen Druckfestigkeit wesentlich höhere Vorspannkräfte oder entsprechend kleinere Querschnitte als Normalbeton. Vorspannung ist deshalb ein probates Mittel, um besonders filigrane, besonders nachhaltige und kostengünstige Bauteile herzustellen.

Um die hohe Leistungsfähigkeit und die besonderen Stoffeigenschaften des UHFB technisch und wirtschaftlich ausnutzen zu können, müssen die Bemessung und die Konstruktion darauf abgestimmt werden. UHFB stellt zudem besondere Anforderungen an die Ausgangsstoffe, die optimale Gestaltung der Betonzusammensetzung – insbesondere der Feinststoffmatrix –, an die Präzision bei der Herstellung und Verarbeitung und erfordert eine auf den Baustoff abgestimmte, erweiterte Qualitätssicherung.

Der Sachstandsbericht gibt den derzeitigen Stand der Technik hinsichtlich der Herstellung und Anwendung von UHFB wieder und gibt zugleich technische Hinweise und Empfehlungen zur Bemessung und Konstruktion von Bauteilen und Bauwerken mit diesem neuen Baustoff, der die Möglichkeiten der Betonbauweise ganz erheblich erweitert. Ziel ist es, die Anwendung von ultrahochfestem Beton zu fördern und dadurch weitere Erfahrungen zu sammeln, die es ermöglichen, UHFB in absehbarer Zukunft in das bauaufsichtliche Regelwerk übernehmen zu können.

2 Anwendungen von ultrahochfesten Betonen (UHFB) und Bauwerke aus UHFB

2.1 Einführung und Überblick zur Entwicklung von UHFB

Sehr gefügedichter, fein- und grobkörniger ultrahochfester Beton 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 [2.8]. Anwendungsgebiete sind hoch belastete Industrieböden und Verkehrsflächen, z. B. auf Flughäfen (Densiphalt) [2.20], Sicherheitsbauwerke wie z. B. Tankanlagen, Offshore-Öl- und -Gasförderanlagen und seit einigen Jahren Fundamente für Windkraftanlagen. So war geplant, das dynamisch hoch belastete Köcherfundament der weltgrößten Offshore-Windkraftanlage in Wilhelmshaven mit dem faserhaltigen Produkt Ducorit S4 der Firma Densit herzustellen [2.33, 2.10]. Ein hoch beanspruchtes, direkt befahrenes orthotropes Brückendeck einer Stahlbrücke in den Niederlanden wurde ebenfalls mit UHFB erneuert. Der UHFB war dabei herkömmlich schlaff bewehrt mit einem sehr hohen Bewehrungsgrad [2.17].

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 $0,60 \text{ mm}$ aufweist. 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 [2.38]; dieser UHFB wird jetzt als Ceracem von Eiffage und Sika weiter entwickelt [2.25].

BPR bzw. Ductal® ist der bislang am häufigsten für Konstruktionen verwendete Feinkornbeton. Das Ziel bei der Entwicklung des BPR war es, ein möglichst homogenes Material herzustellen, bei dem die festigkeitsmindernden Bindungsprobleme in den Kontaktflächen zwischen Zementstein und groben Zuschlägen entfallen und die Mikrorissbildung weitgehend vermieden wird. Die wesentlichen Bestandteile sind Feinsand, Zement, Silikastaub und Quarzmehl sowie Stahlfasern. Das Verhältnis Wasser zu Bindemittel beträgt – wie bei allen bislang bekannten UHFB – nur ca. $0,15$ bis $0,20$, wobei im Labor auch noch geringere Werte erreicht wurden. Durch diese Zusammensetzung werden ein sehr dichtes Materialgefüge und eine äußerst geringe Porosität erreicht, wie Bild 2.1 verdeutlicht und in Abschnitt 3 weiter erläutert wird.

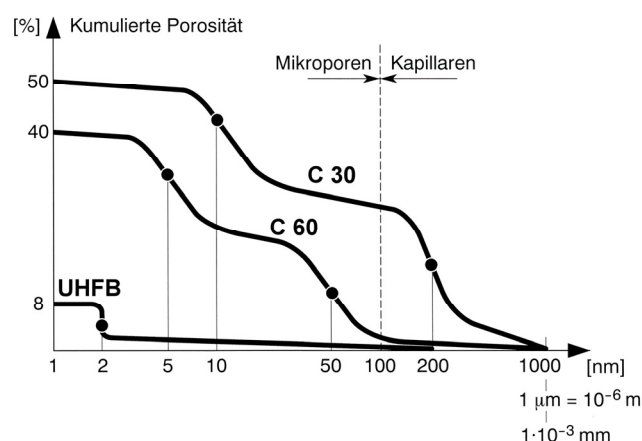


Bild 2.1 Porosität von UHFB im Vergleich zu Normalbeton [2.4]

In Abschnitt 2.5 werden Beispiele für Anwendungen von UHFB gezeigt, die die beeindruckenden Materialeigenschaften des Materials verdeutlichen. Erreicht werden Druckfestigkeiten von bis zu 200 MPa oder mehr, und mit einer Wärmebehandlung waren sogar 800 MPa möglich [2.4]. Die Zugfestigkeit liegt je nach Fasergehalt in der Größenordnung von 7 bis 12 MPa für zentrischen Zug und 30 bis 55 MPa bei Biegezug (Kleinprismen). Durch die Stahlfasern werden neben der verbesserten Zugfestigkeit auch eine hohe Duktilität

und Bruchenergien erreicht, die bis an die von Metallen heranreichen. Die heute angebotenen Produkte Ductal® und Densit weisen z. B. je nach Rezeptur und Herstellung Druckfestigkeiten von 140 bis 260 MPa und Biegezugfestigkeiten von 25 bis 60 MPa auf [2.4, 2.8, 2.22]. BSI weist nach 28 Tagen eine ähnlich hohe mittlere Druckfestigkeit von 190 MPa und eine charakteristische Zugfestigkeit von 8 MPa (bei 3 Vol.-% Fasern) auf [2.38].

Die hohe Tragfähigkeit von BPR wurde mit Versuchen an im Spannbett vorgespannten I-Trägern ohne jegliche schlaife Bewehrung demonstriert, deren Bauhöhen denen von Stahlprofilträgern gleichen, wie Bild 2.2 veranschaulicht.

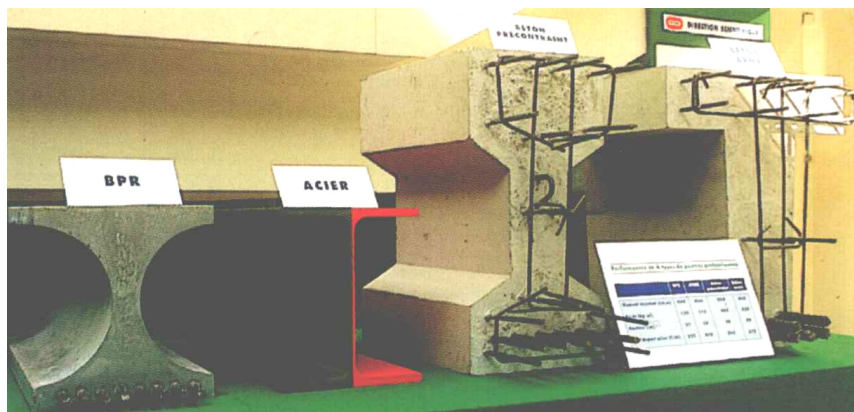


Bild 2.2: Träger aus UHFB und Stahl mit gleicher Momententragfähigkeit [2.4]

2.2 Dauerhaftigkeit von ultrahochfesten Betonen

Wegen der geringen Porosität des UHFB ist sein Widerstand gegen klimatische und chemische Einwirkungen hoch, so dass eine gute Dauerhaftigkeit und hohe Dichtigkeit erwartet werden können. Dieser Werkstoff bietet eine Alternative zu herkömmlichen Werkstoffen und Werkstoffkombinationen in verschiedensten Bereichen des Bauwesens, bei denen es auf hohe Festigkeiten, Feingliedrigkeit und/oder auf Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit ankommt (s. Abschnitte 5 und 6). Die hohe Leistungsfähigkeit und vielseitige Einsetzbarkeit dieses Materials wurden bereits an einigen Pilotprojekten demonstriert und nachfolgend wird hierüber eine Übersicht gegeben, vgl. auch [2.1].

2.3 Umweltverträglichkeit von ultrahochfesten Betonen

Tabelle 2.1: Vergleich dreier Lösungen für die Fußgängerbrücke von Sherbrooke hinsichtlich der Umweltverträglichkeit [2.4, 2.2]

	Normalbeton	Hochfester Beton	Ultrahochfester Beton
äquivalente Dicke [mm]	500	400	150
Volumen [m ³]	126	100	33
Zementgehalt [kg/m ³]	330	450	700
Zementverbrauch + CO ₂ -Emission [t]	44	48	28
Zuschlagverbrauch [t]	225	170	60

Bei der Entwicklung eines neuen Materials muss die Umweltverträglichkeit gewährleistet sein. Insgesamt hat der UHFB mit allen seinen Bestandteilen keinen gesundheitsschädlichen Einfluss auf die Umwelt, wie jeder Beton. Hinsichtlich der verwendeten Rohstoffe fällt der in UHFB verwendete Silikastaub als Nebenprodukt bei industriellen Herstellprozessen an. Andererseits weisen ultrahochfeste Faserfeinkornbetone einen höheren Zementgehalt als normal- oder hochfeste Betone auf, und die Produktion von einer Tonne Zement ergibt rd. 0,8 Tonnen CO₂, so dass das Material selbst zunächst eine höhere CO₂-Emission als herkömmliche Betone aufweist. Die hervorragenden Materialeigenschaften erlauben jedoch viel kleinere Volumina und Bauteilabmessungen als bei Normalbeton, so dass in der Gesamtbilanz der CO₂-Ausstoß beträchtlich vermindert werden kann. Die Tabelle 2.1 zeigt dies anhand von drei möglichen Lösungen für die Fußgängerbrücke von Sherbrooke. Mit UHFB war eine CO₂-Reduktion auf etwa 60 % gegenüber einer Lösung mit

Normalbeton möglich [2.4, 2.2]. Gleiche Ergebnisse lieferten die Vergleiche druckbeanspruchter Stützen und die Gegenüberstellung zweier alternativer Lösungen aus herkömmlichem Beton und aus UHFB für die Kylltalbrücke [2.34, 2.27].

In einer Diplomarbeit an der Universität Kassel wurde die zunächst vorgesehene herkömmliche Spannbetonlösung für die Gärtnerplatzbrücke in Kassel mit der verwirklichten Hybridkonstruktion mit UHFB verglichen. Dabei ergaben sich hinsichtlich Rohstoffaufwand, Energieverbrauch und Emissionen deutliche Vorteile für die Lösung mit UHFB, siehe Abschnitt 2.5.5.

2.4 Hinweise zur Wirtschaftlichkeit

Die Kosten für 1 m³ ultrahochfesten Beton bzw. BPR lagen nach Angaben von Bouygues [2.4] bei 900 € bis 1300 € gegenüber Normalbeton mit Werten zwischen 60 € und 160 € und Stahl mit ungefähr 6000 €. Derzeit kann für faserbewehrten UHFB von grob 600 €/m³ ausgegangen werden, wobei ein wesentlicher Anteil der Kosten auf die Fasern mit einem reinen Materialpreis von etwa 400 € pro m³ Beton (bei 2 Vol.-% Fasergehalt) entfällt.

Auf den ersten Blick ist ultrahochfester Beton also sehr viel teurer als Normalbeton, aber dies kann hinsichtlich der gesamten Baukosten für Tragwerke anders aussehen. Beispielsweise zeigt der in Tabelle 2.2 durchgeführte Preisvergleich zwischen den im Bild 2.2 dargestellten vier Trägern mit gleicher Momententragfähigkeit, dass UHFB durchaus konkurrenzfähig ist.

Tabelle 2.2: Preisvergleich für Träger gleicher Momententragfähigkeit [2.4]

	UHFB	Stahl	Spannbeton	bewehrter Beton
Höhe [mm]	370	350	700	700
Breite [mm]	320	300	350	600
Gewicht [kg/m Länge]	140	112	467	530
Preis [€/m Länge]	30	33	26	33

UHFB schneidet auch im direkten Vergleich von Stützen positiv ab, und Kostenreduzierungen um bis zu 80 % sind für eine UHFB-Stütze mit Vollquerschnitt gegenüber einer Stahlrohrstütze möglich. Betrachtet man eine gesamte Brücke, so sind bei materialgerechter Konstruktion erhebliche Einsparungen möglich, wie schon Tabelle 2.1 demonstrierte. Schnedler und Fehling [2.34] zeigten dies mit einer alternativen Lösung in Ultra-Hochleistungsbeton für die in Normalbeton ausgeführte Bogenkonstruktion der Kylltalbrücke in Deutschland, bei der sie eine Kostenreduktion für Bogen und Ständer von 3,39 Mio. € auf 1,82 Mio. € ermittelten.

Ein weiterer Vorteil ist, dass bei Tragwerken aus ultrahochfesten Betonen meistens keine schlaffe Bewehrung verwendet, sondern nur eine Vorspannung aufgebracht wird, so dass der teure Einbau der Bewehrung auf der Baustelle entfällt. Weiterhin können Tragwerke aus (vorgespanntem) UHFB sehr viel schlanker und leichter als solche aus Normalbeton ausgeführt werden, wie schon Bild 2.2 und Tabelle 2.2 demonstrieren. Das geringere Gewicht ermöglicht im Brückenbau elegantere Bauwerke und im Hochbau bedeutend geringere Bauhöhen. UHFB eignet sich besonders zur Herstellung von Fertigteilen und geringeres Gewicht bringt Vorteile beim Transport und bei der Montage. Bauteile aus UHFB können wegen ihrer höheren Oberflächenfestigkeit – besser als Normalbeton – u. U. konstruktiv miteinander verklebt werden. Dies bringt eine weitere Vereinfachung und Beschleunigung des Bauablaufes mit sich, wie dies z. B. bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel geschehen ist (vgl. auch Abschnitt 2.5.5).

Ein wesentlicher wirtschaftlicher Vorteil von UHFB liegt in der Dauerhaftigkeit und dem hohen Widerstand gegen aggressive Medien, vgl. Abschn. 6.11. Damit werden Instandsetzungsmaßnahmen seltener oder gar nicht mehr erforderlich [u. a. 2.4, 2.32, 2.35]. Dies sollte zu einer besonders langen Lebensdauer führen.

2.5 Beispiele für Anwendungen

2.5.1 Fußgängerbrücke von Sherbrooke, Kanada

2.5.1.1 Allgemeines

Die Fußgängerbrücke von Sherbrooke (Bild 2.3) überspannt den Fluss Magog in der Nähe seines Zusammenflusses mit dem St.-François-Fluss im Zentrum von Sherbrooke, Kanada. Die Brücke wurde im Herbst 1997 fertiggestellt und ist weltweit das erste Bauwerk aus dem ultrahochfesten Beton BPR. Neben der Ver-

wendung dieses neuen Materials weist die Fußgängerbrücke einige weitere Innovationen auf, wie Bauteile aus mit UHPC gefüllten Stahlrohren, das Fehlen von schlaffer Bewehrung und die Detailausbildung von vorgefertigten und vorgespannten Betonkonstruktionen [2.3].

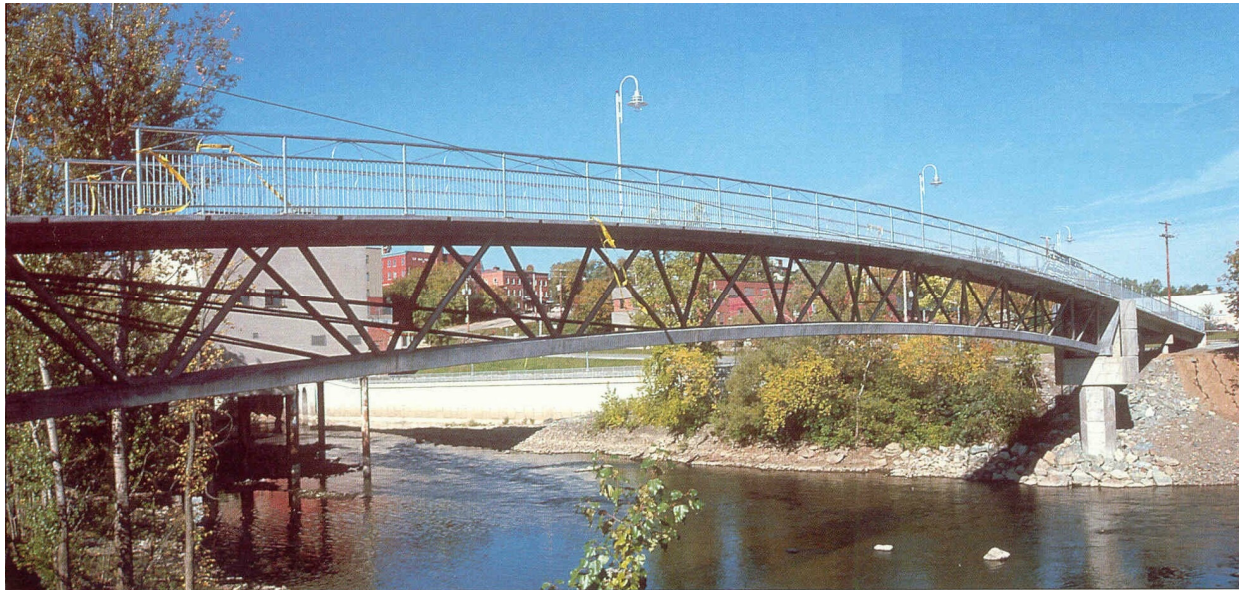


Bild 2.3: Ansicht der Fußgängerbrücke von Sherbrooke [2.3]

2.5.1.2 Aufbau und Tragverhalten

Die Brücke weist eine Gesamtlänge von 60 m auf und setzt sich aus sechs Fertigteilen à 10 m Länge zusammen. Die beiden Endsegmente haben ein Gewicht von jeweils 20 t und die Mittelsegmente jeweils 15 t. Der Krümmungsradius der Gradiente beträgt 326 m.

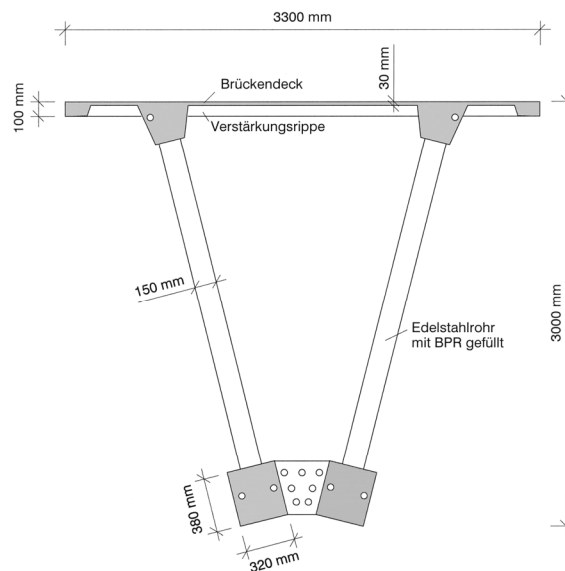


Bild 2.4: Brückenquerschnitt [2.3]

Der Brückenquerschnitt ist in Bild 2.4 dargestellt. Die 30 mm dicke und 3,3 m breite Deckenplatte aus UHFB weist zwei längslaufende Rippen auf und bildet den Obergurt. In Abständen von 1,25 m wurden Querrippen angeordnet. In den beiden Längsrippen und in den Querrippen verläuft jeweils ein Spannglied. Die Deckenplatte wurde für eine Zugspannung von 12 N/mm^2 bemessen.



Bild 2.5: Darstellung der externen Vorspannung [2.3]

Bild 2.6 zeigt die Anordnung der Längsvorspannung in Ober- und Untergurt sowie der externen Vorspannglieder. Der Untergurt besteht aus zwei durchlaufenden vorgespannten Balken (je 320 x 380 mm), die in Abständen von 5 m durch kurze Querschotte verbunden sind (Bilder 2.4 und 2.5), die der Umlenkung der externen Längsvorspannglieder dienen. Die beiden Untergurte sind intern mit je 2 Spanngliedern vorgespannt.

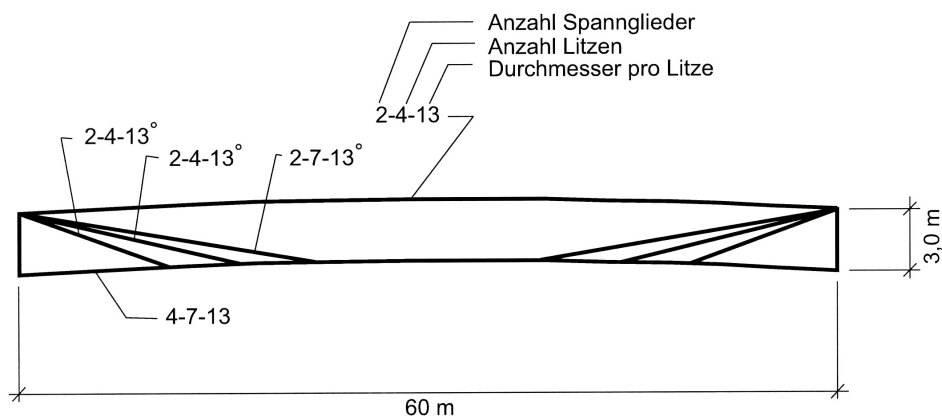
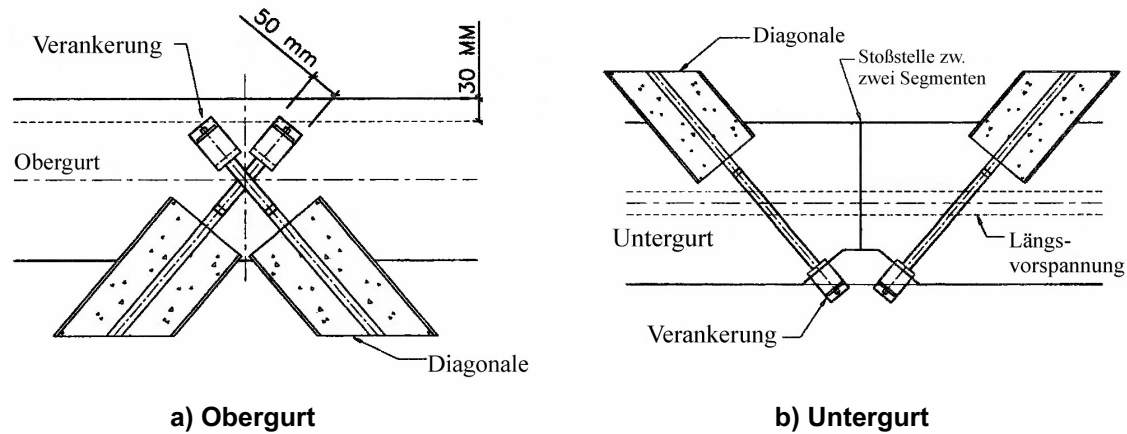


Bild 2.6: Anordnung der Längsvorspannung [2.3]

Die Diagonalen der beiden Stege bestehen aus mit ultrahochfestem Beton gefüllten Stahlrohren ($\varnothing$ 150 mm, $t = 2$ mm, $l = 3,2$ m), die sowohl in Längs- (41°) als auch in Querrichtung (14°) gegenüber der Vertikalen geneigt sind, vgl. Bild 2.4. Zwei Spannlitzen pro Diagonale sorgen für eine Druckkraft von 235,4 kN, wobei der Spannkopf direkt auf den Beton wirkt. Der Anschluss der Diagonalen an den Ober- bzw. Untergurt wurde so ausgeführt, dass sich die Spannkabel am Ober- bzw. Untergurt kreuzen (Bilder 2.7a und 2.8) und Querkraften direkt von einer Diagonalen in die nächste übertragen werden können. An den Stoßstellen der Fertigteile war ein Überkreuzen der Spannkabel nicht möglich, so dass hier die Verbindung durch die Längsvorspannung hergestellt werden musste (Bild 2.7b). Die Längsvorspannung ist in Endquerschotten verankert, die in ihrer Ebene durch zwei U-Spannglieder vorgespannt sind [2.3, 2.16].



a) Obergurt

b) Untergurt

Bild 2.7: Verbindung der Diagonalen im Ober- und Untergurt [2.3]

2.5.1.3 Fertigung im Fertigteilwerk

Die sechs Brückensegmente wurden im Fertigteilwerk gefertigt. Zuerst wurden die Diagonalen hergestellt. Dazu positionierte ein Stahlrahmen die Spannglieder im Rohr. Der Beton wurde vertikal eingefüllt und anschließend mit einer Last von 2 N/mm^2 belastet. Danach wurden die Diagonalen in die Schalung des Brückensegments gesetzt. Als nächstes wurden die Träger des Untergurts gefertigt. Um die gleichmäßige Krümmung zu erreichen, wurden Stahlschalungen benutzt. Dann wurde die Deckenplatte betoniert. Zur Nachbehandlung wurde die Oberfläche mit einem dünnen Wasserfilm und einer Plastikfolie bedeckt, um sie vor dem Austrocknen zu schützen und dem autogenen Schwinden vorzubeugen. Das Ausschalen erfolgte nach 24 Stunden, und zu diesem Zeitpunkt wies der ultrahochfeste Beton eine Druckfestigkeit von 50 N/mm^2 auf. Für das nächste Segment diente das vorherige als Konterschaltung. Anschließend härteten alle sechs Segmente 48 Stunden bei 90°C aus; sie waren dabei in eine Polyethylenfolie gehüllt und wurden mit heißem Wasserdampf besprüht. Das Bild 2.9 zeigt ein Brückensegment nach dem Ausschalen.



Bild 2.8: Anordnung der Verankerung [2.3]



Bild 2.9: Brückensegment nach dem Ausschalen [2.3]

2.5.1.4 Montage

Für die Montage der Brücke wurde zuerst eine Hilfsstütze in der Mitte des Flussbettes aufgestellt. Dann wurden ein Endsegment und zwei Mittelsegmente zu einer Brückenhälfte am Ufer zusammengesetzt und vorübergehend vorgespannt (Bild 2.10). Aufgrund der sehr leichten Konstruktion wiegt eine Hälfte der Brücke nur 50 t und konnte somit mit einem gewöhnlichen Kran eingehoben werden (Bild 2.11). Die beiden Brückenhälften wurden nacheinander auf Endauflager und Hilfsstütze gesetzt, und dann wurde die externe Vorspannung mit 3 x 2 Spanngliedern eingebaut und vorgespannt. Schließlich wurden noch Geländer und Lampen angebracht. Die Brücke konnte innerhalb von vier Tagen fertiggestellt werden [2.3].



Bild 2.10: Stoßstelle zweier Elemente in einem Brückensegment [2.3]



Bild 2.11: Einheben einer aus drei Einzelsegmenten bestehenden Brückenhälfte [2.4]

2.5.1.5 Zusammenfassung der technischen Daten

In Tabelle 2.3 sind zusammenfassend alle Daten der Fußgängerbrücke aufgeführt.

Tabelle 2.3: Technische Daten der Fußgängerbrücke in Sherbrooke [2.3, 2.4]

Abmessungen der Brücke	Länge: 60 m; Höhe: 3,00 m; Bogenradius: 326 m
Deckenplatte	Oberfläche: 202 m ² ; Breite: 3,30 m; Dicke: 30 mm
Diagonalen	Länge: 3,2 m; Rohr: Ø150 mm, t = 2 mm. Füllung aus UHFB
Betonvolumen	42 m ³
Vorspannung	20 kg/m ³
Längsvorspannung	2 x 2 Spannglieder in beiden Stäben des Untergurtes; 2 Spannglieder im Obergurt; 3 x 2 externe Spannglieder
Sonstige Vorspannung	je 2 Spannglieder in den Diagonalen je 1 Spannglied in den Querrippen der Deckenplatte je 2 U-Spannglieder in den Endquerschotten
Druckfestigkeit	200 MPa im Ober- und im Untergurt 350 MPa in den Diagonalen
Zugfestigkeit	zentrisch: 7 MPa; Biegezug: 40 MPa (Prismen)
E-Modul	50 000 MPa

2.5.2 Seonyu-Fußgängerbrücke in Seoul

Der Han River mit der Sunyudo-Insel in Seoul sollte im Rahmen des Langzeitprojektes „New Seoul, our Han River“ zusammen mit leicht erreichbaren Parks, einem Ökosystem und einer Vielzahl kultureller Veranstaltungen wieder ins kulturelle und soziale Leben der Stadt integriert werden. Der Zugang zur Sunyudo-Insel und zum Park erfolgt über die Seonyu-Fußgängerbrücke oder Footbridge of Peace, die im März 2002 fertiggestellt wurde.

Die Brücke entstand in Zusammenarbeit mit den Firmen Bouygues und Lafarge, und für den Bogen wurde der ultrahochfeste Faserfeinkornbeton Ductal® verwendet. Der Bogen weist eine Spannweite von 130 m bei einer Querschnittshöhe von 1,30 m auf, und die 4,30 m breite Gehwegplatte ist nur 30 mm dick. Der Bogen wurde aus 6 vorgefertigten Teilen zusammengesetzt; dazu wurden 5 Hilfsstützen im Fluss aufgestellt. Das Bild 2.12 zeigt ein Foto kurz vor der Fertigstellung.



Bild 2.12: Ansicht der fertigen Seonyu-Fußgängerbrücke [2.22]

Der Querschnitt der Brücke ist in Bild 2.13 dargestellt. Da eine solch schlanke und leichte Brücke bauartbedingt schwingt, wurde das rechts im Bild 2.13 b dargestellte Schock-Absorber-System vorgesehen.

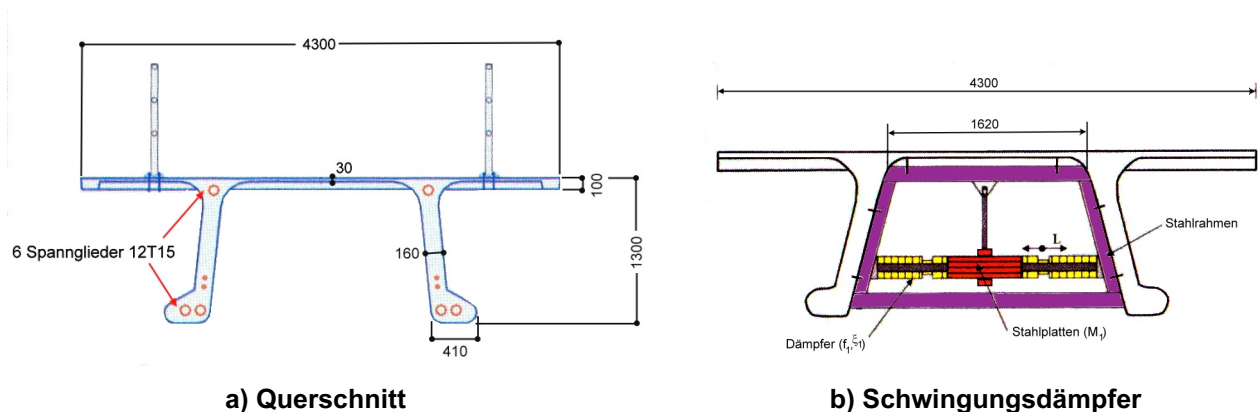


Bild 2.13: Querschnitte des Bogens [2.29]

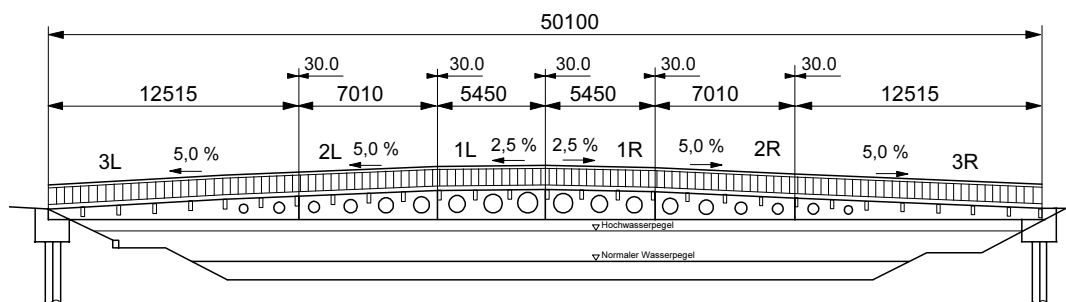
2.5.3 Sakata-Mirai-Fußgängerbrücke in Sakata

Die Sakata-Mirai-Fußgängerbrücke über den Niita Fluss in Sakata wurde im September 2002 fertiggestellt und ist die erste Brücke aus UHFB in Japan [2.37]. Sie wurde aus Ductal® hergestellt und weist eine Spannweite von 50 m und eine Breite von 2,4 m auf. Sie besteht im Wesentlichen aus einem aus Fertigteilen zusammengesetzten vorgespannten Hohlkasten mit gelochten Stegen (Bild 2.14). Somit war es möglich, das Eigengewicht auf ein Fünftel dessen einer herkömmlichen Spannbetonbrücke zu vermindern.

a) Ansicht



b) Abmessungen



c) Brückenquerschnitte

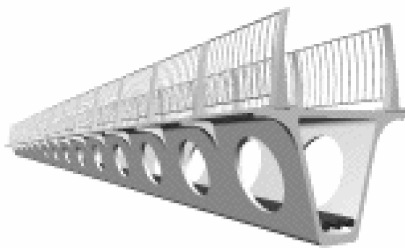
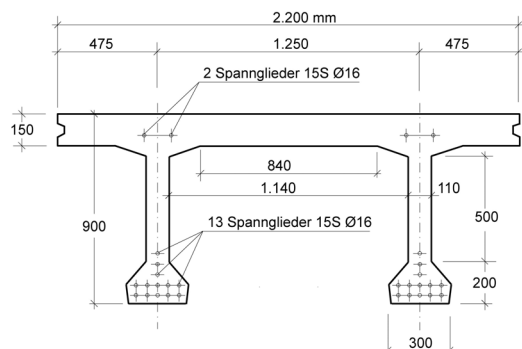


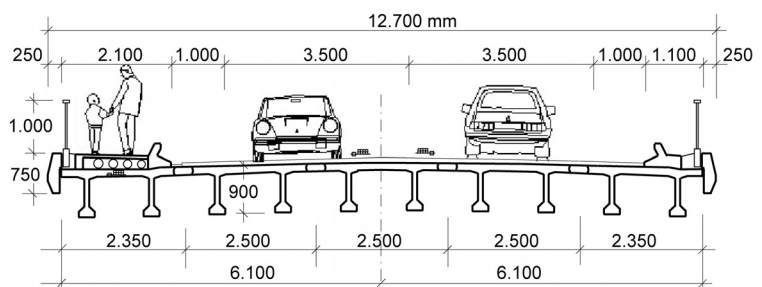
Bild 2.14: Sakata-Mirai-Fußgängerbrücke [2.37, 2.30]

2.5.4 Die ersten französischen Straßenbrücken aus UHFB

In einem Forschungsprojekt unter Leitung des Transportministeriums wurden in Frankreich zwei Straßenbrücken aus BSI in Bourg-Lès-Valence errichtet [2.38, 2.15]. Das Bild 2.15 zeigt den Querschnitt für beide Brücken.



a) Querschnitt



b) Abmessungen der π -Platten

Bild 2.15: Straßenbrücken aus UHFB in Bourg-Lès-Valence, Frankreich [2.38, 2.15]

Die Spannweiten dieser Brücken betragen 20,5 m bzw. 22 m. In Querrichtung sind die Brücken aus 5 vorgefertigten π -Platten zusammengesetzt (Bild 2.15 b). Die Stärke der Fahrbahnplatte des Fertigteils beträgt nur 0,15 m (Bild 2.15 a); verschmiert man die Querschnittsfläche über die gesamte Breite, dann entspricht dies einer Dicke von 0,25 m, wohingegen bei einem hochfesten Beton eine Dicke von 0,37 m und bei einem Normalbeton sogar 0,75 m nötig wären. Unter Verwendung von 3 Vol.-% Fasern und Spanngliedern konnte weitestgehend auf schlaife Bewehrung verzichtet werden; sie wurde nur in den Fugen zwischen den Fertigteilen und zum Anschluss des Gehwegs verwendet. Im Vergleich zu einer Konstruktion aus Normalbeton, bei der eine Bewehrungsmenge von 39 Tonnen nötig wäre, benötigt die BSI-Lösung nur 4 Tonnen Stabstahl bzw. Matten bei 28 Tonnen Fasern. Bei den Spanngliedern war eine Reduktion von 17,4 auf 6 Tonnen möglich. Das Gewicht des Brückendecks beträgt nur 328 t anstatt 975 t einer Brücke aus Normalbeton [2.38].

2.5.5 Die Kasseler „Brückenfamilie“ aus UHFB

Die erste deutsche Brücke aus ultrahochfestem Beton wurde im Jahr 2004 in Niestetal bei Kassel gebaut. Inzwischen folgten ihr fünf weitere, zwischen 9 und 18 m lange monolithische Einfeldbrücken aus feinkörnigem vorgespanntem UHFB. Die Brücken sind für Fußgänger und Fahrzeuge bis 2,8 t zulässigem Gesamtgewicht ausgelegt. [2.41]. Die Brücke selbst und ihren einfachen Querschnitt zeigt Bild 2.16. Das nur rund 100 mm dicke, in Längsrichtung vorgespannte Brückendeck mit seitlichen u-förmigen Aufkantungen wurde in einem Stück im Fertigteilwerk hergestellt, zur Baustelle transportiert und dort mit einem Kran auf die zuvor vor Ort fertig gestellten Widerlager versetzt. Der an der Universität Kassel entwickelte wärmebehandelte Beton wies eine charakteristische Druckfestigkeit von 165 MPa auf. Er wurde mit einer an die Beanspruchung angepassten, niedrigen Menge von weniger als 1 Vol.-% Stahlfasern hergestellt. Inzwischen (2008) existieren ähnliche Brücken auch in Weinheim bei Heidelberg und in Friedberg.

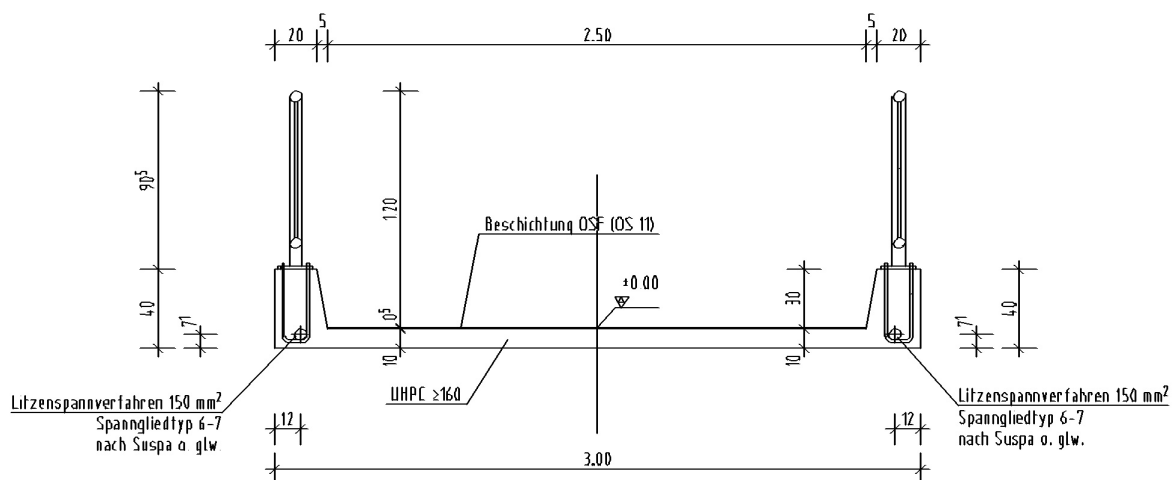


Bild 2.16: Erste deutsche Brücke aus vorgespanntem UHFB in Niestetal bei Kassel [2.31]

Im Jahr 2007 wurde dann in Kassel unter maßgeblicher Beteiligung der Universität Kassel eine rund 132 m lange, 5-feldrige Stahlbeton-Verbundbrücke als Ersatz für eine Holzbrücke fertig gestellt. Sie besteht aus

einem dreidimensionalen Raumfachwerk aus Stahlrohren, an die die ebenfalls vorgefertigten, längs vorgespannten, „spaghetti-ähnlich“ filigranen Obergurten aus UHFB mit hochfesten Schrauben angeschraubt sind. Die Längsträger haben bei einer Länge von 12 bis 36 m einen Querschnitt von lediglich 30 x 40 cm. Die längste überspannte Pfeileröffnung der von Fußgängern, Radfahrern und Versorgungsfahrzeugen bis zu 6 t benutzten Brücke beträgt rund 36 m. Die Brücke ist in Bild 2.17, ihr Querschnitt in Bild 2.18 dargestellt. Die Bilder 2.19 und 2.20 zeigen das Mittelteil vor der Montage und mit den aufgelegten Fahrbahnplatten. Die beiden 36 m langen Obergurte aus vorgespanntem UHFB wurden – wie in Bild 2.21 dargestellt ist – zunächst eben betoniert und dann bei der Montage gebogen, so an das gekrümmte Fachwerk angepasst und angeschraubt. In Bild 2.22 sind die Schraubverbindungen zu erkennen. Die 5 m x 2,20 m großen Deckenplatten aus wärmebehandeltem UHFB sind in Brückenquerrichtung mit Litzen vorgespannt. Die Längsvorspannung der gesamten Brücke übernehmen Spannglieder ohne Verbund, die in den beiden Obergurten verlaufen. Die nur etwa 8-12 cm dicken Fertigteilplatten der Fahrbahn wurden erstmals in der Welt untereinander und mit den Obergurten ohne zusätzliche mechanische Verbindung mit einem Epoxidharzmörtel kraftübertragend verklebt. Die Klebefuge während des Klebevorganges zeigt Bild 2.23. Über die Fugen wird die Vorspannkraft von maximal 2 N/mm^2 übertragen [2.11, 2.36, 2.23, 2.41, 2.42, 2.43].



Bild 2.17: Gärtnerplatzbrücke über die Fulda 2007

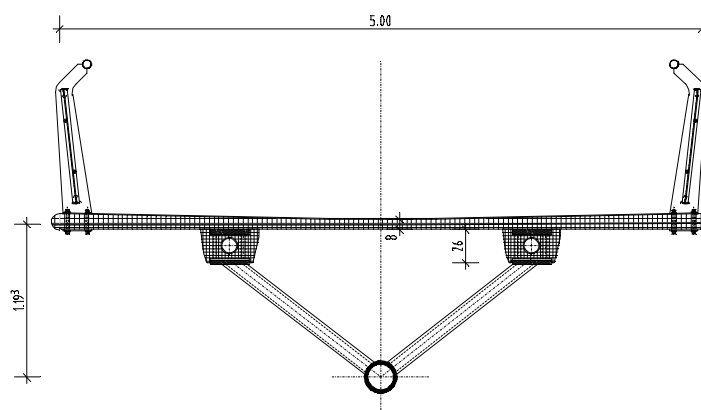


Bild 2.18: Regelquerschnitt der Gärtnerplatzbrücke: Raumfachwerk aus Stahlrohren mit angeschraubten Obergurten und darauf verklebten Deckenplatten aus UHFB, in Längs- und Querrichtung vorgespannt (Abmessungen in cm bzw. m), [2.11]

Für die Brücke wurde eine Zustimmung im Einzelfall eingeholt. Die dazu erforderlichen stofflichen, konstruktiven und statischen Nachweise sind in [2.12] ausführlich beschrieben. Verwendet wurde ein leicht verarbeitbarer UHFB, der aus regional verfügbaren Ausgangsstoffen bestand und weitgehend der in Kassel entwickelten Rezeptur M1Q entsprach, die in Tabelle 3.5 angegeben ist. Die Herstellung der bei 90°C wärmebehandelten Fertigteile ist in Abschnitt 4 beschrieben.



Bild 2.19: Vorgefertigtes 36 m langes Mittelteil der Brücke mit angeschraubten, nachträglich gebogenen Obergurten aus vorgespanntem UHFB



Bild 2.20: Mittelteil der Brücke (Flussöffnung) mit aufgelegten Fahrbahnplatten



Bild 2.21: Fahrbahnplatten (links) und vorgespannte Obergurte nach der Herstellung im Fertigteilwerk (Firma ELO Beton)



Bild 2.22: Stahlfachwerk, Schraubverbindungen zum Obergurt



Bild 2.23: Klebefuge zwischen Obergurt und Fahrbahnplatten während des Verklebens

Die Verwendung von UHFB im Verbund mit Stahl als hybride Konstruktion hatte in diesem Fall den zusätzlichen wirtschaftlichen Vorteil, dass die Konstruktion so filigran und damit so leicht ist, dass die aufwendig gegründeten Pfeiler der alten Holzbrücke weiter verwendet werden konnten. Das Tragwerk der Gärtnerplatzbrücke hätte auch einschließlich des Raumfachwerkes vollständig aus vorgespanntem UHFB konstruiert werden können, wie die in Bild 2.24 gezeigte, von der Firma Bögel hergestellte, rund 6 m lange Modellbrücke im Maßstab 1:2 demonstriert.



Bild 2.24: Modellbrücke der Firma Bögel mit Raumfachwerk aus vorgespannten UHFB-Stäben [2.31]

Die Nachkalkulation der Gärtnierplatzbrücke ergab, dass sie nicht teurer war als eine herkömmliche Spannbetonkonstruktion, und dass deutliche Kostenvorteile gegenüber einer Stahlbrücke erzielt wurden. Hinzu kommt der geringere Unterhaltungsaufwand für den UHFB. Das Bauwerk ist auch aus einem anderen Grund besonders nachhaltig: Der Aufwand an Primärenergie, Rohstoffen und der in Bild 2.25 dargestellte, so genannte „Green House Effect“ – d. h., der belastende Einfluss auf die Atmosphäre – sind bei der gewählten Konstruktion bereits signifikant geringer als bei einer Spannbetonbrücke. Noch deutlicher auf nur noch rund die Hälfte der Spannbetonlösung lassen sich die ökologischen Parameter verringern, wenn die Konstruktion ganz aus UHPC hergestellt wird [2.49].

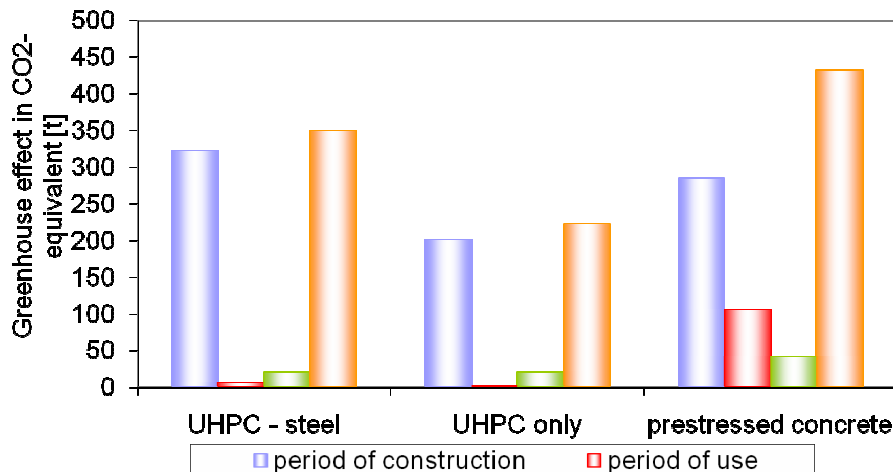


Bild 2.25: Belastung der Atmosphäre durch unterschiedliche Bauweisen für die Gärtnierplatzbrücke: UHFB mit Stahlfachwerk (links), UHPC mit UHFB-Fachwerk (mitte, siehe Bild 2.24) und Spannbeton (rechts). Rechte Balken zeigen jeweils die Gesamtbelastung während der Lebensdauer [2.49]

2.5.6 Träger im Kernkraftwerk Cattenom

Im Kernkraftwerk Cattenom wurde der ultrahochfeste Faserfeinkornbeton BPR für die Instandsetzung eines Kühlturms (Bild 2.20) eingesetzt. Das Innere dieses Kühlturms besteht aus einem Trägerrost von Balken und Trägern (Bild 2.21), die geneigte Platten stützen, über die das aggressive Wasser abläuft. Es herrscht ein sehr raues Klima, und das Tragwerk wird sowohl thermisch (Frost-Tau) als auch chemisch/mechanisch durch das Wasser beansprucht. Für die Renovierung der Kühltürme wurden die alten verwitterten Träger (2376 Stück) und Balken (270 Stück) durch neue aus UHFB ersetzt, wobei 823 m³ verbaut wurden. Die Balken sind radial angeordnet, und jeder hat eine Länge von 14 m und ist mit 10 Litzen vorgespannt. Auf jedem dieser Balken liegen 9 Träger mit einer Länge von 6,0 bis 6,9 m, die jeweils mit 2 Litzen vorgespannt sind. Es wurde keine schlaffe Bewehrung verwendet. Nach dem Vorspannen wurden die Balken und Träger 48 Stunden bei 90 °C nachbehandelt und erreichten eine Druckfestigkeit von 220 N/mm².

Dies ist ein sehr gutes Beispiel sowohl für die Dauerhaftigkeit als auch für die Leichtigkeit dieses Materials, denn die neuen Träger sind 3-mal leichter als die ursprünglichen [2.6, 2.4].

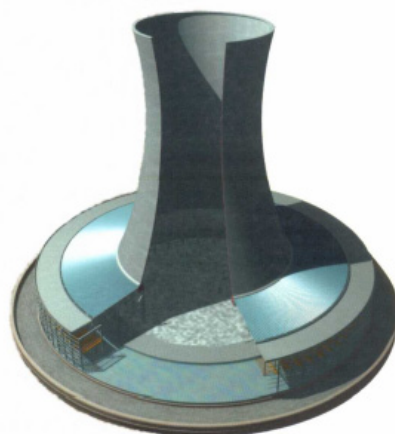


Bild 2.20: Ansicht des Kühlturms im Kernkraftwerk Cattenom [2.4]

Ankommende Luft ruft Eisbildung hervor. UHFB ist unempfindlich gegenüber Frost und Tau.

Jeder Kühlturm hat 90 radial angelegte Balken, auf denen insgesamt 800 Träger aufgelegt sind.

Die Träger aus UHFB sind dreimal leichter als die alten, d. h., die Fundamente mussten nicht geändert werden.

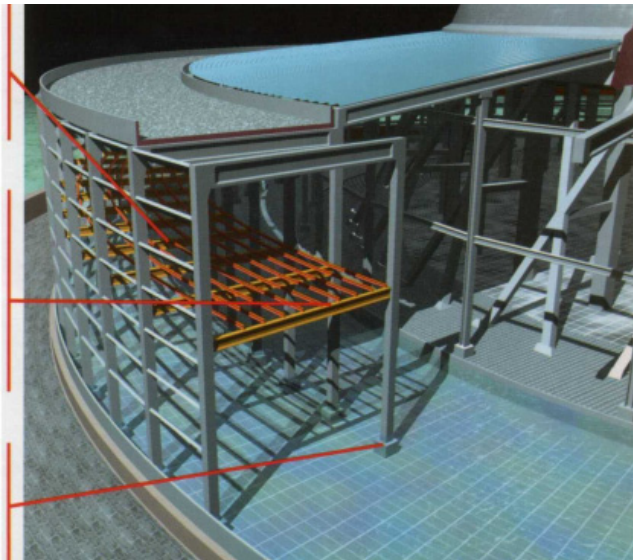
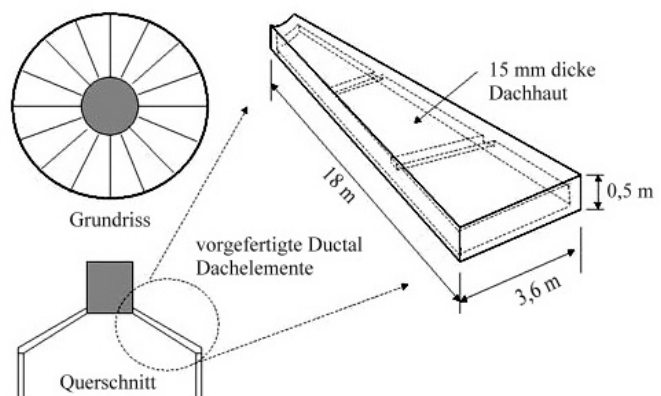


Bild 2.21: Ansicht des Trägerrosts aus BPR im Kühlturm des Kraftwerks Cattenom [2.4]

2.5.7 Weitere Beispiele

2.5.7.1 Ausnutzung von Festigkeit und Duktilität

Eine erste und besonders dünne Anwendung von UHFB für **Flächentragwerke** ist die Überdachung des Klinkersilos im Lafarge-Werk in Joppa, USA (Bild 2.22). Das Dach besteht aus Fertigteilen mit einer nur 15 mm dünnen Dachhaut und bis zu 0,5 m hohen Rippen.



a) Foto von der Montage des Dachs

b) Systemskizze und Abmessungen der Dachelemente

Bild 2.22: Überdachung eines Klinkersilos in Joppa, USA [nach: 2.22]

Das schon bei der Fußgängerbrücke von Sherbrooke angewandte Prinzip der Kombination aus Stahl und Beton bietet bei **Verbundstützen** im Geschosswohnungsbau die Möglichkeit, die hohen Druckfestigkeiten auszunutzen. Die schlankeren Stützen haben den Vorteil des duktileren Verhaltens bei Erdbeben, und gleichzeitig kann mehr Wohnfläche genutzt werden [2.7, 2.34, 2.39].

Ebenso schlanke und hochtragfähige Druckglieder mit robustem und duktilem Bauteilverhalten sind durch die Kombination von ultrahochfestem Stahlfaserbeton (UHSFB), verstärkter Bügelbewehrung und hochfester Längsbewehrung möglich [2.44].

Ein besonders zukunftssträchtiges Anwendungsgebiet dürfte der Hochhausbau sein. Selbst mit hochfestem Beton (HFB) können derzeit noch nicht die Bauwerkshöhen erreicht werden, die mit Stahl möglich sind. Die tragenden Querschnitte würden unwirtschaftlich groß, und das immer noch vorhandene Kriechen von HFB schränkt die Bauwerkshöhe zusätzlich ein. Mit UHFB dürften Bauwerke aus Beton möglich werden, deren Höhe diejenigen der heute höchsten Bauwerke der Welt erreichen, die allesamt aus Stahlkonstruktionen bestehen.

Vorgespannte bzw. Verbundbalken können in UHFB ebenfalls sehr schlank ausgebildet und sowohl für Brücken als auch Gebäude eingesetzt werden, wobei ggf. noch Brandschutzmaßnahmen getroffen werden müssen.

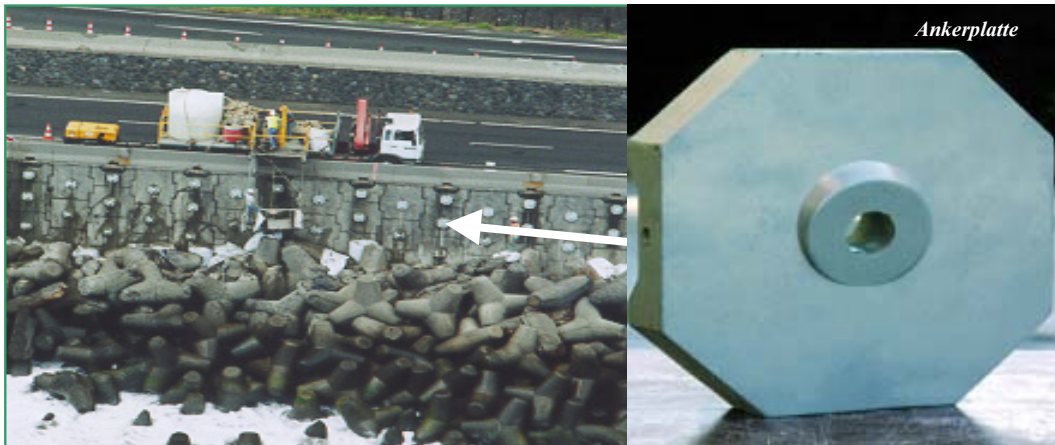


Bild 2.23: Küstenstraße Ile de Réunion, Frankreich [2.22]

In **Krafteinleitungsbereichen**, wie z. B. Spanngliedverankerungen und Ankerplatten, bietet sich der Einsatz von UHFB an, weil dabei kleinere Bauteilabmessungen möglich sind und die Dauerhaftigkeit verbessert wird, wie z. B. die im Bild 2.23 erläuterten Ankerplatten für Uferbefestigungen beweisen [2.22, 2.18].

Auch für **sicherheitsrelevante Tragwerke** wie Tresorräume oder Schutzbarrieren gegen Explosionen ist der Einsatz von faserbewehrtem UHFB wie Ductal® oder Densit bereits seit langem üblich [2.8].

Für die **Sanierung** gerissener Hallenböden aus Beton oder von Brückendecks wird ein System angeboten, bei dem auf die vorhandene Betonplatte eine nur 3 bis 5 cm dicke, schlaff bewehrte Platte aus UHFB mit hohem Bewehrungsgrad im Verbund aufgebracht wird [2.17]

2.5.7.2 Einsatz bei hohen Anforderungen an Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit

Außer den durch die hohen Festigkeiten bedingten Vorteilen bei der Lastabtragung bietet ultrahochfester Beton besonders Vorteile bei Tragwerken mit besonders intensiven chemischen oder mechanischen (Abrieb) Beanspruchungen. Ein hervorragendes Beispiel hierfür sind die im Bild 2.23 gezeigten **Wellenbrecher** und die **Ankerplatten** der Uferbefestigungen an der Küstenstraße der Ile de Réunion, Frankreich.

Ultrahochfester Beton eignet sich aus diesen Gründen auch sehr gut für **Beschichtungen**, und in Norwegen wird er zunehmend für Ausbesserungen an Straßenbrücken verwendet [2.24]. Ein Beispiel hierfür ist die Flostad-Brücke in Aust-Agder, Norwegen (Bild 2.24). Sie wird wie viele andere Brücken in Norwegen zusätzlich zu Eis, Schnee und Salz auch noch durch Spikesreifen belastet. Deshalb wurde ihre Deckschicht in UHFB erneuert.



Bild 2.24: Flostad-Brücke in Norwegen [2.24]

Geplant ist, die derzeit in korrosionsanfälligen Stahl ausgeführten Tore des Gezeitensperrowkes an der Osterschelde in Holland durch eine Konstruktion aus UHFB zu ersetzen [2.40].

Durch die außerordentlich hohe Dichtigkeit ist UHFB besonders geeignet für Container mit gefährlichen Lagergütern bzw. Abfälle oder für Sicherheitsbarrieren im Reaktorbau. Selbstverständlich bietet sich für UHFB auch der Einsatz für Wasser- bzw. Flüssigkeitsspeicher an [2.26], vgl. auch Bild 2.29.

In den USA und in Deutschland werden intensive Forschungen und Entwicklungen zum Bau von Rohrleitungen und Masten betrieben. Im Rohrleitungsbau werden vor allem die verbesserten Dauerhaftigkeitseigenschaften (wasserdicht, Widerstand gegen aggressive Medien) genutzt. Gleichzeitig können Rohre und Maste aus UHFB viel dünner ausgebildet werden als bei Normalbeton, so dass sie leichter sind, und die Handhabung und der Transport einfacher werden [2.19, 2.18].

2.5.7.3 Anwendungen von UHFB bei hohen architektonischen Anforderungen

Ultrahochfester Beton kann im Bauwesen außer wegen der hohen Festigkeiten auch wegen seiner optischen Vorzüge und der Dauerhaftigkeit eingesetzt werden. Dabei werden meistens die Stahlfasern durch Kunststoff-Fasern ersetzt, um unschöne Korrosionserscheinungen an der Oberfläche zu vermeiden.

So wurden die **Lärmschutzpaneele** des unterirdischen Bahnhofs von Monaco aus dem UHFB Ductal[®] gefertigt (Bild 2.25), weil sie einerseits den Lärmpegel im Tunnel herabsetzen und andererseits den alltäglichen Beanspruchungen bis hin zu z. B. Vandalismus standhalten. Die Paneele sind nicht brennbar und dank ihrer geringen Dicke flächensparend und einfach zu montieren; Alternativen aus Holz, Wandfliesen oder Kunststoffen wären hier weniger geeignet gewesen [2.21].



Bild 2.25: Lärmschutzwände im Hauptbahnhof von Monaco [2.22]

Eine ähnliche Anwendung sind **Fassadenplatten** und Bild 2.26 zeigt als ein Beispiel hierfür die Fassade des Sitzes der Firma Rhodia Chimie in Paris. An dem Gebäude wurden 900 m² Fassadenplatten eingebaut. Für Büro und Wohngebäude sind darüber hinaus noch **Deckenleisten**, **Simse**, **Geländer**, etc. aus UHFB denkbar. In Tuscon, Arizona wurde weißer UHFB mit organischen Fasern für **Bushaltestellen** verwendet (Bild 2.27).



Bild 2.26: Fassadenplatten am Sitz von Rhodia Chimie, Paris [2.22]

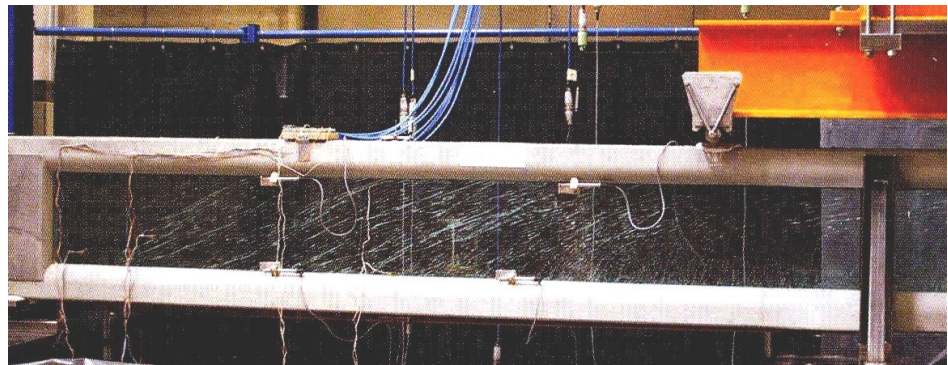
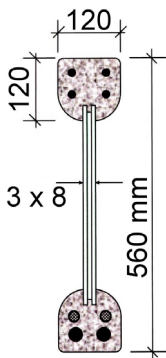


Bild 2.27: Bushaltestelle aus Ductal® [2.22]

2.6 Aktuelle Forschungsprojekte in Deutschland und Österreich zur Erschließung weiterer Einsatzgebiete für UHFB

In einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (SPP 1182, Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton) untersuchen rd. 20 Forschungsstellen das stoffliche Verhalten und die konstruktive Anwendung von UHFB. Über das Schwerpunktprogramm und die ersten Ergebnisse wird im Abschnitt 8 berichtet.

An der TU Graz wurden Versuche an **Glas-Beton-Verbundbalken** durchgeführt (Bild 2.28). Hierbei waren der Ober- und Untergurt aus UHFB (Ductal®) und der Steg aus Glas.



a) Querschnitt eines 8,1 m langen Balkens

b) Charakteristisches Rissbild zwischen Erstriss und Versagen

Bild 2.28: Glas-Beton-(UHFB-)Verbundbalken [2.13]

Mit dieser Verbundbauweise soll Glas neben der raumabschließenden und gestalterischen Funktion auch als aussteifendes und tragendes Bauelement eingesetzt werden. Der UHFB nimmt selbst eine tragende Funktion wahr und dient gleichzeitig als Absicherung für die Gesamtkonstruktion. Glas alleine würde aufgrund seines recht spröden Versagens höhere Sicherheitsbeiwerte und aufwändige Nachweise zur Resttragfähigkeit nötig machen. Besondere Aufmerksamkeit verdient bei diesen Verbundkonstruktionen die Erforschung einer möglichst starren, kraftschlüssigen Verbindung von Glas und Beton entlang des Randes einer Glasscheibe. Zudem ist mit dieser Konstruktion eine Vorspannung auch der Glasscheibe mit herkömmlichen Spanngliedern möglich.

An der Universität Leipzig werden zusammen mit der Bilfinger Berger AG **Verbundkonstruktionen** mit ultrahochfestem Beton ohne Fasern für den Brücken- und Hochbau untersucht. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Vorteile der einzelnen Materialien zu nutzen und die formgebenden Elemente (Schalung) in das Tragwerk zu integrieren [2.18, 2.39]. Dabei soll auf aufwändige und kostenintensive Verbundmittel zwischen den Verbundpartnern verzichtet werden. Ein zentrales Tragwerkelement stellt dabei das mit UHFB gefüllte Stahlrohr dar, das bereits früher von Grauers [2.14] untersucht und am Karl-Heine-Bogen in Leipzig eingesetzt wurde – dort jedoch noch mit hochfestem Leichtbeton anstelle von UHFB. UHFB-Druckglieder werden in [2.49] beschrieben.

An der Universität Stuttgart werden Untersuchungen zur Anwendung von UHFB wie Ductal® für **Langzeitwärmespeicher** im Rahmen einer solaren Nahwärmeversorgung durchgeführt, und Bild 2.29 zeigt den Entwurf eines Typenspeichers mit einem Volumen von 1000 m³. Die mit auf den Dächern der Häuser eines Wohngebietes installierten Solarkollektoren gewonnene Wärme wird in einem Heißwasser-Wärmespeicher saisonal gespeichert und bei Bedarf im Winter abgezogen. Ein Wärmespeicher aus UHFB kommt aufgrund dessen hoher Dichtigkeit ohne eine Innenauskleidung aus Edelstahl aus, und das Schalentragswerk kann mit sehr dünnen Wandstärken entworfen werden [2.28, 2.45].

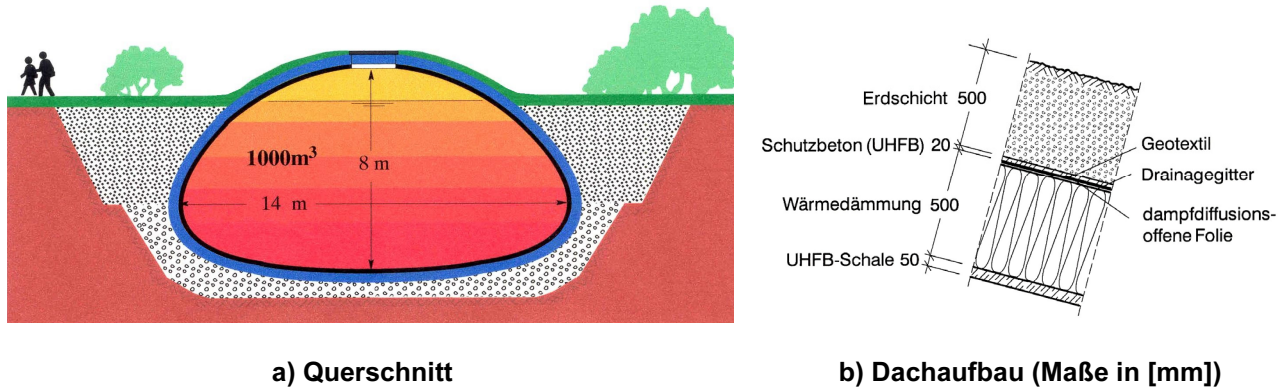


Bild 2.29: Heißwasser-Wärmespeicher aus UHFB als saisonale Wärmespeicher für solare Nahwärmeversorgung [2.28]

Detaillierte Untersuchungen zur Dichtheit und Dauerhaftigkeit von hochfestem Beton und UHFB sind in [2.46] veröffentlicht. Des Weiteren wurden allgemein dünne Bauteile aus UHFB, insbesondere auch weitere Schalentragswerke mittels nichtlinearer FE-Simulation und Fließlinientheorie untersucht und ein Bemessungskonzept erarbeitet [2.47, 2.48].

2.7 Literatur zum Abschnitt 2

- [2.1] Acker, P.; Behloul, M. (2004): Ductal® technology: a large spectrum of properties, a wide range of applications. 11-23 in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslüke (Hrsg.): Proc. Int. Symp. on UHPC, Kassel, Sept. 13-15, 2004. Heft 3, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, kassel university press, 2004
- [2.2] Aitcin, P.C.; Richard, P. (1996): The pedestrian/bikeway bridge of Sherbrooke/La passerelle cyclo – pédestre de Sherbrooke, 1399-1406 in: 4th International Symposium on Utilization of High – Strength/High – Performance Concrete, Band 3, Paris, 1996
- [2.3] Blais, P.Y.; Couture, M. (1999): Precast, Prestressed Pedestrian Bridge – World's First Reactive Powder Concrete Structure. PCI Journal, Vol. 44, pp. 60-71, Sept/Oct. 1999
- [2.4] Bouygues (1998): Les Bétons de Poudres Réactives, Firmenbroschüre, 1998
- [2.5] Bouygues, Lafarge, Rhodia (2000): Ductal®, more than a new material – it is a solution for the construction chain!, Firmenbroschüre, 2000
- [2.6] Cheyrezy, M. (1997): Structural applications of RPC in: IABSE/FIP International Conference „New Technologies in Structural Engineering“, Lisbon, Portugal, July 2-5, 1997
- [2.7] Cheyrezy, M.; Adeline, R.; Behloul, M. (1997): Ultra-high-strength concrete for high-rise building columns, pp. 237-243 in: Multi-purpose high-rise towers and tall buildings; Proceedings of the third International Conference „Conquest of Vertical Space in the 21st Century“, London, October 7-10, 1997
- [2.8] Densit (2004): www.densit.dk, Produktinformationen, download 1.7.2004.
- [2.9] Dowd, W.M.; O'Neil, E.F. (1996): Development of Reactive Powder Concrete (RPC), Precast products for the USA market/Development des Bétons de Poudres Réactives (BPR), Préfabrication aux USA, pp. 1392-1398 in: 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Vol. 3, Paris, 1996
- [2.10] Etterdal, B.; Askheim, D.; Grigorian, H.; Gladsoe, R. (2001): Strengthening of Offshore Steel Components Using High-Strength Grout: Component Testing and Analytical Method. Proc. Offshore Technology Conference, Houston, Texas 2001.

- [2.11] Fehling, E.; Bunje, K.; Schmidt, M.; Schreiber, W. (2004 a): Ultra High Performance Composite Bridge across the River Fulda in Kassel – Conceptual Design, Design Calculations and Invitation to Tender. 69-75 in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslüke (Hrsg.): Proc. Int. Symp. on UHPC, Kassel, Sept. 13-15, 2004. Heft 3, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, kassel university press, 2004
- [2.12] Fehling, E.; Schmidt, M.; Tue, N.V.; Bunje, K.; Teichmann, T. (2004b): Ultra High Performance Composit Bridge across the Fulda in Kassel – Accompanying Investigations as Basis for the required Agreement of the Authorities. 819-825 in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslüke (Hrsg.): Proc. Int. Symp. on UHPC, Kassel, Sept. 13-15, 2004. Heft 3, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, kassel university press, 2004
- [2.13] Freytag, B. (2002): Glas-Beton-Verbund; Eine Anwendung von Ductal® (UHPC) in der modernen Architektur, BetonZement, Sonderheft 2002: Kolloquium Zement + Beton, 30-33
- [2.14] Grauers, M. (1996): Composite Columns – an Experimental Study of the Influence of the Concrete Strength. Chalmers Techniska Högskola, Konstruktionsteknik – Betongbyggnad. Report 96:3 bis 96:5. Göteborg 1996.
- [2.15] Hajar, Z.; Lecointre, D.; Simon, A.; Petitjean, J. (2004): Design and Construction of the world first Ultra-High Performance Concrete road bridges. 39-48 in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslüke (Hrsg.): Proc. Int. Symp. on UHPC, Kassel, Sept. 13-15, 2004. Heft 3, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, kassel university press, 2004
- [2.16] Huber, J. (1998): Eine Fußgängerbrücke aus Reactive Powder Concrete. Bauingenieur 73 (1998), Nr. 7/8 Juli/August, 356-357
- [2.17] Kaptijn, N.; Blom, J. (2004): A new bridge deck for the Kaag bridges: The first CRC (Compact reinforced Composite) application in civil infrastructure. pp. 49-59 in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslüke (Hrsg.): Proc. Int. Symp. on UHPC, Kassel, Sept. 13-15, 2004. Heft 3, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, kassel university press, 2004
- [2.18] König, G.; Tue, N.V.; Zink, M. (2001): Hochleistungsbeton – Bemessung, Herstellung und Anwendung, Ernst & Sohn, 2001
- [2.19] König, G.; Schneider, H.; Dehn, F.; Schmidt, D.; Wagner, J.-P. (2003): Verbundkonstruktionen mit ultrahochfestem Beton für den Brücken- und Hochbau, Beton- und Stahlbetonbau 98 (2003); H. 4, S. 240-246
- [2.20] Koorsgaard, H. C.; Andersen, J.; Sundahl, J. (1998): Densiphalt for Aprons and other heavy loaded pavements. Proc. 3rd Int. Conference on Road and Airfield Pavement Technology, Beijing, China April 1998.
- [2.21] Lafarge (2001): Ductal®, mehr als ein neuer Baustoff – ein Durchbruch in der Werkstofftechnologie. Firmenbroschüre, Juni 2001
- [2.22] Lafarge (2003): Produktinformation zu Ductal® durch Firma Lafarge; Download am 10.02.2003 und 28.04.2003 von www.imagineductal.com
- [2.23] Lehmkuhl, H. (2003): Erneuerung der Gärtnerplatzbrücke in UHPC – Randbedingungen und Aufgaben des Baulastträgers. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universität Kassel, H. 2 (2003).
- [2.24] Loland, K.E. (1999): Protective Application of High Performance and Ultra High Performance Concrete, pp. 1439-1449 in: 5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Volume 2, Sandefjord, Norway, 20-24 June, 1999
- [2.25] Maeder, U.; Lallement-Gamboia, I.; Chaignon, J.; Lombard, J.-P. (2004): Ceracem, a new high performance concrete: characterisations and applications. 59-68 in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslüke (Hrsg.): Proc. Int. Symp. on UHPC, Kassel, Sept. 13-15, 2004. Heft 3, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, kassel university press, 2004
- [2.26] Mikkelsen, W. (1991): A Comparison of Chloride Ingress in Densit Materials and Traditional Cement Based Materials, Aalborg 1991.
- [2.27] Racky, P. (2003): Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von UHPC. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universität Kassel, H. 2 (2003).
- [2.28] Reineck, K.-H.; Lichtenfels, A.; Greiner, S. (2004): Hochfester und ultrahochfester Beton für Heißwasser-Wärmespeicher. Beton Werk International 7 (2004), H. 2, April, 66-80
- [2.29] Ricciotti (2001): The Footbridge of Peace, Seoul. Jean-Michel Place editions, Januar 2001
- [2.30] sakata-miraibashi.com (2004): Download von www.sakata-miraibashi.com am 26.07.2004

- [2.31] Schmidt, M.; Fehling, E. (2003): Ultra-hochfester Beton. 3. Kasseler Baustoff- und Massivbautage, 10. Sept. 2003. Heft 2, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, kassel university press, 2003
- [2.32] Schmidt, M.; Fehling, E.; Teichmann, Th.; Bunje, K.; Bornemann, R. (2003): Ultra-Hochfester Beton – Perspektiven für die Betonfertigteilindustrie. Beton- und Fertigteil-Technik (BFT), H. 3 (2003), S. 16-29.
- [2.33] Schmidt, M.; Fehling, E. (2004): Gutachterliche Stellungnahme zu den Anforderungen an Baustoffeigenschaften und Bemessungskonzept für das Fundament der Off-Shore-Windturbinen-Anlage E 112 bei Wilhelmshaven. Ingenieurbüro Fehling & Jungmann, Kassel 2004 (Intern).
- [2.34] Schnedler, M.; Fehling, E. (2002): Entwurf eines Verbundbogens aus ultrahochfestem Beton (UHPC) mit Stahlmantelung. Diplomarbeit Universität Kassel 2002.
- [2.35] Schneider, U.; Horwath, J. (2003): Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbeton. Schriftenreihe Inst. f. Baustoffe, Bauphysik und Brandschutz, TU Wien, H. 8 (2003).
- [2.36] Schreiber, W. (2003): Entwurf, Konstruktion und Bemessung der Gärtnerplatzbrücke. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universität Kassel, H. 2 (2003).
- [2.37] Tanaka, Y.; Ootake, A.; Uzawa, T.; Tsuka, T.; Kano, K.; Shimoyama, Y. (2002): Structural performance of a 50 m span footbridge applying fiber reinforced reactive powder concrete. Pp. 209-218 in: Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) – Application and Evaluation. Takayama, Japan. 21-22 October 2002.
- [2.38] Thibaux, T.; Tanner, J. A. (2002): Construction of the first French road bridges in ultra high performance concrete. In: Proceedings of the first fib Congress 2002 – Concrete Structures in the 21st Century, Osaka (CD-ROM).
- [2.39] Tue, N.V.; Küchler, M.; Schenk, G.; Jürgen, R. (2004): Application of UHPC filled Tubes in Buildings and Bridges. 807-817 in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslüke (Hrsg.): Proc. Int. Symp. on UHPC, Kassel, Sept. 13-15, 2004. Heft 3, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, kassel university press, 2004.
- [2.40] Walraven, J. (2003): Ultra-Hochleistungsbeton – Zukunftsvision oder Irrtum? Vortrag 3. Kasseler Baustoff- und Massivbautage, Kassel 2003.
- [2.41] Schmidt, M.; Bunje, K.; Fehling, E.; Teichmann, T.: Brückenfamilie aus Ultra-Hochfestem Beton in Niesetal und Kassel. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006) H. 6, S. 198-204.
- [2.42] Schmidt, M.; Teichmann, T.: Untersuchungen an geklebten UHPC-Verbindungen für die Zustimmung im Einzelfall für die Gärtnerplatzbrücke in Kassel. Untersuchungsbericht, Universität Kassel, 2005 (unveröffentlicht).
- [2.43] Schmidt, M.; Teichmann, T.: New Developments in Ultra-High-Performance Concrete – Non corrosive PVA-fibres and glueing of structural elements. Proceedings fib-congress, Naples 2006.
- [2.44] Teutsch, M.; Steven, G.; Emelmann, M.: UHPFRC – ein Baustoff für MEGA-Druckglieder. In: Beton- und Fertigteiljahrbuch 55 (2007), S. 74-80.
- [2.45] Reinhardt, H.-W.; Jooß, M.: Wasserspeicher aus UHFB-Technologie. In: Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Bauwerk Verlag GmbH. Berlin 2003, S. 239-255 (Hrg. König, G.; Holschenmacher, K.; Dehn, F.).
- [2.46] Jooß, M.: Dichtheit von Heißwasser-Langzeitspeichern aus Hochleistungsbeton. Dissertation. Institut für Werkstoffkunde. Universität Stuttgart, Juli 2001
- [2.47] Greiner, S.: Zum Tragverhalten von dünnen Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton. Dissertation. Universität Stuttgart. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2006
- [2.48] Greiner, S.: Tragverhalten von dünnen Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 3, S. 154-162
- [2.49] Schmidt, M.; D. Jerebic: UHPC: Basis for Sustainable Structures – the Gaertnerplatz Bridge in Kassel. Proc. 2nd Intern. Symposium on UHPC, Kassel, 2008. In: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universität Kassel, H. 10 (2008)

3 Ausgangsstoffe und Grundlagen der Mischungszusammensetzung

3.1 Übersicht

Zur Herstellung von UHFB wurden bisher vorrangig die nachfolgenden Ausgangsstoffe verwendet:

- feine und grobe Gesteinskörnungen (z. B. Quarzsand);
- Quarzmehl und andere Gesteinsmehle;
- Zement;
- Silikastaub,
- Fasern (z. B. Stahlfasern und Polypropylenfasern);
- Verflüssiger/Fließmittel;
- Wasser.

Neben den genannten Stoffen können grundsätzlich auch weitere Betonzusatzstoffe wie z. B. Flugasche, Metakaolin und Feinhüttensande sowie weitere Betonzusatzmittel zur Herstellung von UHFB eingesetzt werden.

In den folgenden Abschnitten werden die aus den bisherigen Erfahrungen bei der Herstellung und Anwendung von UHFB abzuleitenden notwendigen Eigenschaften der o. g. Ausgangsstoffe erläutert. Weitere Ausgangsstoffe werden behandelt, um ihre Anwendungsmöglichkeiten in UHFB abschätzen zu können.

3.2 Gesteinskörnungen

Während der klassische Reactive Powder Concrete (RPC) überwiegend aus Feinstkorn mit einem Größtkorn von höchstens 0,5 mm besteht, ist es mittlerweile möglich, mit geeigneten Gesteinskörnungen auch UHFB mit einem Größtkorn von 8 und 16 mm und einer Druckfestigkeit von 150 N/mm² und höher herzustellen. Auch mit diesen Betonen können selbstverdichtende Eigenschaften erzielt werden [3.63].

Gemäß den gegenwärtigen normativen Vorschriften wird neben anderen Kriterien insbesondere die Größe der Gesteinskörnung zur Definition eines Mörtels oder Betons genutzt (Größtkorn des Mörtels $d \leq 4$ mm). Aufgrund der veränderten Herangehensweise zur Projektierung eines ultrahochfesten Betons kann die zuvor genannte Unterscheidung anhand des Größtkorndurchmessers nur bedingt auf UHFB übertragen werden. Ausgehend von dem klassischen Reactive Powder Concrete (RPC) ist eine Unterscheidung in einen fein- und einen grobkörnigen UHFB sinnvoll:

- Größtkorndurchmesser ≤ 1 mm: feinkörniger UHFB
- Größtkorndurchmesser > 1 mm: grobkörniger UHFB

Trotz des geringen Grobkorndurchmessers werden auch feinkörnige UHFB üblicherweise als Beton bezeichnet.

Mit steigender Betondruckfestigkeit spielen die Auswahl der Gesteinskörnungen, insbesondere deren Kornform und Kornverteilung, die mechanischen und mineralogischen/petrographischen Eigenschaften sowie die chemisch-physikalische Wechselwirkung zwischen den Gesteinskörnungen und dem Zementstein eine wesentliche Rolle. Im Hinblick auf eine optimierte Packungsdichte aller Bestandteile eines ultrahochfesten Betons sind entsprechende Vorgaben für die Kornzusammensetzung der Ausgangsstoffe erforderlich (s. Abschnitt 3.7.2).

Grundsätzlich haben die zur Herstellung von UHFB verwendeten Gesteinskörnungen den Anforderungen der einschlägigen Normen für normale und schwere Gesteinskörnungen DIN EN 12620 und DIN V 20000-103 zu genügen. Ein wesentlicher Unterschied der Mischungsentwürfe von ultrahochfesten Betonen gegenüber konventionellen Betonen liegt in den deutlich reduzierten äquivalenten Wasserzementwerten von meistens um rd. 0,20. Um trotz dieser geringen Werte eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, sind neben der Auswahl des Zementes (s. Abschnitt 3.3) in Kombination mit den Zusatzmitteln und -stoffen (s. Abschnitte 3.5 und 3.4) insbesondere feine Gesteinskörnungen mit einem niedrigen Wasseranspruch zu verwenden.

Hinsichtlich der Kornform werden für ultrahochfeste Betone zumeist ungebrochene Sande verwendet, da diese in der Regel einen geringeren Wasseranspruch als Brechsand aufweisen. Neuere Entwicklungen zeigen jedoch, dass auch gebrochener Sand bzw. Splitt eingesetzt wird, z. B. aus Basalt [3.31]. Die Kornform wird bei evtl. zu verwendenden groben Gesteinskörnungen über die Plattigkeitskennzahl FI nach DIN EN 933-3 verifiziert. Die Kornform feiner Partikel kann ggf. mit einem Konformanalysator gemessen werden [3.64]. Es ist zu beachten, dass ungünstig geformte Körner die gewünschte Packungsdichte des Betongefüges und den Wasseranspruch des Frischbetons negativ beeinflussen.

3.3 Zement

DIN EN 197-1 enthält 27 genormte Zemente, die fünf Hauptzementarten (CEM I bis CEM V) zugeordnet sind. In bisher veröffentlichten Untersuchungen und in der Literatur beschriebenen Anwendungen von UHFB wurde überwiegend Portlandzement CEM I eingesetzt. In den meisten Veröffentlichungen wird zur Herstellung von UHFB die Verwendung C₃A-armer oder C₃A-freier Portlandzemente (HS-Zemente) empfohlen [3.68]. Als Vorteil wird insbesondere ein geringer Wasseranspruch dieser Zemente genannt. Entsprechende Untersuchungen im Vorfeld [3.3] hatten gezeigt, dass bei vergleichbarer Festigkeit und Verarbeitbarkeit deutlich geringere Dosierungen verflüssigender Betonzusatzmittel erforderlich waren als mit Portlandzementen höherer Feinheit bzw. mit höherem C₃A-Gehalt, siehe Abschnitt 3.5. Bei Verwendung C₃A-armer Zemente entsteht kaum Ettringit. Da die sehr feinen und dünnen Ettringitkristalle praktisch keine Festigkeit besitzen [3.73], trägt ihre Vermeidung zusätzlich zur Stabilisierung des Betongefüges bei [3.65]. UHFB wird in vielen Fällen bei rd. 90 °C wärmebehandelt. Bei einer Wärmebehandlung nehmen die Reaktionsgeschwindigkeit des C₃A und damit dessen Lösungsgeschwindigkeit zu. Bei einer zu frühen Wärmebehandlung mit Temperaturen über 60 °C wird dagegen das zum Erstarren eingesetzte Calciumsulfat nicht mehr als Monosulfat oder Ettringit gebunden, sondern in wenig stabiler Form an Calciumsilikathydrate angelagert. Das mobile Sulfat kann später bei einem ausreichenden Feuchtigkeitsangebot zur Bildung von sekundärem Ettringit führen. Diese Sekundärbildungen können bei üblichem Beton unter ungünstigen Umständen zur Schädigung durch Treiberscheinungen führen [3.70]. Durch die Verwendung C₃A-armer Zemente, durch eine mindestens eintägige Vorlagerung bei Umgebungstemperatur und wegen des sehr dichten Gefüges ist dieses Risiko nach aller Erfahrung bei UHFB nicht gegeben [3.68]. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die Veröffentlichungen zu UHFB, in denen Angaben zum verwendeten Zement gemacht wurden.

Tabelle 3.1: Übersicht über in UHFB eingesetzte Zemente

lfd. Nr.	Zementart	Zementgehalt	spez. Oberfläche	Erläuterungen zu Zement und Anwendung	Quelle
		kg/m ³	cm ² /g		
1	2	3	4	5	6
1	CEM I 52,5 HS/NA	580–900	4530	Laboruntersuchung: UHFB mit Druckfestigkeiten zwischen 200 und 350 N/mm ²	[3.10]
2	20M type cement ¹⁾	695–705	3000	u. a. Brücke für Fußgänger und Radfahrer: UHFB mit einer Druckfestigkeit bis zu rd. 300 N/mm ² - Portlandzement 45 M.-% C ₃ S, 32 M.-% C ₂ S, 0M.-% C ₃ A, 14 M.-% C ₄ AF	[3.2, 3.6, 3.7]
3	Portland cement Type V ²⁾	39,3 M.-% ³⁾	k. A.	Laboruntersuchung: UHFB mit einer Druckfestigkeit von rd. 230 N/mm ²	[3.24, 3.32]
4	Portland cement Type V ²⁾	39,3 M.-% ³⁾	k. A.	Laboruntersuchung: UHFB mit einer Druckfestigkeit von rd. 240 N/mm ²	[3.33]
5	Portland cement Type V ²⁾	41,2 M.-% ³⁾	k. A.	Laboruntersuchung	[3.34]
6	Portland cement	27,2 M.-% ³⁾	k. A.	Laboruntersuchung: Portlandzement 66,9 M.-% C ₃ S, 19,2 M.-% C ₂ S, 4,35 M.-% C ₃ A, 1 M.-% C ₄ AF	[3.45]
7	Portland cement	25,3–39,8 M.-% ³⁾	k. A.	Laboruntersuchung: UHFB mit Druckfestigkeiten von rd. 200 und rd. 800 N/mm ²	[3.57]
8	Portlandzement	889/1004	3650	Laboruntersuchung: UHFB mit einer Druckfestigkeit bis zu rd. 250 N/mm ²	[3.62]
9	Zement C ₃ A-frei	680–728	k. A.	Laboruntersuchung: UHFB mit einer Druckfestigkeit bis zu rd. 260 N/mm ²	[3.66]
10	Portlandzement CEM I 42,5 R	980	k. A.	Laboruntersuchung: UHFB mit einer Druckfestigkeit ≥ 180 N/mm ²	[3.66]
11	Portland cement	730	3200	Labor: Portlandzement 4 M.-% C ₃ A	[3.9]
			4300	Labor: Portlandzement 8 M.-% C ₃ A	
			3300	Labor: Portlandzement 1 M.-% C ₃ A	
			3600	Labor: Portlandzement 1 M.-% C ₃ A	

Tabelle 3.1: Fortsetzung und Abschluss

lfd. Nr.	Zementart	Zementgehalt	spez. Oberfläche	Erläuterungen zu Zement und Anwendung	Quelle
		kg/m ³	cm ² /g		
1	2	3	4	5	6
12	OPC	k. A.	k. A.	Laboruntersuchung: Portlandzement 60 M.-% C ₃ S, 22 M.-% C ₂ S, 3,8 M.-% C ₃ A, 7,4 M.-% C ₄ AF	[3.16, 3.17]
13	OPC (CPA 55 HTS)	1080,6	k. A.	Laboruntersuchung: Portlandzement 67,23 M.-% C ₃ S, 14,5 M.-% C ₂ S, 4,11 M.-% C ₃ A, 6,23 M.-% C ₄ AF	[3.27]
14	OPC	713	k. A.	Laboruntersuchung: nicht weiter spezifizierter Portlandzement	[3.48]
15	OPC	k. A.	k. A.	Laboruntersuchung: Portlandzement 63,3 M.-% C ₃ S, 17,72 M.-% C ₂ S, 1,62 M.-% C ₃ A, 8,47 M.-% C ₄ AF	[3.26]
16	Portland cement Type V ²⁾	42,2–42,5 M.-% ⁴⁾	k. A.	Laboruntersuchung: Portlandzement 66,6 M.-% C ₃ S, 4,78 M.-% C ₃ A	[3.46]
17	CEM III/B 42,5 NW/HS, CEM I 42,5 R HS	943–1063 636–736	k. A.	Laboruntersuchung	[3.37, 3.62]
18	CEM III 52,5	k. A.			[3.39]
k. A.: keine Angabe 1) vergleichbar mit Portlandzement Typ II nach ASTM C 150, d. h. erhöhter Sulfatwiderstand, mäßige Hydratationswärmeentwicklung - Zement 20M 270 J/kg, Typ II 300 J/kg) 2) Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand nach ASTM C 150 3) Bezug: Summe der Ausgangsstoffe Zement, Silikastaub, Fließmittel, Sand ≤ 4 bzw. 6 mm, Stahlfasern, Wasser 4) Bezug: Summe der Ausgangsstoffe Zement, Silikastaub, Fließmittel, Sand					

UHFB enthält wegen der Reduzierung des äquivalenten Wasserzementwerts deutlich mehr Zement als normal- und hochfester Beton. In der Literatur werden Werte zwischen rd. 600 und 1000 kg/m³ Beton angegeben (vgl. Tabelle 3.3). Allerdings ist es bei sehr günstiger Packungsdichte inzwischen auch möglich, UHFB mit weniger als 500 kg Zement/m³ Beton herzustellen [3.64].

Orientierende Untersuchungen unter Verwendung eines Hochofenzementes CEM III/B 42,5 NW/HS [3.37] ergaben bei 20 °C konservierender Lagerung der Probekörper aus UHFB mit 12 M.-% Silikastaub bei einem Wasserzementwert w/z = 0,20 eine 28-Tage-Druckfestigkeit von rd. 160 N/mm². Bei einer eintägigen Wärmebehandlung bei 90 °C (Beginn im Alter von 1 Tag) konnten die Druckfestigkeiten auf 180 bis 215 N/mm² gesteigert werden [3.62]. In den Niederlanden wurden Teile einer Brücke über den Fluss Kaag mit UHFB der Festigkeitsklasse B180 unter Verwendung von CEM III 52,5 hergestellt [3.39]. Darüber hinaus sind keine Untersuchungen bzw. Anwendungen von UHFB unter Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen (CEM II – CEM V) bekannt.

In [3.57] wird darauf hingewiesen, dass das Fließmittel auf den jeweiligen Zement abgestimmt werden muss. Sehr fein aufgemahlene Zemente sind aufgrund ihres ungünstig hohen Wasseranspruches nicht zu empfehlen. Die Bandbreite der in der Literatur zur Herstellung von UHFB angegebenen Zementfeinheiten liegt insgesamt zwischen rd. 3000 und rd. 4500 cm²/g [3.2, 3.6], siehe Tabelle 3.1. Die (Norm-)Druckfestigkeiten der Zemente werden – soweit genannt – mit Werten zwischen 54 und 64 N/mm² angegeben. Sie sind als Zemente der Festigkeitsklassen 42,5 und 52,5 nach DIN EN 197-1 einzustufen.

3.4 Reaktive und inerte Zusatzstoffe

3.4.1 Übersicht

Ausreichend feine Füllstoffe – wie z. B. Gesteinsmehle, Silikastaub und Feinflugaschen – bewirken eine deutliche Verdichtung des Mikrogefüges, und beeinflussen den Wasseranspruch des Betons, siehe Abschnitt 3.7. Reaktive Zusatzstoffe führen zudem zu zusätzlichen kristallchemischen, hydraulischen und puzzolanischen Reaktionen.

In Deutschland werden für die Herstellung von Beton nach DIN Fachbericht 100 „Beton“ zwei Arten von anorganischen Zusatzstoffen unterschieden:

- nahezu inaktive Zusatzstoffe (Typ I) und
- puzzolanische oder latenthydraulische Zusatzstoffe (Typ II).

Zusatzstoffe des Typs I sind Gesteinsmehle nach DIN EN 12360, Pigmente nach DIN EN 12878 und Zusatzstoffe mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung oder Europäischer Technischer Zulassung. Die Eignung als Zusatzstoff Typ II ist nachgewiesen für Flugasche nach DIN EN 450, für Silikastaub nach DIN EN 13263 sowie für Trass nach DIN 51043 sowie für Zusatzstoffe mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung oder Europäischer Technischer Zulassung.

Bei den bisher veröffentlichten Untersuchungen zu UHFB wurden Silikastaub und Gesteinsmehle eingesetzt. Typische Silikastaubgehalte für UHFB liegen bei 10-25 M.-% bezogen auf den Zementgehalt [z. B. 3.57, 3.63]. Vereinzelt wurden Mengen bis 30 % bezogen auf die Zementmasse eingesetzt [3.65]. Tabelle 3.2 vergleicht ausgewählte Eigenschaften der Puzzolane Silikastaub, Nanosilika, Metakaolin und Flugasche mit denen von Zementen.

Tabelle 3.2: Ausgewählte Eigenschaften der Puzzolane Silikastaub, Nanosilika, Metakaolin, Flugasche im Vergleich zu Zement in Anlehnung an [3.42]

Parameter / Eigenschaft	Zement	Silikastaub	Nanosilika	Metakaolin	Flugasche
1	2	3	4	5	6
SiO ₂ in M.-%	18–24	80 ... 99	100	51–55	40–60
Al ₂ O ₃ in M.-%	4–8	0,5 ... 3,0	–	40–42	23–24
Fe ₂ O ₃ in M.-%	1–5	0,1 ... 5,0	–	0,5–4,6	2–16
CaO in M.-%	61–69	0,7 ... 2,5	–	0,1–0,34	0,6–8,5
mittlere Partikelgröße in µm	10–25	~ 0,1	~ 0,015	1,3	~ 10–20
(Rein)Dichte in kg/dm ³	3,0–3,15	2,22–2,40	2,20	k. A.	2,15–2,45
spezifische Oberfläche in m ² /g	0,3–0,6	18–22	180–230	10–16,8	0,3–0,8
Zustandsform	Pulver	Pulver Slurry (wässrige Dispersion)	Stabile, wässrige, kolloidale Lösung	Pulver	Pulver

3.4.2 Silikastaub

Die am häufigsten eingesetzten Zusatzstoffe für ultrahochfeste Betone sind feindisperse Kieselsäurestäube, vor allem Silikastaub. Sie verbessern zum einen die Packungsdichte der Feinststoffmatrix, zum anderen reagieren sie mit dem Calciumhydroxid des Zementes und bilden zusätzliche gefüggedichtende C-S-H-Phasen.

Durch die puzzolanische Abbaureaktion von Calciumhydroxid wird bei üblichem Beton die Alkalireserve des Betons für den Korrosionsschutz reduziert. König und Wagner [3.42] berechnen in einem Beispiel, dass bei einem Beton mit 350 kg/m³ Zement mit einer 20 %igen Zugabe von Silikastaub nach einer vollständigen Reaktion des Silikastaubes noch hinreichend Restalkalitätsreserven für den Korrosionsschutz übrigbleiben. Der Zementgehalt ist bei UHFB in der Regel wesentlich höher. Zudem kann sich im UHFB mit seinen niedrigen äquivalenten Wasserzementwerten durch die nachträgliche Hydratation mit Rest-Zementklinkerphasen Calciumhydroxid bilden, sofern ausreichende Feuchtigkeit zur Verfügung steht, z. B. an Rissen. Außerdem verringert der Einsatz von Silikastaub die Kapillarporosität und reduziert den Karbonatisierungsfortschritt, sodass bei UHFB keine Bedenken einer zu starken Abminderung des Korrosionsschutzes bestehen.

Die beschleunigte Hydratationsreaktion der sehr reaktiven UHFB-Mischungen kann aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnungskoeffizienten der Bestandteile in jungem Betone u. U. zu thermisch bedingten Mikrorissen führen, die die Dauerhaftigkeit des Betons beeinflussen können [3.43, 3.50].

Grundsätzliche Anforderung für den Einsatz von Silikastäuben in UHFB ist eine gute Dispergierung im Frischbeton. Kompaktierte Silikastäube erschweren in den wasserarmen UHFB-Rezepturen eine Dispergierung der Partikel und damit den Aufbau eines homogenen Bindemittelleimes. Deshalb sollten unverdichtete Silikastäube eingesetzt oder verdichtete Silikasuspensionen vorab dispergiert werden [3.66].

Viele Untersuchungen hinsichtlich der Verarbeitbarkeit (Rheologie) und der mechanischen Eigenschaften beschäftigen sich mit der Art, der Reinheit und der zuzusetzenden Menge an Silikastaub [3.20, 3.85]. Unterschiede im Wasseranspruch entstehen durch Verunreinigungen durch Kohlenstoff und Alkalien. Überwiegend wird im Schrifttum hochreiner weißer, nicht agglomerierter Silikastaub aus der Zirkonproduktion favorisiert [z. B. 3.49].

Hinsichtlich der Verwendbarkeit von Silikasuspensionen und kolloidalen Lösungen (Nanosilika) bestehen in der Literatur uneinheitliche Meinungen. Fest steht, dass durch diese Suspensionen (i. d. R. bis zu 50 %ige Feststoffkonzentrationen) hohe Wassermengen eingetragen werden, die zu einem zu hohen Wasserzementwert des UHFB führen können [3.66].

In [3.10] wurden unterschiedliche Arten von pulverförmigem Silikastaub mit unterschiedlichen SiO_2 -Gehalten (weiß und grau) untersucht. Es wurde festgestellt, dass zum einen die Reinheit, vor allem aber die auf die Kornzusammensetzung der Feinststoffe abgestimmte optimale Menge die Viskosität des Frischbetons beeinflussen. Bild 3.1 zeigt, dass bei dem untersuchten feinkörnigen UHFB die optimale Zugabemenge weitgehend unabhängig vom Kohlenstoffgehalt des Silikastaubes zwischen 10 und 15 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, lag. Silikastaub mit niedrigem Kohlenstoffgehalt (Mischungen M II) ist dennoch zu bevorzugen, um den Wassergehalt insgesamt niedrig zu halten.

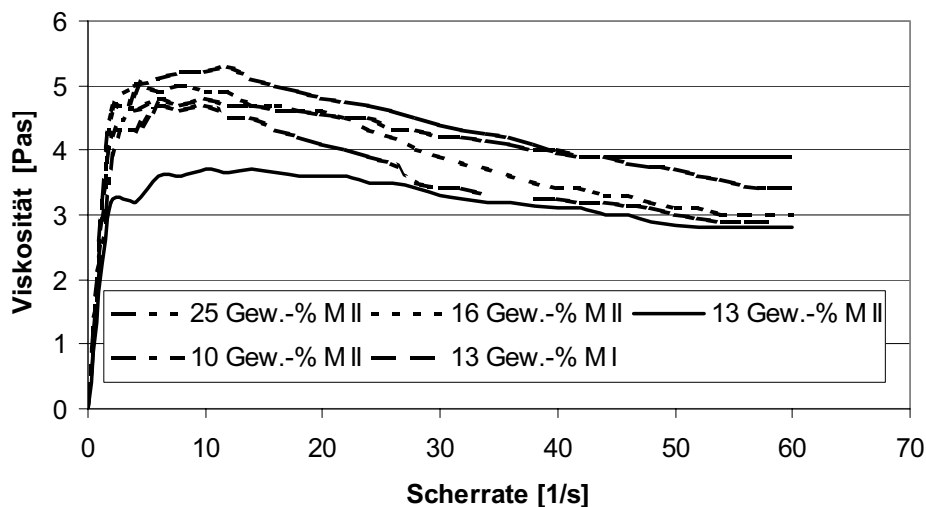


Bild 3.1: Viskosität von Zementleim in Abhängigkeit von der Art und der Menge an Silikastaub (Angabe in M.-% von Zement) aus [3.10]

3.4.3 Flugasche

Flugasche ist in den bisher veröffentlichten Mischungen für UHFB nicht genannt. Im Rahmen von Tastversuchen wurden Mischungen unter Verwendung von konventioneller Steinkohlen-Flugasche nach DIN EN 450 sowie mit durch Sichtung erzeugter Feinflugasche ($d_{95} < 10 \mu\text{m}$) durchgeführt. Als Basis der Versuche diente eine Referenzmischung mit CEM I 52,5 R, Silikastaub, Quarzmehl und Feinsand. Um die gegebene Körnungslinie vergleichbar zu halten, wurde durch die Zugabe der Flugasche anteilig Zement und Quarzmehl substituiert. Der Einsatz der Feinflugasche erfolgte im Austausch gegen Zement und geringe Mengen Silikastaub.

In beiden Fällen konnte keine signifikante Veränderung der grundlegenden mechanischen Kennwerte wie Biegezug- oder Druckfestigkeit festgestellt werden. Hieraus ist abzuleiten, dass aufgrund des sehr niedrigen äquivalenten Wasserzementwertes und der hohen Dosierung an reaktivem Silikastaub die Flugasche ähnlich wie das Quarzmehl oder die unreaktierten Klinkeranteile vorwiegend physikalisch als Füllkorn wirken. Zur genaueren Quantifizierung von Einsatzgrenzen und Wirksamkeiten, auch in Bezug auf Frischbetonkennwerte, sind systematischere Untersuchungen notwendig.

3.4.4 Metakaolin

Aus Untersuchungen ist bekannt, dass amorphes Metakaolin weniger als Mikrofüller fungiert als z. B. Silikastäube. Jedoch ist die puzzolanische Reaktivität teilweise ausgeprägt. Unter Bildung zusätzlicher CSH-Phasen durch die Reaktion des Metakaolins mit dem bei der Hydratation entstehenden Portlandit (Calciumhydroxid) werden bei ultrahochfesten Betonen Druckfestigkeiten erzielt, die sich nur geringfügig von denen mit Silikastaub hergestellten UHFB unterscheiden [3.21].

3.4.5 Gesteinsmehle

Zur Herstellung ultrahochfester Betone wurden bisher in erster Linie fein gemahlene, kristalline Quarze verwendet. Kalksteinmehle wurden bisher nur vereinzelt angewendet. Die inerten, anorganischen Zusatzstoffe reagieren unter normalen Bedingungen nicht mit Zement und Wasser. Jedoch können Gesteinsmehle neben der physikalischen Füllerwirkung bei wärmebehandelten ultrahochfesten Betonen u. U. auch einen Festigkeitsbeitrag, z. B. durch Wirkung als „Kristallisationskeime“ leisten. Eine maximale Reaktivität während einer Wärmebehandlung (s. Abschnitt 4) wird bei einem Korndurchmesser zwischen 5 und 25 µm erreicht. Nach [3.57] ist ein Silikat/Zement-Verhältnis von 0,62 anzustreben, wobei mit Silikat die Kombination aus Quarzmehl und Silikastaub bezeichnet wird.

In [3.57, 3.59, 3.64] wurde ebenfalls ein positiver Einfluss von Quarzmehl auf die Festigkeitsentwicklung festgestellt. Mikrostrukturelle Untersuchungen zeigten, dass die Ursache hierfür in der erheblichen Verringerung der Zementleimschichtdicken liegt, die sehr stark vom Blainewert des verwendeten Quarzmehls, vor allem aber von der möglichst günstigen Kornpackung des gesamten Feinstkorns abhängt, siehe Abschnitt 3.7. Bei günstiger Kornpackung stieg z. B. in [3.12, 3.63] die Druckfestigkeit um mehr als 20 % an, ohne dass der äquivalente w/z-Wert verringert wurde. Andererseits konnten bei gleicher Druckfestigkeit über 20 M.-% des Zementes durch Feinquarz ersetzt werden, ohne dass der äquivalente Wasserzementwert verringert werden musste.

3.4.6 Feinsthüttensandmehle

In jüngster Zeit befassten sich chinesische Arbeiten [3.44, 3.51] mit dem Einfluss von ultrafeinen Hüttensandmehlen auf die Eigenschaften von Hochleistungsbetonen. In Kombination mit anderen Feinstoffen (Flugaschen, Silikastaub) konnten die äquivalenten Wasserzementwerte reduziert und Beton-Rezepturen mit UHFB-Eigenschaften entwickelt werden.

Grundlegende Arbeiten zum Einfluss von Feinsthüttensandmehlen auf die Betoneigenschaften zu diesem Thema enthalten [3.38] und [3.43]. Dort konnten eine Optimierung der Zement-Feinsthüttensand-Granulometrie und deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit dieser Gemische sowie die Verbesserung der Übergangszone zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix nachgewiesen werden.

3.5 Zusatzmittel

Betonzusatzmittel werden in der Normenreihe DIN EN 934 „Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel“ erfasst. Als geeignet gelten Betonzusatzmittel nach DIN EN 934-2, Betonzusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 2: Betonzusatzmittel, und Betonzusatzmittel mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung oder mit einer Europäischen Technischen Zulassung. Für die Herstellung von UHFB sind in erster Linie Fließmittel von Bedeutung.

In der klassischen Betontechnik – dem 3-Stoff-System Zement-Gesteinskörnung-Wasser – ergibt sich der erforderliche Zementleimgehalt aus dem Haufwerksporenraum der gröberen Gesteinskörnung, der mit Zementleim gefüllt werden muss, und dem Zementleim zwischen den Körnern, der zur Verarbeitung notwendig ist [3.73]. Da die Druckfestigkeit von Normalbeton im Wesentlichen von der Kapillarporosität des Zementsteins und damit vom Wasserzementwert abhängt, war die unter Baustellenbedingungen erreichbare Betondruckfestigkeit lange Zeit auf rd. 50 N/mm² begrenzt, weil dem Beton aus den drei Komponenten Wasser, Zement und Gesteinskörnung zur Einstellung einer ausreichenden Verarbeitbarkeit mehr Wasser zugegeben werden musste, als zur Hydratation eines kapillarporenen Zementsteins (w/z < 0,40) notwendig wäre. Dies änderte sich erst, als ausreichend wirksame Verflüssiger und Fließmittel zur Verfügung standen. In der Vergangenheit wurden für Beton überwiegend Fließmittel auf der Basis von sulfonierten Naphthalin-formaldehydkondensaten (SNF oder NFS), sulfonierten Melamin-formaldehydkondensaten (SMF oder MFS) oder Ligninsulfonaten (LS) verwendet. Ihre Wirkung beruht darauf, dass sie an den Oberflächen der kaum hydratisierten Zementpartikel und insbesondere der ersten Hydratationsprodukte – insbesondere an Ettringit – sorbiert werden [3.53]. Dabei ändert sich die Ladungsverteilung an der Oberfläche der Zementpartikel bzw. der Hydratationsprodukte und es kommt zur elektrostatischen Abstoßung. Die Anlagerung an die Feststoffe ist wesentliche Voraussetzung für die verflüssigende Wirkung. Daneben reduzieren Fließmittel in bestimmten Umfang die Oberflächenspannung des Wassers und verbessern dadurch die Benetzung der einzelnen Zementpartikel. Neben der elektrostatischen Abstoßung bauen die Fließmittel auch eine sterische Abstoßung zwischen den Molekülen auf, was sich in ihrer Dispergierfähigkeit widerspiegelt. In hohen Dosierungen können sich die verzögernden Eigenschaften der Fließmittel auswirken. Mit der Entwicklung hochfließfähiger Betone zeigte sich, dass die etablierten Produkte gar nicht oder nur in hohen Dosierungen in der Lage waren, die geforderten Wassereinsparungen und Konsistenzen zu erzielen. Dies führt gleichzeitig zu einer Verlängerung der Verzögerungszeiten. Zunächst wurden Polycarboxylate (PC) verwendet, die längere Verarbeitungszeiten gewährleisten. Die notwendige Wassereinsparung war mit ihnen

aber noch nicht zu erzielen. Am Ende dieser Entwicklung standen die Polycarboxylatether (PCE). Sie bewirken eine wesentlich höhere Wassereinsparung. Eine weitgehend akzeptierte Modellvorstellung geht davon aus, dass PCE an der Oberfläche von Klinkerphasen bzw. deren Hydratationsprodukten adsorbiert werden und die beschriebene elektrostatische Abstoßung hervorrufen. Untersuchungen zur Adsorption von Verflüssigermolekülen an Klinkerphasen (z. B. [3.53]) deuten darauf hin, dass PCE selektiver an C_3A bzw. Ettringit adsorbiert werden als die früheren Verflüssiger der 1. und 2. Generation. Ein weiteres Indiz hierfür sind die deutlich geringeren Dosierungen von PCE bei gleicher Wirkung. Zusätzlich bewirken die im PCE gebundenen Polyethergruppen eine deutlich größere sterische Abstoßung der Partikel. Durch die reduzierte Adsorption an CSH-Phasen wird die Hydratation in geringerem Umfang beeinflusst. Untersuchungen an Zementleim zeigten, dass bei Verwendung von PCE erst bei sehr viel geringeren Wasserzementwerten erste Sättigungserscheinungen auftreten als bei Fließmittel auf Basis von NFS oder MFS (Bild 3.2).

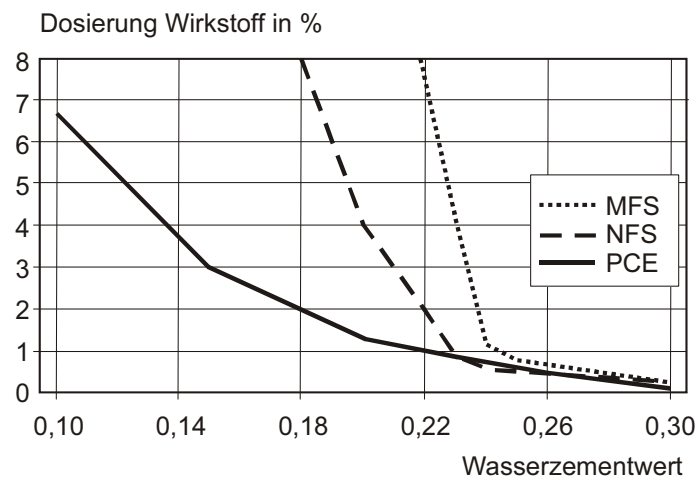


Bild 3.2: Notwendige Fließmittelwirkstoffdosierung in Abhängigkeit vom Wasserzementwert zum Erreichen einer definierten Konsistenz von Zementleim [3.40]

Weitere Details zur Wirkungsweise verschiedener Zusatzmittel sind z. B. [3.40, 3.54] zu entnehmen. Eine Übersicht der in der Literatur in Zusammenhang mit der Herstellung und Anwendung von UHFB erwähnten Zusatzmittel und Zusatzmittelmengen enthält die Tabelle 3.3. Geht man von den bisherigen Erfahrungen aus, so zeigen sich die Polycarboxylatether als ideale Betonverflüssiger bzw. Fließmittel für UHFB.

Tabelle 3.3: Übersicht über in UHFB eingesetzte Zusatzmittel ¹

lfd. Nr.	Zusatzmittel ZM	ZM-Gehalt	M.-% v. Z. (M.-% v. (z+s))	Erläuterungen zum Zusatzmittel	Quelle
		kg/m ³			
1	2	3	4	5	6
1	Polycarboxylatether	24,7–29,4	3,13–4,91 (3,04–3,76)	k. A.	[3.10]
2	Polynaphthalinsulfonat	41,7–46,0	5,91–6,53 (4,46–4,93)	Dichte: 1,21 g/cm ³ Feststoffgehalt: 42 M.-% Polymerisationsgrad > 10	[3.2, 3.6, 3.7]
3	Polymelaminsulfonat	k. A.	4,4 (3,5)	k. A.	[3.24, 3.32]
4	Polymelaminsulfonat	k. A.	4,4 (3,5)	k. A.	[3.33]
5	Acrylic superplasticizer (Acrylat)	k. A.	1,8 (1,4)	k. A.	[3.34]
6	Condensed naphthalene sulphonate (dry)	0,78 M.-% ¹⁾	2,87 (2,32)	k. A.	[3.45]

¹ die Nummerierung (lfd. Nr.) entspricht Tabelle 3.1

Tabelle 3.3: Fortsetzung und Abschluss

lfd.	Zusatzmittel	ZM-Gehalt	M.-% v. z	Erläuterungen zum Zusatzmittel	Quelle
Nr.	ZM	kg/m3	(M.-% v. (z+s))		
1	2	3	4	5	6
7	Polyacrylate	0,48–0,65 M-% ¹⁾	1,6–1,9 (1,3–1,5)	k. A.	[3.56, 3.57]
8	Polyacrylat	5–62	6,17/6,41 (4,94/5,01)	40 % Wirkstoff	[3.62]
9	Polycarboxylatether	20,1–21,2	2,91–2,96 (2,21–2,24)	k. A.	[3.66]
10	Polycarboxylatether	78,9	8,05 (6,04)	flüssig	[3.66]
11	1. Copolymer of acrylic ester (CAE)	k. A.	0,7–1,2 ²⁾	synthetische Polymere Details in [3.16]	[3.9]
	2. Polynaphtalene sulfonate (PNS)	k. A.	1,4–2,3 ²⁾		
	3. Polymelamine sulfonate (PMS)	k. A.	1,9–2,8 ²⁾		
11	k. A., wahrscheinlich Polyacrylate (vgl. [3.48, 3.49])	k. A.	k. A.	k. A.	[3.16, 3.17]
12	Melamine superplasticzer	14,05 ³⁾	1,3 ²⁾	40 M.-% Feststoffgehalt Produkt: „Chrysosuperplast“	[3.27]
13	Polyacrylat	43 (12,8 ³⁾)	1,8 ²⁾	k. A.	[3.48]
14	Naphtalene sulfonate formaldehyde	k. A.	1,49–2,91 (1,49–2,24) ⁴⁾	k. A.	[3.26]
15	Polymelamine	0,42 M.-% ^{1) 3)}	1,0 (0,8) ³⁾	k. A.	[3.45]
	Polyacrylate	0,21–0,76 M.-% ^{1) 3)}	0,5–1,8 (0,4–1,44) ³⁾	k. A.	
k. A.: keine Angabe					
1) Bezug: Summe der Ausgangsstoffe Zement, Silikastaub, Fließmittel, Sand					
2) Feststoff des Fließmittels bezogen auf das Zementgewicht					
3) Feststoff des Fließmittels					
4) Bezug: Zement + Silikastaub oder andere hochfeine Füller					

In [3.75, 3.76 sowie in 3.64] wurden mit einem Rotationsviskosimeter der Einfluss von sehr feinen Gesteinsmehlen (Kalksteinmehl, Quarzmehl, Silikastaub) sowie von unterschiedlichen Fließmitteln auf die rheologischen Eigenschaften von UHFB untersucht. Dabei wurde auch die Wirkung der Fließmittel bei Zement mit unterschiedlichem C₃A-Gehalt sowie der Einfluss unterschiedlicher spezifischer Oberflächen der Feinststoffe berücksichtigt. Es ergab sich z. T. ein sehr unterschiedlicher Fließmittelanpruch für die gleiche, leicht verarbeitbare, Konsistenz.

3.6 Fasern

Das Verformungsverhalten der UHFB-Matrix ist vorwiegend linearelastisch-spröde. Zur Verbesserung des Nachbruchverhaltens werden daher zumeist Stahlfasern zugesetzt (vgl. Abschnitt 6). In [3.57] wurden Stahlfasern mit 13 mm Länge und einem Durchmesser von 0,15 mm verwendet. Zugesetzt wurden zwischen 1,5 und 3,0 Vol.-%. Fasern mit einer Länge von 15 mm und einem Durchmesser von 0,15 mm wurden auch in [3.57, 3.59, 3.64] verwendet. Diese Fasern waren allerdings schwer einmischbar und neigten zur „Igelbildung“. Fasern mit einer Länge von 6 mm und einem Durchmesser von 0,1 mm ($l_f/d_f = 60$) ließen sich dagegen sehr gut mit der Matrix vermischen und bewirkten sehr hohe Biegezugfestigkeiten [3.11] (vgl. Abschnitt 6).

Bei UHFB mit einer Wärmebehandlung über 250 °C wurde mit kurzen Fasern (weniger als 3 mm Faserlänge) von unregelmäßiger Form eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erreicht. Mit diesen Fasern waren unter Laborbedingungen Druckfestigkeiten von bis zu 810 N/mm² an einem Zylinder mit

60 mm Durchmesser möglich. In [3.59] wird für günstige Faserlängen l_f der Bereich zwischen 4 und 20 mm angegeben, wobei die besten Ergebnisse mit Fasern zwischen 8 und 16 mm Länge erzielt wurden. Die Durchmesser der Fasern d_f liegen zwischen 0,08 und 0,5 mm mit den besten Ergebnissen zwischen 0,1 und 0,2 mm. Das Verhältnis $l_f/d_{\max}$ zwischen der mittleren Faserlänge l_f und dem Größtkorndurchmesser der Gesteinskörnung $d_{\max}$ sollte mindestens 10 betragen. Als Volumenprozentsatz der Stahlfasern wird in Übereinstimmung mit den o. g. Untersuchungen hinsichtlich der Biegezugfestigkeit ein Wert von 2,5 bis 3,5 Vol.-% und hinsichtlich der Bruchenergie (vgl. Abschnitte 6.4.2 und 6.4.8) zwischen 2,0 und 2,5 Vol.-% empfohlen [3.25, 3.59]. Bei Verwendung organischer Ziehmittel kann sich eine Schicht auf der Faseroberfläche ausbilden, die ggf. zu einer Verringerung der Verbundfestigkeit führt. Darüber hinaus ist grundsätzlich auch der Einsatz von Edelstahlfasern denkbar, z. B. um Korrosionserscheinungen an Rissen zu vermeiden. Hier müssten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zeigen, inwieweit dies in der Praxis zu realisierbaren Lösungen führen würde, zumal bislang keine korrosionsbedingten Nachteile bei stahlfaserhaltigem UHFB festgestellt wurden.

Bei Untersuchungen in [3.14, 3.77] wurden auch höherfeste Polyacrylalkoholfasern verwendet. Sie erwiesen sich als besonders geeignet, um die Duktilität des Betons im Nachbruchbereich zu verbessern (s. Abschnitt 6). Als positiv für das Bruch- und Nachbruchverhalten sowie vor allem für das Brandverhalten hat sich die Zugabe von 0,3 bis 0,6 Vol.-% Polypropylenfasern erwiesen [3.13, 3.65], vgl. auch Abschnitt 6. Sie verbessern erheblich den Brandwiderstand. Ihre Menge ist aber in erster Linie dadurch begrenzt, dass sie die Verarbeitungseigenschaften des Betons nachteilig beeinflussen, zumindest wenn die Betone mit fließfähiger oder praktisch selbstverdichtender Konsistenz hergestellt werden sollen [3.13]. Besonders wirksam scheinen Fasercocktails entweder aus unterschiedlich langen Stahlfasern oder aus Stahl- und hochfesten Kunststofffasern zu sein, wie z. B. aus Polyacrylnitril oder -alkohol [3.14, 3.47, 3.77]. Einen Überblick über unterschiedliche Fasertypen und ihre mechanischen Eigenschaften gibt Tabelle 3.4.

Tabelle 3.4: Zusammenstellung der Eigenschaften typischer Fasern

Lfd. .Nr.	Faserart		Typischer Faser- durchmes- ser/-dicke*) in μm	Typische Faser- länge*) in mm	Dichte in g/cm^3	E-Modul in kN/mm^2	Zugfestig- keit in N/mm^2	Bruch- dehnung in %
	1		2	3	4	5	6	7
1	Stahl- fasern	– Stahldraht- fasern	500–1300	30–60	7,85	160–210	> 1000	3–4
		–Spanfasern	400	26–32	7,85	210	980	–
		– Blechfasern	400–650	15–35	7,85	210	270–800	10
2	AR-Glasfasern		3–30	3–25	2,68–2,7	72–75	1500–1700	1,5–2,4
3	Polypro- pylen- fasern	– monofil	18–22	6–18	0,91	4–18	320–560	8–20
		– fibrilliert	50–100	6–19	0,91	3,5–10	320–400	5–15
4	Polyacrylnitrilfasern		18–104	4–24	1,18	15–20	330–530	6–20
5	Kohlenstofffasern		5–10	6	1,6–2,0	150–450	2600–6300	0,4–1,6
6	Asbestfasern		0,02–30	< 40	2,6–3,4	160	1000–4500	2–3
*) Typische Faserabmessungen hinsichtlich der Anwendung der Fasern als Kurzfasern im Betonbau								

Die Fasern beeinflussen die Konsistenz von UHFB nachhaltig und sind auch bei der Festlegung sedimentationsstabiler UHFB zu berücksichtigen.

Bild 3.3 zeigt die Trichterauslaufzeit, das Setzfließmaß und z. T. auch das Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der Variation des Wasserbindemittelwertes (aus [3.78] mit Ergänzung). Die in Bild 3.2 dargestellten Zusammenhänge zeigen Konsistenzbereiche für die Herstellung fließfähiger und nicht entmischender ultrahochfester Betone auf. Sie lagen bei ultrahochfesten Betonen mit einem Größtkorn von 8 mm (mit/ohne Fasern, mit/ohne 30 s Verdichtung) bei einem Setzfließmaß von rd. 750 mm und einer Trichterlaufzeit von rd. 20 Sekunden. Ultrahochfester Feinbeton war insgesamt robuster. Hier war bei den untersuchten Mischungen ein Setzfließmaß von rd. 850 mm und eine Trichterlaufzeit von rd. 15 s ohne Entmischungen möglich (mit/ohne Fasern, mit/ohne 30 Sekunden Verdichtung).

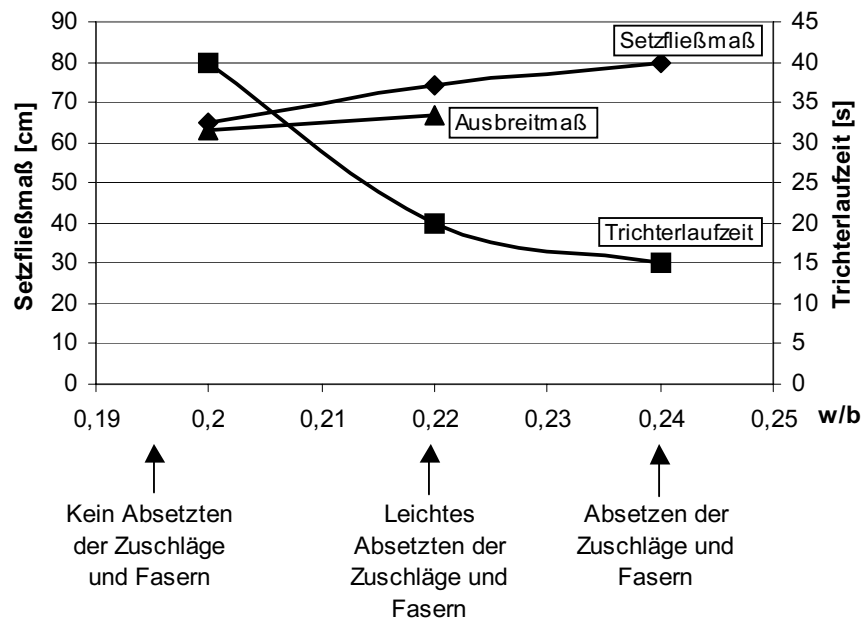


Bild 3.3: Beispiel für die Sedimentation von Fasern bei feinkörnigem UHFB in Abhängigkeit vom Setzfließmaß und der Trichterlaufzeit (2,5 Vol.-% Fasern 6/0,15 mm) in Abhängigkeit vom Wasserbindemittelwert, in Anlehnung an [3.78]

Auf das Verbundverhalten von Fasern in UHFB wird in Abschnitt 6.9 eingegangen.

3.7 Mischungszusammensetzung

3.7.1 Grundlagen der Mischungsoptimierung bei UHFB

Ultrahochfeste Betone sind charakterisiert durch eine sehr dichte Mikrostruktur, die man durch eine Optimierung des Mikrogefüges, kombiniert mit einem sehr niedrigen Wassergehalt um 0,20 erhält.

Die rheologischen Eigenschaften, die Gefügedichtigkeit und die Festigkeit des feinstoffreichen UHFB werden weit überwiegend durch die Art, die Eigenschaften und die Kornzusammensetzung aller Feinstbestandteile mit einer Korngröße bis 0,125 mm bestimmt. Eine günstige, hohlraumarme Zusammensetzung der Feinstbestandteile verringert insbesondere ihren Wasseranspruch. Der Beton kann dadurch mit einem niedrigeren Wasser-Feststoffverhältnis der Matrix hergestellt werden. Das Wasser-Feststoffverhältnis ergänzt den Wasserzementwert um den physikalischen Beitrag der Kornpackung zur Dichtigkeit. Ein niedriges Wasser-Feststoffverhältnis bedeutet einen hohen spezifischen Feststoffanteil in der Matrix, einen niedrigen Wasseranspruch, eine größere Dichtigkeit und eine höhere Festigkeit [3.64]. Mit Fließmittel können deshalb ultrahochfeste Betone mit einem Größtkorn bis zu 8 mm selbstverdichtend hergestellt werden.

Die CSH-Phasen der auf Grund des Füllereffektes modifizierten Matrix sind erheblich kleiner und stehen in intensiverem (engerem) Kontakt zueinander als die Hydratphasen bei hohen äquivalenten Wasserzementwerten. Durch die aufgrund der kurzen Diffusionswege beschleunigten Hydratation über viele Kristallkeime entsteht kein Raum zur Ausbildung großer Kristalle und es wird kein „sperriges“, offenes Mikrogefüge angelegt, das später nur durch komplexe Diffusionsprozesse zuwachsen kann.

Um die Mischung rheologisch optimal zusammenzusetzen, muss zusätzlich zu den üblichen Stoffkennwerten die Kornzusammensetzung des vorgesehenen Feinsandes bis 0,5 mm und aller Feinststoffe $\leq 0,125$ mm bekannt sein. Sie werden mit einem ausreichend hoch auflösenden Lasergranulometer bestimmt. Anschließend werden mit Hilfe dieser Ausgangswerte eine rheologisch günstige Kornzusammensetzung des Gemisches und die dafür erforderlichen Mengenanteile numerisch abgeschätzt. Das Ergebnis wird dann experimentell verifiziert und verfeinert. Alternativ kann die Zusammensetzung auch experimentell optimiert werden, z. B. durch die Bestimmung des Hohlraumgehaltes des Feinstkorngemisches und damit der Packungsdichte bei unterschiedlichen Mengenanteilen der einzelnen Körnungen und anschließender Messung der Viskosität des Leims und des Ausbreitmaßes des Betons. Die Art und Zusammensetzung des Grobkorns bei grobkörnigem UHFB ist dagegen wegen der hohen Zementleimmenge von geringerer rheologischer Bedeutung.

3.7.2 Einfluss der Kornpackung

Die auch im Vergleich zu hochfestem Beton noch weit höhere Festigkeit und Dichtheit ultrahochfester Betone beruht zum Teil darauf, dass der Wasserzementwert üblicherweise auf nur noch rd. 0,20 herabgesetzt wird. Außerdem wird der Feinkornanteil $< 0,125 \text{ mm}$ auf z. T. über 1000 kg/m^3 erhöht (entspricht volumetrisch rd. 350 bis 400 l/m^3). Zusätzlich wird die Kornpackung aller Feststoffe der Matrix, teilweise bis hin zum Feinsand mit einem Größtkorn von rund $0,5 \text{ mm}$, durch gezielte Auswahl unterschiedlicher Feinststoffarten und -körnungen so optimiert, dass eine möglichst hohe Packungsdichte erreicht und der in der Matrix verbleibende Porenraum möglichst klein wird [3.10, 3.27, 3.79, 3.80]. Dadurch wird weniger Wasser benötigt, um die Hohlräume im Kornhaufwerk zu füllen, bevor sich eine Gleitfilm zwischen den Partikeln ausbildet. Die Betone sind dann, trotz des sehr niedrigen Wasserzementwertes, sicher zu verflüssigen, weisen ein gutes Zusammenhaltvermögen aus und das Absetzen von (Blut-)Wasser wird in der Regel vermieden.

Die Wirkung lässt sich durch Leimuntersuchungen mit einem Rheometer feststellen [3.81, 3.82, 3.8]. Bild 3.4 zeigt anhand eines einfachen Beispiels den Zusammenhang zwischen der Änderung der Packungsdichte und der Viskosität eines Korngemisches, das aus zwei unterschiedlich feinen Körnungen zusammengesetzt ist, von denen die feinere das „Füllkorn“ für die grobere darstellt. Aussagefähige Kriterien für die Kornpackung sind die Packungsdichte und das spezifische Feststoffvolumen der Bindemittelmatrix, dargestellt durch das volumetrische Wasser-Feststoffverhältnis w/F_v . Durch die gezielte Zugabe von Feinststoffen nehmen im Allgemeinen aber nicht nur der Hohlraum und damit der Wasseranspruch der Ausgangskörnung ab, sondern die innere Oberfläche des Korngemisches nimmt gleichzeitig zu. Wenn mehr Füllkorn zugegeben wird als zum Füllen der Hohlräume zwischen der Ausgangskörnung erforderlich ist, oder wenn sehr feines Füllkorn mit sehr großer innerer Oberfläche – wie z. B. Silikastaub – als Füller verwendet wird, kann u. U. mehr Wasser für die Bildung von Gleitfilmen und zur Füllung der zusätzlichen Hohlräume zwischen den feinen Partikeln erforderlich werden, als von den Partikeln im „Tragkorngerüst“ verdrängt wird. Der Wasseranspruch für gleiche Konsistenz steigt an. Zudem ist eine höhere Feststoffpackung auch damit verbunden, dass innerhalb des Kornhaufwerks wesentlich mehr Kontaktstellen zwischen den Einzelkörnern vorhanden sind. Dadurch wird die innere Reibung des Gemisches größer. Das Füllkornvolumen sollte deshalb auf den gemessenen oder berechneten Hohlraumgehalt in der Ausgangskörnung begrenzt werden. Die Menge an sehr feinen Partikeln sollte so weit wie möglich begrenzt werden, um den Wasseranspruch tatsächlich zu senken und zu verhindern, dass der Beton zu klebrig wird.

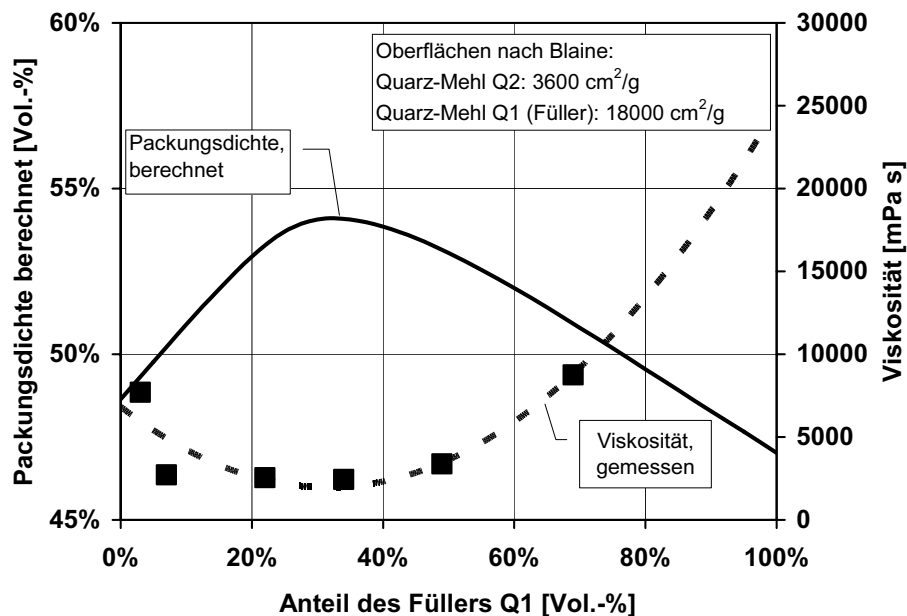


Bild 3.4: Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und Konsistenz eines Leims aus zwei unterschiedlich feinen Quarzmehlen (Q1, Q2) mit 1,5 M.-% Fließmittel ($w/F_m = 0,26$) [3.64]

Der volumenbezogene w/F_v -Wert (Gleichung (3.1)) ist ein direktes Maß für die mehr oder weniger hohlraumarme Kornzusammensetzung des Feinstteilmisches ($< 125 \mu\text{m}$ Partikelgröße) und für den sich daraus ergebenden Wasseranspruch. Er schließt auch andere Einflüsse auf den Wassereinspruch ein, wie z. B. die Kornform, die Kornrauigkeit und das Agglomerationsverhalten der Feinstpartikel. Er ist damit ein Maß für den Wasseranspruch des Feinstkorngemisches ebenso wie für die Lagerungsdichte der Partikel im Festbeton.

Der volumetrische w/F_v -Wert bildet die eigentliche Grundlage für alle Optimierungsschritte bei UHFB. Für Grundlagenuntersuchungen z. B. zur Rheologie inerter Feinststoffe gleicher Dichte kann auch vereinfachend der massebezogene Wasser-Feinststoffwert (w/F_m) verwendet werden (vgl. Gleichung (3.2)).

Volumenbezogener Wasser-Feinststoffwert [3.63]:

$$\frac{w}{F_v} = \frac{w}{\sum (z + \text{Feinststoffe})_{\text{vol}}} \quad (3.1)$$

Massebezogener Wasser-Feinststoffwert [3.64]:

$$\frac{w}{F_m} = \frac{w}{\sum (z + \text{Feinststoffe})_{\text{masse}}} \quad (3.2)$$

Die für eine möglichst dichte Kornpackung optimale Kornzusammensetzung und die dazu erforderlichen Feinstkörnungen können rechnerisch oder experimentell ermittelt werden. Zur numerischen Simulation der Packung von Zementpartikeln und Zusatzstoffen sind unterschiedliche computergestützte Verfahren bekannt, die allerdings bislang nicht die für die Optimierung des Feinstkorns bei UHFB ausreichende Genauigkeit aufweisen. Sie sind lediglich für eine Abschätzung der optimalen Kornzusammensetzung geeignet. Die letzte Anpassung und Validierung erfolgt dann durch Laborversuche, z. B. durch Messung des Hohlraumgehaltes nach [3.83] mit anschließender Messung der Viskosität mit einem Viscosimeter [3.64]. Dieses Vorgehen ist im Einzelfall recht aufwändig. Für eine ausreichend genaue rechnerische Optimierung fehlen noch realitätsnahe numerische und stoffliche Modelle.

Bild 3.5 zeigt beispielhaft die theoretisch packungsoptimale Kornzusammensetzung einer Kugelmischung mit einem Größtkorn von 8 mm. Sie weicht teilweise deutlich von einer landläufig als „ideal“ angesehenen stetigen, parabolisch gekrümmten Sieblinie ab. Bei der Packungsoptimierung muss deshalb immer die gesamte Kornzusammensetzung (Sieblinie) der einzelnen Feinststoffe und der Korngemische zugrunde gelegt werden. Für die näherungsweise numerisch-iterative Berechnung ist sie in ausreichend enge Einzelkorn-Klassen zu unterteilen [3.36, 3.64].

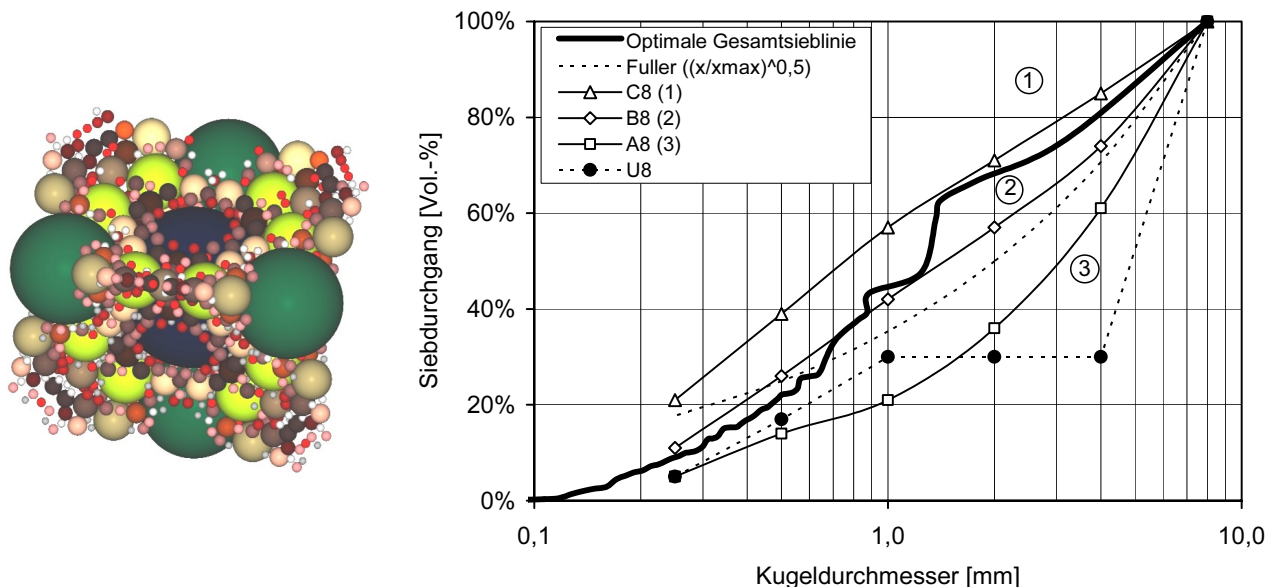


Bild 3.5: Optimale Position und Größe der Füllkugeln für eine optimale rhomboedrische Kugelordnung im Vergleich zu den Sieblinien A8, B8, C8 und U8 [3.64]

In der Literatur werden unterschiedliche Angaben zu den Korngrößenverhältnissen gemacht, bei denen eine möglichst weitgehende Hohlraumfüllung erreicht werden soll. Nach [3.55] beträgt das Verhältnis der Radien für optimale Packungsdichte

$$\frac{r_{\text{klein}}}{r_{\text{groß}}} = \lambda_{\text{PD}} \approx \frac{1}{3,18} \quad (3.3)$$

Nach [3.28] ergibt sich die optimale Fließfähigkeit zweier Korngruppen, wenn

$$\frac{r_{\text{klein}}}{r_{\text{groß}}} = \lambda_F = \frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \approx \frac{1}{6,46} \quad (3.4)$$

eingehalten wird.

Allerdings sind diese Verhältniswerte nur theoretisch optimal, wie das Ergebnis einer praktischen Optimierung der Packungsdichte für einen UHFB in Bild 3.6 zeigt. Unter Berücksichtigung der bislang noch nicht ausreichend bekannten Einflüsse der Kornform, der Oberflächenrauheit und der Agglomerationsneigung wurden Werte bis etwa 1:80 festgestellt [3.64]. Die Bilder 3.6 und 3.7 geben als Beispiele die in [3.31] verwendeten Ausgangsstoffe und die daraus bei unterschiedlichen Mengenanteilen festgestellten Gesamtsieb-
linien wieder. Je nach Zusammensetzung und der Menge an Microsilica lag das Ausbreitmaß des Betons einmal bei 500 mm (hoher Silikastaubanteil, geringe Packungsdichte, hoher w/F_v -Wert) und einmal bei 650 mm. Die Druckfestigkeit betrug bei gleichem effektiven Wasserzementwert einmal 155 N/mm² ($w/F_v = 0,51$) und einmal rd. 195 N/mm² ($w/F_v = 0,44$). Dies zeigt, welchen Stellenwert die genaue Kenntnis der physikalischen Eigenschaften der Feinstoffe, die Optimierung der Kornzusammensetzung und der Wasser/Feststoffwert bei UHFB haben.

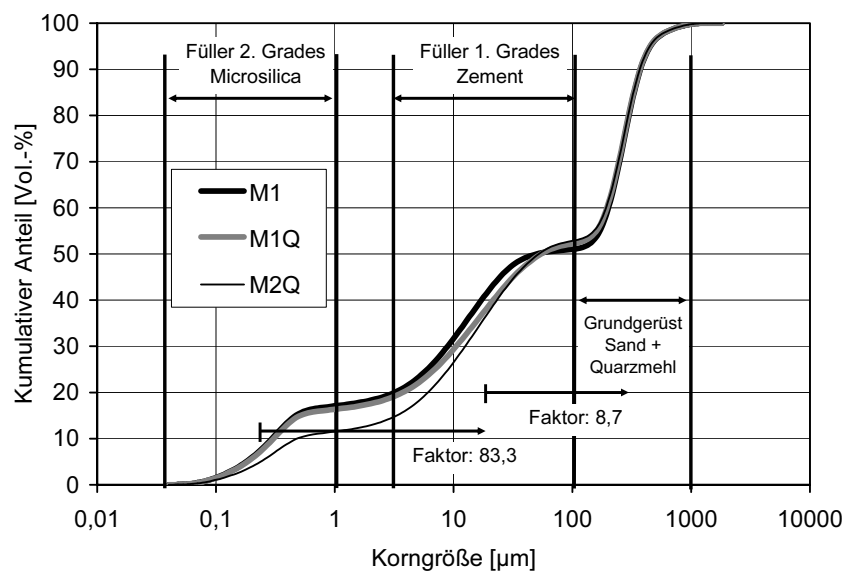


Bild 3.6: Kornzusammensetzung für UHFB mit Grundgerüst und unterschiedlichen Füllkornanteilen [3.31]; M1, M1Q: Mischungszusammensetzungen in Tabelle 3.5

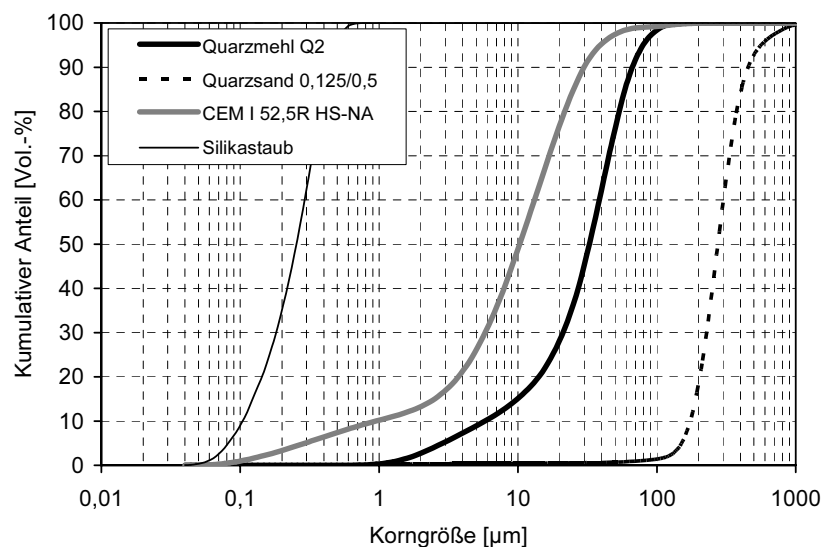


Bild 3.7: Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe für die Gesamtsieblinie in Bild 3.5 [3.31]

Hilfen und Modelle für die Optimierung der Packungsdichte und – daraus folgend – für optimal verarbeitbare feinkornreiche, leicht verarbeitbare Betone enthalten auch [3.57, 3.84].

Die minimale Wassermenge, die zur „Verflüssigung“ des Mehlkorns bzw. des „Puders“ erforderlich ist, ist nach [3.57] bei einem minimalen Verhältnis von Wasser und Bindemittel von 0,08 erreicht. Bei einem bereits optimierten Korngemisch kann der für die Verarbeitung und die Festbetoneigenschaften optimale Wassergehalt auch mit Hilfe eines globalen Modells verifiziert werden, das im Folgenden als ein weiteres Beispiel für die Abschätzung des Wasseranspruchs näher erläutert werden soll. Als Hauptparameter gilt hierfür die relative Dichte k_{rel} nach Gleichung (3.5).

$$k_{rel} = \frac{d_0}{d_s} \quad (3.5)$$

Dabei ist d_0 die Festbetonrohddichte nach dem Ausschalen und d_s die Dichte des Korngemisches bei dichtester Packung, die auch als Reindichte bezeichnet wird. Die relative Dichte k_{rel} charakterisiert die Qualität des Korngemisches, den Wassergehalt sowie die Misch- und Verdichtungswilligkeit des Betons. Die Bestimmung von d_0 ist sehr einfach und kann gleich nach dem Ausschalen erfolgen. Die Veränderung dieser relativen Dichte $k_{rel} = d_0 / d_s$ in Abhängigkeit vom Wasserbindemittelwert w/b zeigt Bild 3.8.

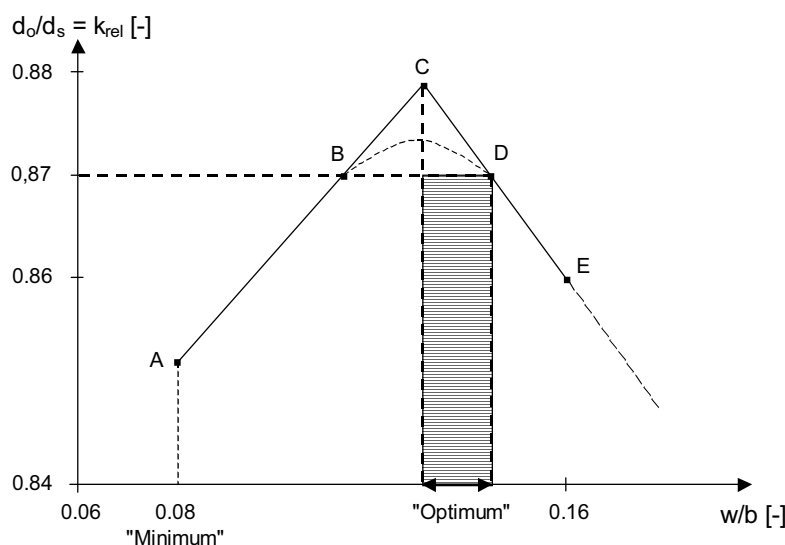


Bild 3.8: Relative Dichte k_{rel} in Abhängigkeit vom Wasserbindemittelwert w/b als Beispiel zur Bestimmung des Wasseranspruchs einer UHFB-Mischung [3.57]

Punkt A entspricht der relativen Dichte, die bei einem minimalen Wasserbindemittelwert w/b bzw. äquivalenten Wasserzementwert erreicht wird ($w/b \approx 0,08$). Wenn der äquivalente Wasserzementwert leicht erhöht wird, ersetzt das zusätzliche Wasser die eingeschlossene Luft. Die Rohdichte des Gemischs steigt dann an, da das Volumen konstant bleibt. Im Punkt C enthält das Gemisch keine eingeschlossene Luft mehr ($w/b \approx 0,13$). Die relative Dichte erreicht ihren maximalen Wert. Bei weiterer Steigerung des äquivalenten Wasserzementwertes vergrößert das zusätzliche Wasser das Volumen des Gemisches wieder. Die relative Dichte wird kleiner (Punkt E).

Nach [3.57] liegt die optimale relative Dichte k_{rel} bei 0,87 [3.57]. Diese relative Dichte ist bei zwei verschiedenen Wassergehalten möglich (Punkte B und D in Bild 3.8). Eine Probe entsprechend Punkt D ($w/b \approx 0,15$, $k_{rel} \approx 0,87$) zeigt bessere mechanische Eigenschaften als die zu Punkt B gehörende. Für den zu Punkt D gehörenden äquivalenten Wasserzementwert enthält die Probe weniger eingeschlossene Luft, dafür aber mehr Wasser. Dieses wird während der Hydratation teilweise in die feste Phase eingebaut. Damit liegt der optimale äquivalente Wasserzementwert zur Herstellung von ultrahochfesten Betonen im Bereich zwischen 0,13 und 0,15. Proben mit einem Wasserbindemittelwert von $\approx 0,15$ (Punkt D) zeigen gute rheologische Eigenschaften. Damit lässt sich dieser Beton leichter verarbeiten.

Das Modell beschreibt die Realität allerdings nur teilweise. In Gemischen mit maximaler relativer Dichte (Punkt C) beträgt der Gehalt an eingeschlossener Luft immer noch nahezu 2 %. Dies stellt aber nicht die Gültigkeit des Modells zur experimentellen Definition und Bestimmung des optimalen Wassergehaltes in Frage. Die Einfachheit der Bestimmung der relativen Dichte k_{rel} macht das Verfahren zu einem wesentlichen

Hilfsmittel, um Vergleiche zwischen verschiedenen UHFB-Mischungen anzustellen oder die erreichte Dichte des fertig verarbeiteten Betons zu überprüfen. Die Genauigkeit des Verfahrens ist jedoch beschränkt, zumal sie wesentlich durch zur Verfügung stehende Messtechnik und das die Messung durchführende Personal beeinflusst wird. Neue Entwicklungen führen letztendlich dazu, dass auch mit äquivalenten Wasserzementwerten oberhalb von 0,28, also vergleichbar einem üblichen hochfesten Beton, bereits Betonfestigkeiten von 180 N/mm^2 ohne zusätzliche Wärmebehandlung erreicht werden können, sofern die Packungsdichte des Feinstkorns optimal und damit der Wasser/Feststoffwert konstant niedrig bleiben, siehe Bild 3.9 [3.12].

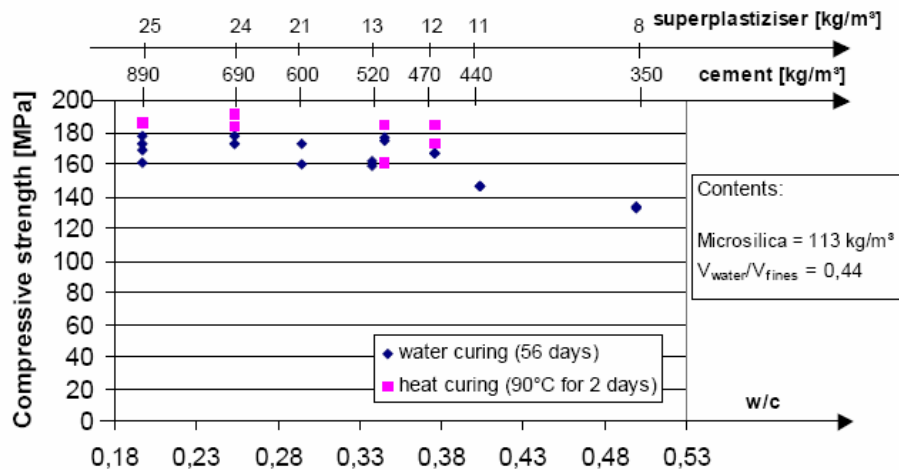


Bild 3.9: Entwicklung der Druckfestigkeit von kornoptimiertem UHFB in Abhängigkeit vom w/z-Wert (Probekörper: Zylinder 300 mm x 150 mm) [3.12]

Bei feinkörnigem UHFB führt der kleine Unterschied zwischen den Korngrößen der Gesteinskörnungen und des Feinstkorns zu einer sehr viel homogenen Matrix und damit zu einer deutlichen Reduktion der Anzahl und Größe von Mikrorissen, die Ausgangspunkte für Gefügeschädigungen infolge mechanischer, physikalischer und chemischer Beanspruchungen sind. Beim klassischen „RPC“ ist deshalb das Größtkorn auf rd. 0,8 mm begrenzt. Mittlerweile werden auch UHFB mit einem Größtkorn von 8 und 16 mm und einer Druckfestigkeit von $150\text{--}200 \text{ N/mm}^2$ hergestellt, ohne dass bislang nachteilige Mikrorisse festgestellt wurden. Die Übergangszone zwischen den Gesteinskörnern und der Matrix ist sehr dicht, die bei Normalbeton übliche Wasseranreicherung in der Kontaktzone [3.31, 3.60, 3.61] ist nicht mehr vorhanden, so dass die CSH-Phasen unmittelbar bis zum Gesteinskorn reichen.

Es ist darauf zu achten, dass für UHFB ausreichend feste Gesteinskörnungen gewählt werden, damit die Steifigkeit der Matrix (E_{ZM}) und der Gesteinskörnungen (E_{G}) möglichst gleich hoch ist. Bei äußerer Belastung sind die innere Verformung und damit die Spannungsverteilung innerhalb der Gefügestruktur gleichmäßiger. Dadurch wird die Betonmatrix sehr homogen, was sich letztendlich in den hohen Festbeton- und Dauerhaftigkeitseigenschaften widerspiegelt. Während bei normalfesten und hochfesten Betonen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 $E_{\text{G}}/E_{\text{ZM}}$ etwa 3 beträgt, sollte dieser Verhältniswert bei UHFB etwa 1,0 bis 1,4 nicht übersteigen.

3.7.3 Typische Mischungen

Die Tabelle 3.5 zeigt beispielhaft einige typische Rezepturen für UHFB. Sie können hinsichtlich ihres Festigkeitsniveaus in zwei Gruppen unterteilt werden. Die Grenze liegt dabei etwa bei rund 250 N/mm^2 . Betone mit Festigkeiten zwischen 250 und 800 N/mm^2 wurden bisher im Wesentlichen nur im Labor getestet [3.71]. Betone mit einer Druckfestigkeit zwischen 150 und 250 N/mm^2 aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen und unterschiedlicher Zusammensetzung wurden bereits in größerem Umfang praktisch eingesetzt (s. Abschnitt 2). Typische Zusammensetzungen zeigt Tabelle 3.5. Ihre Frisch- und Festbetoneigenschaften sind in den folgenden Abschnitten ausführlicher behandelt.

- [3.12] Bornemann, R.; Schmidt, M.: The Role of Powders in Concrete. 6th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete (Leipzig, 2002), S. 863-872
- [3.13] Bornemann, R.; Schmidt, M.: Feuerwiderstand ultra-hochfester Betone. beton 52 (2002), S. 418-422
- [3.14] Bornemann, R.; Faber, S.-G.: UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Vol. 3 (Kassel, 2004), S. 673-681
- [3.15] Casanova, P.; Dugat, J.; Orange, G.: „Ductal“: A new generation of Ultra High Performance Fiber reinforced concrete, HPC Symposium, Hong Kong, 2000
- [3.16] Cheyrezy, M.; Maret, V.; Frouin, L.: Analyse de la Microstructure du Béton de Poudres Réactives (BPR). In: Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux 1995, H. 311, S. 103-111
- [3.17] Cheyrezy, M.; Maret, V.; Frouin, L.: Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). In: Cement and Concrete Research 25 (1995), H. 7, S. 1491-1500
- [3.18] Cheyrezy, M.: Structural applications of RPC. In: Concrete 33 (1999), H.1, S. 20-23
- [3.19] Collepardi, M.; Coppola, L.; Cerulli, T.; Ferrari, C.; Pistolesi, C.; Zaffaroni, P.; Desroches, G.; Drapeau, A.: Acrylic-based superplasticizer. In: Fourth CANMET/ACI international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete (1994), Montreal, suppl. papers S. 1-18
- [3.20] Colloty T.; Troli R.: Materiali cementizi innovati: dagli HPC verso gli RPC. L'industria italiana de cemento, S. 112-125, Rom 1996
- [3.21] Dehn, F.: Untersuchungen zur Verwendung von Metakaolin für die Herstellung Ultrahochfester Betone, unveröffentlichter Bericht, Universität Leipzig/MFPA Leipzig, 2001
- [3.22] DIN-Fachbericht 100 „Beton“: Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, 1. Auflage 2001
- [3.23] Dugat, J.; Roux, N.; Bernier, G.: Étude Expérimentale de la Déformation sous Contrainte et du Comportement à la Rupture du Béton de Poudres Réactives (BPR). In: Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux 1995, H. 311, S. 112-121
- [3.24] Dugat, J.; Frouin, L.; Clavaud, B.: RPC: Microstructure analysis. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization og High-strength/High-performance concrete (1996), Paris, S. 1351-1357
- [3.25] Dugat, J.; Roux, N.; Bernier, G.: Mechanical properties of reactive powder concretes. Materials and Structures, Vol. 29, May 1996, pp. 233-240
- [3.26] De Larrard, F.: Ultrafine particles for the making of very high strength concretes. In: Cement and Concrete Research 19 (1989), S. 161-172
- [3.27] De Larrard, F.; Sedran, T.: Optimization of Ultra-High-Perfomance concrete by the use of a packing modell. In: Cement and Concrete Research 24 (1994), S. 997-1009
- [3.28] de Larrard, F.: Concrete mixture proportioning: a scientific approach. Modern Concrete Technology Series 9, E&FN Spon, London (1999)
- [3.29] Dowd, W. M.; O'Neill, E. F.: Development of reactive powder concrete (RPC) precast products for the USA market. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/ High-Performance Concrete (1996), Paris, S. 1391-1398
- [3.30] Droll, K.: Einfluss von Zusatzstoffen auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften von UHFB. In: Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hrsg.) – Berlin: Bauwerk, 2003
- [3.31] Fehling, E.; Schmidt, M.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC). Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau – Structural Materials and Engineering Series Vol. 1, kassel university press, Kassel (2005)
- [3.32] Feylessoufi, A.; Villiéras, F.; Michot, L.J.; De Donato, P.; Cases, J.M.; Richard, P.: Water Environment and Nanostructural Network in a Reactive Powder Concrete. In: Cement and concrete composites 18 (1996), H. 1, S. 23-29
- [3.33] Feylessoufi, A.; Crespín, M.; Dion, P.; Bergaya, F.; van Damme, H.; Richard, P.: Controlled rate thermal treatment of reactive powder concretes. In: Advanced Cement Based Materials 6 (1997), H. 1, S. 21-27

- [3.34] Feylessoufi, A.; Tenoudji, F. Cohen; Morin, V.; Richard, P.: Early ages shrinkage mechanisms of ultra-high-performance cement-based materials. In: Cement and concrete research 31 (2001), H. 11, S. 1573-1579
- [3.35] Gatty, L.; Bonnamy, S.; Feylessoufi, A.; van Damme, H.; Richard, P.: Silika Fume Distribution and Reactivity in Reactive Powder Concretes. In: Fly Ash, Silika Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete: /Proceedings Sixth CANMET/ACI International Conference/(Bangkok 1998) Volume 2/ American Concrete Institute (Hrsg.). – Farmington Hills: /ACI, 1998, S. 931-953
- [3.36] Geisenhanslüke, C.; Schmidt, M.: Methods for Modelling and Calculation of High Density Packing for Cement and Fillers in UHPC. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Vol. 3, Kassel (2004), S. 303-312
- [3.37] Schachinger, I.; Schmidt, K.; Heinz, D.: Zeitabhängiges Verformungsverhalten von UHFB. In: Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hrsg.) – Berlin: Bauwerk, 2003
- [3.38] Israel D.; Perbix W.: Microcements as building blocks in the microstructure of high performance concrete. In: The Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites. (zitiert in [3.60])
- [3.39] Kaptijn, N.; Nagtegaal, G.: Eerste toepassing van zeer-hogesterktebeton in civiele draagconstructie. In: Cement (niederl.) (2003), Heft 1, S. 92-94
- [3.40] Kleen, E.: Zusatzmittel für Ultrahochleistungsbeton. In: [3.41] König, G.; Nguyen Viet, T.; Zink, M.: Hochleistungsbeton – Bemessung, Herstellung und Anwendung, Ernst und Sohn, Berlin 2001
- [3.42] König R., Wagner J.P.: Mikrosilika – Baustoff aus der Zukunft. Handbuch der Fa. Woermann 2000
- [3.43] Lange F.: Gefügeuntersuchungen und Eigenschaften von Hüttensand enthaltenden Zementen, Dissertation Univ. Erlangen, 1996
- [3.44] Long G.; Wand X.; Xie Y.: Very-high-performance concrete with ultrafine powders. Cement and Concrete Research 32 (2002), S. 601-605
- [3.45] Loukili, A.; Khelidj, A.; Richard, P.: Hydration kinetics, change of relative humidity and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete. In: Cement and concrete research 29 (1999), H. 4, S. 577-584
- [3.46] Loukili, A.; Roux, N.; Arlott, D.; Feylessoufi, A.: Effects of a high reduction in the initial water content in cement based matrices. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance concrete (1996), Paris, S. 1367-1373
- [3.47] Markovic, I.; Walraven, J.C.; Mier, J.G.M. van: Beton mit Fasercocktails – ein neuer Hochleistungsbeton. 48. Ulmer Beton- und Fertigteiltag (2004)
- [3.48] Matte, V.; Moranville, M.: Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silika fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. In: Cement and concrete composites 21 (1999), H. 1, S. 1-9
- [3.49] Matte, V.; Moranville, M.; Adenot, F.; Richet, C.; Torrenti, J.M.: Simulated microstructure and transport properties of ultra-high performance cement-based materials. In: Cement and concrete research 30 (2000), H. 12, S. 1947-1954
- [3.50] Metha P.K.; Monteiro, P.J.M.: Concrete: Microstructure, Properties and Materials – Kap. 4 McGraw-Hill Comp. Inc., 2nd ed. 1993
- [3.51] Niu, Q.; Feng, N.; Yang, J.; Zheng, X.: Effect of superfine slag powder on cement properties. Cement and Concrete Research 32 (2002), S. 615-621
- [3.52] N. N.: The first RPC structure. In: Concrete Engineering International 2 (1998), H. 3, S. 23-26
- [3.53] Plank, J.; Hirsch, Ch.; Winter, P.; Chatziagorastou, P.: Neues zur Wirkungsweise von Polycarboylat-basierten Fließmitteln. In: 15. Internationale Baustofftagung (ibausil) 24.-27.09.2003 in Weimar, Band 1, S. 1-1393–1-1408
- [3.54] Reinhardt, H.-W.; Brameshuber, W.; Dehn, F.; Grube, H.; (u. a.): Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB). In: Schriftenreihe DAfStb Heft 516, Berlin 2001
- [3.55] Reschke, T.: Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. Schriftenreihe der Zementindustrie Band 62, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf (2001)
- [3.56] Richard, P.; Cheyrezy, M.: Les Bétons de Poudres Réactives. In: Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux 1995, H. 311, S. 85-102
- [3.57] Richard, P.; Cheyrezy, M.: Composition of reactive powder concretes. In: Cement and Concrete Research 25 (1995), H. 7, S. 1501-1511

- [3.58] Richard, P.: Reactive powder concrete: A new ultra-high-strength cementitious material. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete (1996), Paris, S. 1343-1349
- [3.59] Richard, P.; Cheyrezy, M.; Dugat, J.: Mortier à très haute performance, bétons obtenus à partir de ce mortier et les éléments fabriqués avec ce mortier ou béton. Publikationsnummer: 0 518 777 A1, Europäisches Patentamt, München/Paris 1992
- [3.60] RILEM Second International Conference on the Interfacial Transition Zone in cementitious composites, Haifa, Israel (1998), Proceedings edited by Katz A., Bentur A., Alexander M., Arliguie G., F & FN Spon, London and New York
- [3.61] Rudert V.; Strunge J.; Wihler H.D.: Beton aus anderer Sicht – Filigranes Mikrogefüge. Betonwerk- und Fertigteil-Technik BFT, Heft 9, 1984
- [3.62] Schachinger, I.: Untersuchungen an Hochleistungs-Feinkorn-Beton. In: Beiträge zum 38. DAfStb-Forschungskolloquium am 2. und 3. März 2000 an der Technischen Universität München, S. 55-66
- [3.63] Schmidt, M.; Fehling, E.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Bornemann, R.: Ultra-Hochfester Beton: Perspektive für die Betonfertigteilindustrie. In: Betonwerk- u. Fertigteil-Technik (BFT) (2003) H. 3, S. 16-29; Ebenso: Beton-Fertigteil-Jahrbuch 2003
- [3.64] Schmidt, M.; Geisenhanslüke, C.: Optimierung der Zusammensetzung des Feinstkorns von Ultra-Hochleistungs- und von Selbstverdichtendem Beton. In: beton (2005) H. 5, S. 224-235
- [3.65] Schneider, U.; Horvath, J.: Reactive Powder Concrete [RPC] – Entwicklung und Verhalten. In: Zement und Beton (2000), Heft 3, S. 8-13
- [3.66] Schneider, U.; Horvath, J.; König, G.; Dehn, F.: Materialverhalten von ultrahochfesten Betonen (UHFB). In: Beton- und Stahlbetonbau 96 (2001), H. 7, S. 468-477
- [3.67] Schneider, U.; Horvath, J.: Temperaturverhalten von UHFB. In: Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hrsg.) – Berlin: Bauwerk, 2003
- [3.68] Siebel, E.; Müller, C.: Geeignete Zemente für die Herstellung von UHFB. In: Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hrsg.) – Berlin: Bauwerk, 2003
- [3.69] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel. In: Beton 45 (1995), Heft 11, S. 802-808 und Heft 12, S. 876-881
- [3.70] Sylla, H.-M.: Reaktionen im Zementstein durch Wärmebehandlung. In: Beton 38 (1988) 11, S. 449-454
- [3.71] Teichmann, T.; Schmidt, M.: Influence of the Packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC. Proc. International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel (2004), S. 313-323
- [3.72] Torrenti, J. M.; Matte, V.; Maret, V.; Richet, C.: High integrity containers for interim storage of nuclear wastes using reactive powder concrete. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance concrete (1996), Paris, S. 1407-1413
- [3.73] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 2: Beton, Mauerwerk. 3. Aufl. Wiesbaden: Bauverlag, 1993
- [3.74] Zanni, H.; Cheyrezy, M.; Maret, V.; Philippot, S.; Nieto, P.: Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using Si NMR. In: Cement and Concrete Research 26 (1996), H. 1, S. 93-100
- [3.75] Nehdi, M.; Mindess, S.; Aitcin, P.C.: Rheology of high-performance concrete: Effect of ultra fine particles. In: Cement and Concrete Research, Vol. 28, No.5, pp. 687-697, 1998
- [3.76] Bonneau, O.; Vernet, C.; Moranville, M.: Optimization of the rheological behavior of reactive powder concretes. In: Intern.Symp. on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Aug. 16-20, 1998, Sherbrooke (Quebec) Canada, Vol. 3, 99-118
- [3.77] Schmidt, M.; Teichmann, T.: New Developments in Ultra-High-Performance Concrete – Non corrosive PVA-fibres and glueing of structural elements. Proceedings 3. fib-congress, Naples 2006.
- [3.78] Bornemann, R.; Schmidt, M.; Fehling, E.; Middendorf, B.: Ultra-Hochleistungsbeton UHPC – Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten. Sonderdruck aus: Beton- und Stahlbetonbau 96, H. 7, S. 458-467, 2001.
- [3.79] Schmidt, M.; Bornemann, R.: Ultrahochfester Beton (UHPC) – Herstellung und Anwendung. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT) (2002), H. 2, S. 10-12

- [3.80] Long,G.;Wang,X.;Xie,Y.: Very-high-performance concrete with ultra fine powders. In: Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 01-605, 2002
- [3.81] Coppola, L.; Troli, R.; Collepardi, S.; Borsoi, A.; Cerulli, T.; Collepardi, M.: Materiali cementiti innovati: dagli HPC verso gli RPC. In: L'industria italiana del cemento, Band 707 (1996), S. 112-125.
- [3.82] Nehdi, M.; Mindess, S.; Aitcin, P.C.: Rheology of high-performance concrete: Effect of ultra fine particles. In: Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 5, pp. 687-697, 1998
- [3.83] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ausgabe Juni 2001.
- [3.84] Okamura, H.; Kazumasa, O.: Mix design for self-compacting concrete. In: (Translation from Proc. of JSCE, No. 496/V) concrete library of JSCE, No. 25, 6/1995, S. 107-120.
- [3.85] Mazanec, Oliver: Untersuchungen des Einflusses von Silikastaub auf die Verarbeitungs- und Festigkeitseigenschaften von ultrahochfestem Beton an Mischungen mit unterschiedlichen Korndurchmessern und Nachbehandlungsverfahren unter gleichzeitiger Entwicklung geeigneter Mischungsrezepturen und Verfahrensanweisungen. Diplomarbeit an der Fachhochschule München, März 2003.
- [3.86] Bornemann, R.; Teichmann, T.; Schmidt, M.: Einfluss der Zusammensetzung auf die Verarbeitbarkeit, die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit von UHFB. In: Ultrahochfester Beton – Innovationen im Bauwesen, Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2003, ISBN 3-89932-045-x, S. 55-66

4 Herstellung von UHFB

4.1 Allgemeines

UHFB können als vorgefertigte Werk trockenmischungen [4.1] oder in entsprechend ausgerüsteten Betonwerken aus Einzelkomponenten hergestellt werden [4.2, 4.3, 4.4]. Für die gleichmäßige Dosierung aller Einzelkomponenten und das homogene Mischen sind leistungsfähige, ausreichend genaue Einrichtungen erforderlich. Dies gilt insbesondere für den Mischer, der auf das Mischen von feinkörnigen Stoffen mit einem hohen Anteil an feinsten Partikeln [4.2] und das gleichmäßige Einmischen von Fasern ausgelegt sein muss.

Es ist in jedem Einzelfall erforderlich, realitätsnahe Misch- und Verarbeitungsversuche durchzuführen, um die Wirkung des Mixers, die maximale Befüllung des Mixers, die optimale Reihenfolge bei der Zugabe der Einzelkomponenten, die erforderliche Mischzeit, die zulässige Verarbeitungszeit etc. festzustellen und die Betonzusammensetzung erforderlichenfalls anzupassen. Gleiches gilt auch für die Förderung des zwar im Allgemeinen leicht verarbeitbaren, aber etwas zäh fließenden Betons und das Vorgehen bei der Herstellung der Bauteile [4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9].

4.2 Mischen

Bei der Herstellung aus Einzelkomponenten sollten die einzelnen Komponenten getrennt in Silos aufbewahrt werden. Pulverförmiges Microsilica muss während der Lagerung vor Feuchtigkeit geschützt werden, um Agglomerationen zu vermeiden. Die gleichmäßige Verteilung insbesondere längerer Fasern im Beton wird gefördert, wenn sie vor der Zugabe in den Mischer vereinzelt werden, z. B. auf Rüttelsieben o. Ä. Zusammenballungen („Igel“) sind vorher aufzulösen, ihre Neubildung im Mischer zu vermeiden.

Grundsätzlich können zur Herstellung von UHFB die für „übliche“ Normal- und Hochleistungsbetone bekannten Misch- und Dosiertechnologien verwendet werden, z. B. Teller- oder Trogmischer mit zusätzlichen Wirblern. Der Beton für die Fertigteile der Gärtnerplatzbrücke wurde z. B. mit dem im Fertigteilwerk vorhandenen Mischer gleichmäßig gemischt [4.2, 4.5]. Voraussetzung ist, dass feinstkornreiche Stoffe und flüssige Zusatzmittel ausreichend genau dosiert und in einer begrenzten Zeit gleichmäßig miteinander vermischt werden können und dass dabei die Zusatzmittel ebenfalls gleichmäßig verteilt und vollständig aufgeschlossen werden. Bewährt haben sich Hochleistungsmischer [4.6], bei denen die Mischenergie gesteuert werden kann. Vakuummischer verhindern zusätzlich, dass während des Mischvorganges Luft in den Beton eingetragen wird. Günstig ist es, wenn der Mischprozess überwacht werden kann, z. B. durch Messung und Aufzeichnung der Energieaufnahme des Mixers.

Die Beschickung des Mixers ist ebenfalls von Bedeutung [4.7, 4.8, 4.9]. Üblicherweise werden zunächst alle trockenen Bestandteile (feine und grobe Gesteinskörnungen, Gesteinsmehle, Zement, mehlfeine/reaktive Betonzusatzstoffe) in die Mischtrommel gegeben. Nach einer entsprechenden Trockenmischzeit zum Vermischen der Bestandteile kommen dann die flüssigen Komponenten hinzu. Hier gibt es unterschiedliche Ansätze, wie z. B. die getrennte Dosierung des Fließmittels und des Wassers oder aber deren vorherige Mischung. Grundsätzlich sollten die Betonzusatzmittel und das Wasser zuletzt in den Mischer gegeben werden. Insbesondere bei der Zugabe des Microsilica sowohl als Pulver als auch als Suspension ist darauf zu achten, dass keine Klumpen entstehen. Ggf. muss dazu die Mischreihenfolge geändert werden.



Bild 4.1: Herstellung von ultrahochfestem Beton im Tellermischer

Werden Fasern (Stahl- oder Kunststofffasern) verwendet, so werden diese erst dann zugegeben, wenn die Wirkung des Fließmittels eingesetzt hat. Erst dann ist eine gleichmäßige Verteilung der Fasern zu erreichen. Anschließend wird der ultrahochfeste Beton nochmals ausreichend lange durchmischt, bis die Fasern

augenscheinlich homogen im Beton verteilt sind. Bild 4.1 zeigt mit einem konventionellen Tellermischer hergestellten UHFB beim Entleeren der Mischtrommel. Die Mischzeit kann verkürzt und die Mischwirkung verbessert werden, wenn in zwei Phasen gemischt wird: zunächst mit hoher, danach mit reduzierter Mischgeschwindigkeit (z. B. in [4.8] zunächst rd. 6, danach rd. 1,4 m/s). Bei Versuchen an zahlreichen Prüfstellen war die Konsistenz des Betons auch dann besonders niedrig, wenn der Mischvorgang durch eine etwa 1–2-minütige Ruhepause unterbrochen wurde [4.9].

Die Mischzeit ist in aller Regel deutlich länger als bei Normalbeton. Sie kann 10–15 min betragen. Bei größeren Mischchargen ist zu berücksichtigen, dass sich der bindemittelreiche Beton während des Mischens insbesondere bei sehr hoher Mischenergie z. T. stärker erwärmt, was die Verarbeitungszeit verkürzen kann. Je nach Kombination der Ausgangsstoffe kann deshalb ein übermäßiges Mischen des UHFB zu einem schnellen Ansteifen des Frischbetons führen. Erforderlichenfalls sind die Ausgangsstoffe zu kühlen, z. B. bei hohen Umgebungstemperaturen.

Das nahezu selbstverdichtende, sedimentationsstabile Verhalten des Frischbetons eines gleichmäßig gemischten UHFB zeigt Bild 4.2, das Umfließen der Bewehrung Bild 4.3.

Gleichmäßig gemischte, nahezu luftporenfreie UHFB mit fließfähiger, nahezu selbstverdichtender Konsistenz sollten möglichst wenig gerüttelt werden, um z. B. die Anreicherung von Luftporen an der Oberfläche oder die Sedimentation der Stahlfasern zu vermeiden. Wird der Beton entlüftet, so sollte dies mit einer möglichst geringen Frequenz und Amplitude, dafür ggf. länger als bei Normalbeton erfolgen, da die Luft aus dem leicht zähen Beton langsamer entweicht.

Störend kann das Anhaften des wegen seines hohen Feinstkorngehaltes leicht etwas klebrigen Betons an den Misch- und Einbaugeräten sein. Auch aus diesem Grund sind nahezu selbstverdichtende Verarbeitungseigenschaften anzustreben.

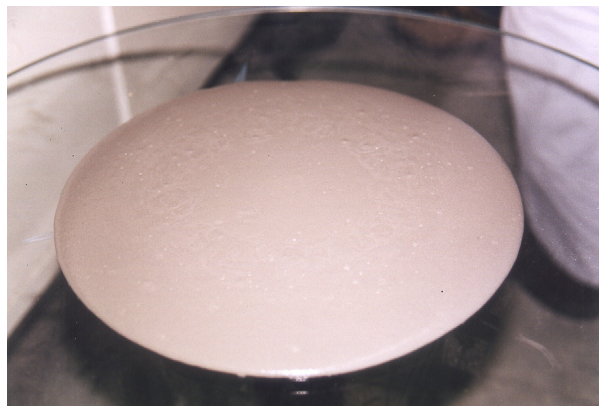


Bild 4.2: UHFB mit nahezu selbstverdichtenden Eigenschaften, gemessen am Mörteltrichter



Bild 4.3: UHFB mit Fasern beim Umfließen der Bewehrung

Um Luftporen zu vermeiden, kann ein Vakuummischer verwendet werden. In der letzten Mischphase wird ein Unterdruck erzeugt und die durch das intensive Mischen eingetragene Luft wird ausgetrieben. Das Teilvakuum muss so gewählt werden, dass bei einer Mischtemperatur von 30 °C noch kein Wasser verdampft. Bild 4.4 zeigt einen für Laborzwecke gebräuchlichen Vakuummischer. Vakuummischer gibt es mit unterschiedlichem Fassungsvermögen bis zu 7 m³ [4.6].



Bild 4.4: Vakuummischer zur Herstellung von UHFB

UHFB wurde bislang bis auf wenige Einzelfälle praktisch ausschließlich im Fertigteilwerk hergestellt. Wird er als Transportbeton hergestellt, muss der Erstarrungsbeginn auf die erforderliche Transport- und Verarbeitungszeit eingestellt werden. Insbesondere unter Berücksichtigung ungünstigster Witterungseinflüsse, wie z. B. hohe Temperaturen, muss die Konsistenzentwicklung beobachtet werden. Im Rahmen der erweiterten Erstprüfungen ist eine mögliche Nachdosierung von Fließmittel auf der Baustelle zu untersuchen (Bild 4.5).



Bild 4.5: Entmischen eines UHFB bei zu hoher Fließmitteldosierung und Temperatur

Bei der Herstellung von UHFB im Fertigteilwerk kann aufgrund der deutlich reduzierten Transportwege und Einbauzeiten auf eine Nachdosierung üblicherweise verzichtet werden.

4.3 Transportieren, Fördern, Lagern und Einbauen

Ultrahochfester Beton lässt sich i. d. R. mit Betonpumpen fördern oder mit Kübeln und ausreichend dimensionierten Schläuchen in die Schalung einbringen [4.2, 4.3, 4.5]. Der Beton sollte nicht frei in die Schalung „fallen“, weil dabei zusätzliche Luft eingetragen wird, die insbesondere bei höheren Schalungen

nur schwer wieder auszutreiben ist. Beim Pumpen kann je nach Konsistenz, Pumpendruck, Förderweg etc. die Frischbetontemperatur signifikant ansteigen. Je nach Zusammensetzung und Viskosität des Frischbetons sind bei faserfreien UHFB ähnlich wie für selbstverdichtenden Beton auch größere Einfüllhöhen möglich, ohne dass sich der UHFB entmischt. Bei faserhaltigem UHFB sollten der Beton auch deshalb möglichst stetig fließen und nicht in die Schalung fallen, weil sich sonst die Fasern entmischen oder u. U. ungünstig und ungeplant orientieren, so dass sie sich später nicht ausreichend an der Lastaufnahme beteiligen.

Erfahrungsgemäß orientieren sich Stahlfasern beim Fördern und laminaren Fließen des Betons bevorzugt in Fließrichtung, beim Verdichten bevorzugt in eine horizontale Lage und an Schalungen bevorzugt parallel zur Schalung. Treten turbulente Strömungsverhältnisse auf – z. B. an Hindernissen in der Fließbahn, an Übergangsstellen des Förderweges u. Ä. – kann es zu Verwirbelungen kommen. Bei zu intensiver Verdichtung und/oder zu niedriger Viskosität können die Fasern im Frischbeton absinken und sich in bestimmten Bereichen des Bauteils anreichern.

Die Faserorientierung kann u. a. durch die Wahl der Betonierrichtung der Bauteile (stehend/liegend), durch die Fördereinrichtung (Rinnen, Rohre, Schläuche), die Konsistenz, die Fließgeschwindigkeit und ggf. durch Einbauten in den Strömungswegen beeinflusst werden. Das günstigste Vorgehen ist im Einzelfall durch Vorversuche zu ermitteln [4.10].



Bild 4.6: Stehende Schalung für die 2,20 x 5,00 x 0,08 m großen Deckenplatten der Gärtnerplatzbrücke in Kassel (Fa. ELO Betonwerk, Eichenzell)



Bild 4.7: Einbringen von UHFB in die Schalung der Deckenplatten für die Gärtnerplatzbrücke

Bild 4.6 zeigt die stehende Schalung für die Fahrbahnplatten der Gärtnerplatzbrücke in Kassel und Bild 4.7 das Einbringen des UFHB mit einem Schlauch. In Bild 4.8 und Bild 4.9 sind die bis zu 36 m langen Obergurte mit einem Querschnitt von 0,30 x 0,40 m beim Betonieren und als fertige Bauteile nach der Wärmebehandlung dargestellt.



Bild 4.8: Betonieren der bis zu 36 m langen, vorgespannten Obergurte (Fa. ELO Betonwerk, Eichenzell)



Bild 4.9: Obergurte nach der Wärmebehandlung

4.4 Anforderungen an die Schalung

Die Schalung für fließfähige UFHB muss die gleichen Anforderungen erfüllen wie bei selbstverdichtendem Beton. Die Schalung muss vor allem ausreichend dicht sein und dem hohen Flüssigkeitsdruck des Betons standhalten.

Bei Sichtbeton ist zu beachten, dass jede Unregelmäßigkeit in der Schalung im Bauteil abgebildet wird. Der zementleimreiche Beton ermöglicht es andererseits, durch eine entsprechende Wahl der Schalung die Oberfläche in besonderer Weise zu gestalten: Die Schalung kann z. B. von einheitlich spiegelglatt bis hin zu sehr filigran ausgebildeten feinen oder groben Strukturen variiert werden.

4.5 Verdichtung

Die Verdichtung des Betons erfolgt im Fertigteilwerk zumeist mit Außenrüttlern, z. T. auch mit Innenrüttlern (Flaschenrüttler). Dabei ist bei faserhaltigen UHFB darauf zu achten, dass keine faserfreien Rüttelgassen entstehen oder die Fasern ungünstig orientiert werden. Die Flaschen sollten möglichst nicht zu groß sein und nicht durch den Beton gezogen werden. Die Eintauchstellen für die Rüttelflaschen sind enger zu setzen als bei Normalbeton. Auch hier ist die Faserorientierung zu beachten.

Wird UHFB als Ortbeton verarbeitet, können die für Hochleistungsbeton bekannten Verdichtungsgeräte verwendet werden. Für zäh-viskosen UHFB ist erfahrungsgemäß eine höhere Verdichtungsenergie notwendig. Daraus resultiert auch eine schwierigere Entlüftung des Frischbetons, es sei denn, der Beton wird mit einer sehr fließfähigen Konsistenz hergestellt.

Beim lagenweisen Betonieren müssen die Einzellagen beim Verdichten miteinander vermischt („vernadelt“) werden, d. h., Rüttelflaschen müssen bis in die untere Lage abgesenkt werden. Beim Betonieren von Platten o. Ä. sollte der Beton jeweils homogen auf volle Höhe eingebaut werden.

4.6 Oberflächenbearbeitung und Nachbehandlung

Eine Besonderheit, die bei der Verarbeitung von UHFB beachtet werden muss, ist die Nachbearbeitung der Betonoberfläche. Durch die Klebrigkeit des Frischbetons ist nur eine eingeschränkte Nachbearbeitung möglich, es sei denn, die Zusammensetzung des UHFB wird entsprechend darauf abgestimmt. Vielfach reicht es nicht aus, die Betonoberfläche einfach abziehen, um eine glatte Oberfläche zu erhalten. Als günstig hat sich hierfür eine leichte Rüttelbohle mit schwacher Frequenz erwiesen. Jedoch hängt deren positive Wirkung entscheidend vom Zeitpunkt der eingeleiteten Nachbearbeitung ab. Ist der Beton noch nicht genügend angesteift, wird die Oberfläche sukzessive aufgerissen. Dagegen ist eine Oberflächenbearbeitung kaum noch möglich, wenn der Beton ungenügend nachbehandelt wurde und schon erstarrt ist. Für die Verwendung von UHFB als Ortbeton sind diese Aspekte weitaus kritischer zu betrachten als im Fertigteilwerk. Bei unsachgemäßer Nachbehandlung, z. B. ungenügendem Schutz der freien Oberfläche vor Austrocknen und Sonneneinstrahlung, kann es zur Bildung einer unebenen so genannten „Elefantenhaut“ kommen (s. Bild 4.10).



Bild 4.10: Bildung einer sog. „Elefantenhaut“ bei unsachgemäßer Nachbehandlung der freien Oberfläche (direkte Sonneneinstrahlung)



Bild 4.11: Abdecken einer freien UHFB-Oberfläche mit Folien und Schalungstafeln

Die effektivste Methode, um das Austrocknen zu verhindern, ist das sofortige, luftdichte Abdecken der Oberfläche oder ggf. auch eine ständige Feuchtezufuhr. Besonders wirksam ist das direkte Applizieren/Aufsprühen von geeigneten Nachbehandlungsmitteln auf die Oberfläche, bevor die Folie aufgelegt wird. Dadurch können sowohl der Elefantenhaut vorgebeugt als auch schwindbedingte Oberflächenrisse vermieden werden (Bild 4.11).

4.7 Wärmebehandlung und Autoklavierung

Um früh eine hohe Festigkeit zu erreichen und um das autogene Schwinden von Fertigteilen vor der Montage vorwegzunehmen, wird ultrahochfester Beton im Fertigteilwerk meist einer Wärmebehandlung unterzogen [4.2, 4.5, 4.11]. Die Wärmebehandlung beginnt nach einer mindestens 24-stündigen Vorlagerung des Betons, wobei er dauernd feucht gehalten wird. Danach wird er langsam auf 70 bis 90 °C bei normalem oder erhöhtem Druck (Autoklavbehandlung) erwärmt. Üblich ist, den Beton für rd. 2 Tage, gegen Austrocknen geschützt, bei dieser Temperatur zu lagern. Er hat dann im Allgemeinen seine Endfestigkeit erreicht. Auch andere Behandlungstemperaturen zwischen 40 und 160 °C über ein bis maximal sieben Tage sind möglich. Bei massiveren Bauteilen kann die hohe Hydratationswärme des zementreichen Betons als „innere“ Wärmebehandlung genutzt werden. Dies bedingt jedoch entsprechende Maßnahmen, wie z. B. wärmedämmende Schalungen oder Abdeckungen, um die Zwangsspannungen beim Abkühlen zu begrenzen. In jedem Fall sind Vorversuche erforderlich.

Die Wärmebehandlung bei Temperaturen bei oder über 90 °C beschleunigt die puzzolanische Reaktion des Silikastaubes. Zusätzlich wird die Mikrostruktur der bei diesen Temperaturen entstehenden Hydratphasen modifiziert, siehe Abschnitt 6.2.1. Sehr wichtig bei der Wärmebehandlung ist ein langsames Aufheizen und Abkühlen, damit die Verbesserung der Mikrostruktur nicht durch thermisch bedingte Mikrorisse wieder aufgehoben wird. Eine Erwärmung bei hohen Temperaturen zwischen 250 und 400 °C führt zur Bildung von kristallinen Hydraten (Xonotlit), begleitet von einer starken Dehydratisierung der CSH-Phasen der erhärtenden Zementmatrix, da durch das starke Erhitzen in den abgeschlossenen Poren die hygrothermalen Bedingungen zur Bildung derartiger kristalliner Phasen vorhanden sind. Das heißt, aufgrund der hohen Diffusionsdichte von UHFB tritt eine Art „Selbstautoklavierungseffekt“ ein [4.11]. Ausreichende praktische Erfahrungen mit hohen Temperaturen über rd. 90 °C liegen noch nicht vor.

4.8 Qualitätssicherung

Um eine gleichmäßige Qualität des UHFB zu gewährleisten, ist eine konsequente Qualitätssicherung (QS) notwendig, die in einem QS-Plan dokumentiert werden muss. Darin sind die Verantwortlichkeiten, die vorgesehenen Misch- und Einbauverfahren, die zulässigen Toleranzen bei der Herstellung (Dosierung der Betonzusatzstoffe und -mittel, Wassergehalt etc.) und die entsprechenden Maßnahmen bei Abweichungen genau festzulegen. Für die Erstellung und Überwachung der gesamten, die Baumaßnahme begleitenden Qualitätssicherung muss für UHFB ein bereits mit anderen Hochleistungsbetonen (hochfester Beton, selbstverdichtender Beton etc.) vertrauter Ingenieur zuständig sein. Einige Bestandteile der Qualitätssicherungspläne in den DAfStb-Richtlinien Hochfester Beton (HFB) und Selbstverdichtender Beton (SVB) sowie die in DIN 1045-2 und DIN EN 206-1 gemachten Vorgaben können auch auf UHFB übertragen werden. Dazu zählen beispielsweise:

- eine Kurzbeschreibung des Bauvorhabens;
- die Verantwortlichkeiten;
- die zu verwendenden Ausgangsstoffe, ihre Eingangsüberwachung, zulässige Abweichungen und Maßnahmen bei ihrer Überschreitung;
- ein Misch- und Betonierplan sowie eine entsprechende Arbeitsanweisung;
- Festlegungen zu den erforderlichen Frisch- und Festbetonprüfungen in der Erstprüfung und während der Produktion, der Verarbeitung und am fertigen Bauwerk, wie etwa Prüfungen im Transportbeton- oder Fertigteilwerk bzw. erweiterbare Vorgaben im WPK-Handbuch (Mischanweisung, Dosierungsplan etc.);
- Prüfungen auf der Baustelle bei Ortbeton;
- Herstell- und Versuchsversuche.

Im Herstell- und Versuchsversuch muss die in der Erstprüfung entwickelte UHFB-Rezeptur nach den im QS-Plan festgelegten Vorgaben beprobt und untersucht werden. Der Versuchsversuch hat im Wesentlichen folgende Ziele:

- Festlegungen und Erprobung nicht routinemäßiger Abläufe der Betonherstellung und -verarbeitung;
- Prüfung des Mischablaufes (Mischreihenfolge, Mischzeit, Chargengröße etc.);
- Prüfung des zeitlichen Ablaufes vom Mischen bis zum Einbau, einschließlich der Nachbehandlung, unter realen Bedingungen, d. h. z. B. unter Berücksichtigung der Außentemperatur und Windeinwirkung auf der Baustelle oder im Fertigteilwerk;
- Einüben der Verarbeitungsmannschaft.

Noch wesentlich wichtiger als bei anderen Hochleistungsbetonen (HFB, SVB) ist bei UHFB die gleichmäßige Qualität und Zusammensetzung der Ausgangsstoffe. Bereits vergleichsweise geringe Abweichungen von den Sollvorgaben können zu einem anderen Betonverhalten führen.

So sind z. B. für die mehlfeinen Bestandteile (Feinkorngemisch) neben der Packungsdichte [4.4] und dem Wasseranspruch (Verfahren nach Puntke oder Okamura) auch die Mahlfineinheit und die Rohdichten zu bestimmen. Gleiches gilt für den Zement, wobei hier zusätzlich dessen Zusammenwirken mit dem Fließmittel rheologisch untersucht werden sollte [4.12]. Am Feinbeton und am Bindemittelleim grober UHFB sollte zusätzlich regelmäßig die Viskosität geprüft werden. Ein Fließmittel-basierter Ansatz für die zielsichere Zusammensetzung der Feinstoffmatrix ist in [4.13] beschrieben.

Für die Gesteinskörnungen ist mittels Siebversuche die Einhaltung der vereinbarten Anforderungen (Mehlkorngehalt, $d_{\max}$ etc.) zu überprüfen. Die Prüfhäufigkeit ist im QS-Plan festzulegen.

4.9 Prüfverfahren

Das Frischbetonverhalten ultrahochfester selbstverdichtender Betone sollte wie bei SVB geprüft werden. Geeignete Verfahren für die Konsistenz- und Verarbeitbarkeitsprüfung sind neben dem Ausbreitmaß (mit und ohne schlagende Beanspruchung) das Setzfließmaß und die Messung der Trichterlaufzeit. Wichtig ist es, in der Erstprüfung die Wirkung der zuvor ausgewählten Fließmittel auf das Feinstoffgemisch (Zement, Gesteinsmehle und Microsilika) auch anhand der Viskosität (Viscocorder, Viscomat) festzustellen und Referenzwerte für die Produktion und für Überprüfung neuer Lieferungen der Ausgangsstoffe und eine eventuell notwendige Anpassung der Fließmittelmenge festzulegen. Weitere Hinweise zur Prüfung von UHFB enthalten die nachfolgenden Abschnitte.

4.10 Literatur zum Abschnitt 4

- [4.1] Bonneau, O.; Richard, P.; Aitcin, P.C.: Scientific Approach of the industrial use of reactive powder concretes (RPC). In: 199 WABE International Symposium on Cement and Concrete, Montreal, March 30-31, S. 127-138
- [4.2] Schmidt, M.: Einsatz von UHPC beim Bau der Gärtnerplatzbrücke in Kassel. Beton 57 (2007), H. 6, S. 252-255
- [4.3] Bauer, E.; Herget, E.: Ultrahochfeste Betonfertigteile am Beispiel der Gärtnerplatzbrücke in Kassel. In: VDB-Report 13: Beton – Entwicklungen und Tendenzen. Verein Deutscher Betoningenieure, Beckum 2007, S. 48-61
- [4.4] Schmidt, M.; Geisenhanslüke, C.: Einfluss des Feinstkorns auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von Ultra-Hochleistungs- und von Selbstverdichtendem Beton. In: Beton (2005), H. 4.
- [4.5] Goldbach, U.; Stehling, S.: Precasting of UHPC Elements. Proc. 2nd Int. Symposium on UHPC, Kassel 2008, S. 589-596
- [4.6] Orgass, M.; Dehn, F.: Einfluss der Mischtechnik bei Hochleistungsbetonen, Betonwerk- und Fertigteiltechnik (BFT), H. 1
- [4.7] Dehn, F.; Orgass, M.; König, A.: Einfluss unterschiedlichster Mischparameter auf die Frischbetoneigenschaften von ultrahochfestem Faserbeton, BWI – Betonwerk International 2007, H. 4, S. 44-52
- [4.8] Mazanec, O.; Schießl, P.: Mixing Time Optimisation for UHPC. Proc. 2nd Int. Symposium on UHPC, Kassel 2008, S. 401-408
- [4.9] Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): Schwerpunktprogramm 1182, Nachhaltiges Bauen mit UHPC. Zusammenstellung der Vorgehensweise beim Mischen und Herstellen von UHPC im Labor. Universität Kassel, 2007 (Veröffentlichung vorgesehen)
- [4.10] Kim, S. W.; Kang, S. T.; Park, J. J.; Ryu, G. S.: Effect of Filling Method on Fibre Orientation and Dispersion and Mechanical Properties of UHPC. Proc. 2nd Int. Symposium on UHPC, Kassel 2008, S. 185-194
- [4.11] Philip, U.; Dehn, F.; Schreiter, P.: Temperatureinfluss auf die Phasen- und Gefügebildung von UHPC. In: Ultrahochfester Beton, Bauwerk Verlag, Berlin 2003, S. 79-88
- [4.12] Geisenhanslüke, C.; Schmidt, M.; Krelaus, R.: Wirkung von Fließmitteln auf Zusatzstoffe im Beton. Proc. 16, IBAUSIL, Weimar 2006
- [4.13] Lohaus, L.; Ramge, P.: Robustness of PHPC – A New Approach for Mixture Proportioning. 2nd Int. Symposium on UHPC, Kassel 2008, S. 113-120

5 Eigenschaften des jungen Betons

5.1 Allgemeines

Die Behinderung von Formänderungen führt zu Zwangsspannungen. Insbesondere in jungem Alter ist, durch die gegenüber der Entwicklung des statischen E-Moduls verzögerten Festigkeitsentwicklung (siehe Bild 5.1), die Gefahr der Rissbildung infolge von Zwangsspannungen hoch.

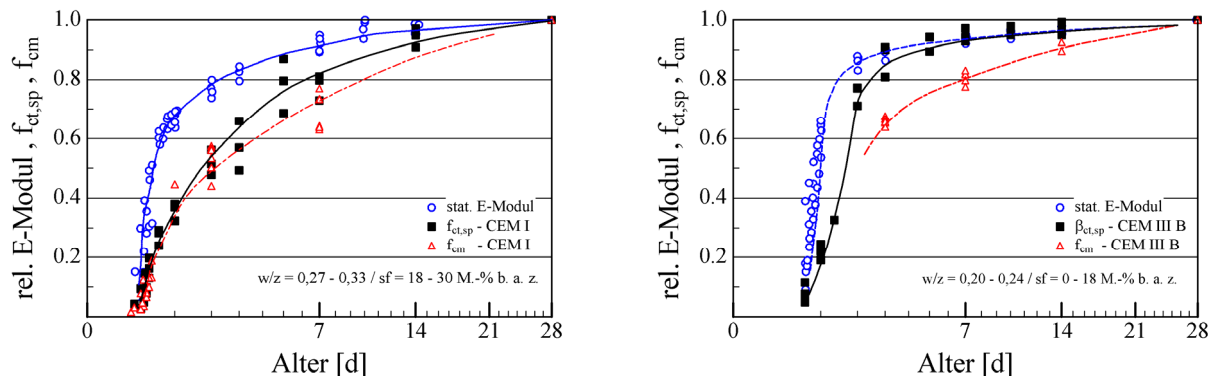


Bild 5.1 Entwicklung der mechanischen Eigenschaften von ultrahochfesten Betonen (links: Betone mit Portlandzement; rechts: Betone mit Hochofenzement) aus [5.1]

Die Ursachen für eine Verkürzung des ultrahochfesten Betons im jungen Alter, welches hinsichtlich der Rissbildung die maßgebende Formänderung darstellt, lassen sich ihrer Entstehung nach einteilen in:

- Austrocknung,
- Abfließen der Hydrationswärme,
- chemisches und autogenes Schwinden.

Während die Austrocknung des jungen Betons im oberflächennahen Bereich üblicherweise durch eine geeignete Nachbehandlung verhindert wird, sind die letzten beiden Punkte aufgrund des hohen Zementgehaltes und des geringen w/z-Wertes von UHFB hinsichtlich der auftretenden Verkürzung maßgebend.

5.2 Zwangsspannungen im jungen Alter

Die Verkürzung durch Schwindverformungen oder Abfließen der Hydrationswärme kann z. B. durch eine steife Schalung oder durch einen steifen Untergrund ganz oder teilweise behindert werden. Die Größe der daraus resultierenden Zwangsspannungen hängt von:

- der Verformung,
- dem Behinderungsgrad und
- dem statischen E-Modul

zum jeweiligen Zeitpunkt ab.

Infolge der großen Relaxationsfähigkeit von UHFB im jungen Alter werden in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung rd. 80 bis 90 % der Zwangsspannungen innerhalb des ersten Tages abgebaut [5.2].

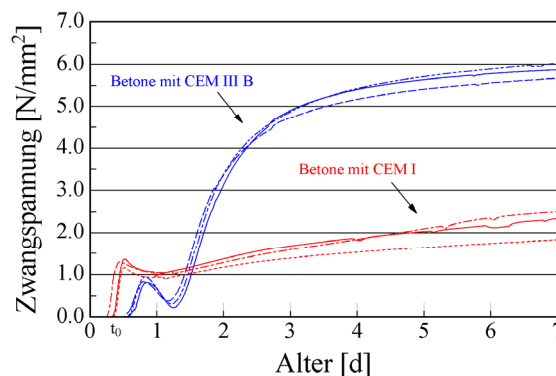


Bild 5.2: Einfluss der Zementart auf die Entwicklung der Zwangsspannungen von ultrahochfestem Beton im starren Reißrahmen aus [5.3]

In [5.3] wurden die auftretenden Zwangspannungen im starren Reißrahmen gemessen (siehe Bild 5.2). Der Behinderungsgrad im starren Reißrahmen nahm von anfänglich 100 % mit dem Ansteigen des statischen E-Moduls auf 48 000 N/mm² im Alter von 28 Tagen auf rd. 80 % ab. Derartige Behinderungsgrade werden z. B. im Rahmen einer nachträglichen Verstärkung eines Betonbauteils durch eine UHFB-Schicht erreicht. Diesbezügliche Untersuchungen von Habel [5.4] bestätigen das Auftreten von Zwangspannungen von 4 N/mm² im Alter von 7 Tagen.

Der Verlauf der Zwangspannungsentwicklung entspricht qualitativ dem Verlauf der gemessenen Schwindverformungen (vgl. Bild 5.2 und Bild 6.1). Die große anfängliche Schwindverformung der UHFB mit Portlandzement (CEM I 42,5 R-HS) führte nach 12 Stunden trotz des noch geringen E-Moduls zu einem Ansteigen der Zwangspannungen (zentrischer Zug) auf 1,3 N/mm² (siehe Bild 5.5).

Demgegenüber zeigten sich die UHFB mit Hochofenzement (CEM III B 42,5 NW/HS) wesentlich gutmütiger. Im Zuge der weiteren Hydratation stiegen die Zwangspannungen bei den Betonen mit Hochofenzement deutlich schneller an (vgl. Bild 5.2). Ursache hierfür ist, die nach einem Tag reduzierte Relaxationsfähigkeit und der infolge fortgeschrittener Hydratation höhere statische E-Modul. Nach 1,5 d zu Beginn der weiteren Schwindverformung der UHFB mit Hochofenzement betrug dieser bereits rd. 35 000 N/mm².

Beim Einsatz von FM-Wirkstoffen zur Erzielung hoher Frühfestigkeiten bauen sich in jungem Alter von wenigen Stunden höhere Zwangspannungen auf (siehe FM C in Bild 5.3). Zum einen findet, aufgrund der kürzeren Erstarrungszeit, ein geringerer Anteil der Schwindvorgänge im plastischen Zustand statt und zum anderen können aufgrund des schnelleren Spannungsanstiegs weniger Spannungen durch Kriechen und Relaxation abgebaut werden.

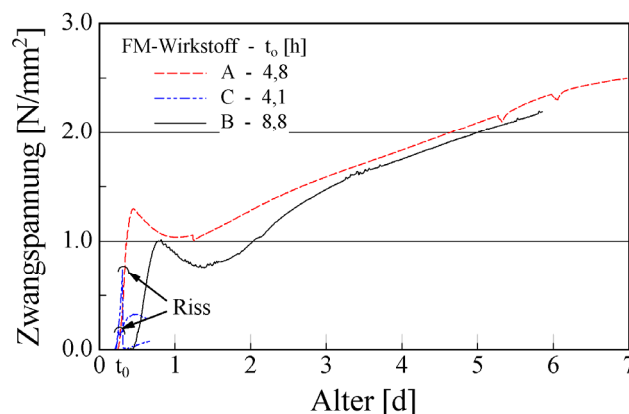


Bild 5.3: Zwangspannungen und Rissbildung in Abhängigkeit des FM-Wirkstoffes aus [5.2]

5.3 Gefahr der Rissbildung in jungem Alter

Auch bei ultrahochfestem Beton entwickeln sich der statische E-Modul und somit die Zwangspannungen zu Beginn der Erhärtung schneller als die Festigkeit, so dass es bei Überschreitung der noch wenig ausgebildeten Zugfestigkeit zur Rissbildung kommt. Da es sich bei der Zwangbeanspruchung über eine kontinuierlich wachsende und länger andauernde Beanspruchung handelt, spielen das Relaxations- und Kriechverhalten sowie die Dauerstandfestigkeit bei der Beurteilung der Rissgefahr eine wesentliche Rolle.

Bei normal- bzw. hochfestem Beton liegt die Größenordnung für die Zugstandsfestigkeit bei 70 bzw. 75 % der Kurzzeitfestigkeit [5.5, 5.6]. Eine höhere Dauerbeanspruchung kann, ausgehend von Fehlstellen (Luftporen) und scharfkantigen Zuschlagkörnern, zum lokalen Mikrorisswachstum und schließlich zum Versagen führen.

Die zeitliche Entwicklung des Beanspruchungsgrades (siehe Bild 5.4) zeigt, dass bei den UHFB mit Portlandzement die Gefahr der Rissbildung 2 bis 8 Stunden nach Erstarrungsende sehr hoch war. Der Referenzbeton (30 % sf; w/z = 0,27; FM A) wies kurzzeitig einen Beanspruchungsgrad von über 90 % auf. Bei Einsatz eines FM-Wirkstoffes zur Erzielung hoher Frühfestigkeiten kam es sowohl beim Erst- als auch bei Wiederholungsversuch zum Trennriss (siehe Bild 5.3). Die UHFB mit Hochofenzement waren in jungem Alter mit Beanspruchungsgraden von weniger als 50 % deutlich weniger gefährdet.

Der kritische Zeitraum deckt sich bei einer Fertigteilproduktion in etwa mit der Verweilzeit des Betons in der Schalung. Aufgrund der Eliminierung der Temperaturentwicklung infolge Hydratation durch isotherme Lagerung bei 20 °C lassen sich diese Erkenntnisse jedoch nicht direkt in die Praxis übertragen.

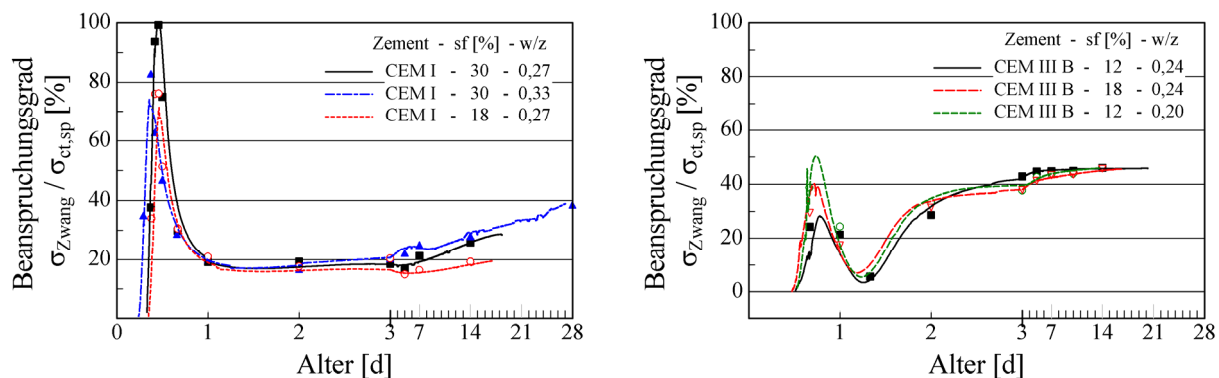


Bild 5.4: Zeitlicher Verlauf des Beanspruchungsgrades infolge behinderter Schwindverformung der Betone mit Portlandzement (links) und Hochofenzement (rechts) aus [5.7]

Nach dem aktuellen Kenntnisstand lässt sich die Gefahr der Rissbildung im jungen Alter infolge Zwangbeanspruchung bei gleichzeitigem Auftreten von Schwinden während der Erhärtung und Verkürzung infolge Abfließen der Hydrationswärme anhand der vorliegenden Messungen abschätzen.

Unter der Annahme, dass die Erhärtung von ultrahochfestem Beton bei erhöhten Temperaturen die Entwicklung der Schwindverformungen und mechanischen Eigenschaften gleichermaßen beschleunigt, erhöht sich die Gefahr der Rissbildung nur während der Abkühlphase maßgebend. Erhärtet ein Bauteil in einer sehr steifen Schalung und weist infolge der Hydrationswärme nach 24 Stunden ein wirksames Alter von 2 bis 3 Tagen auf, so darf es bis zum Ausschallzeitpunkt um max. 10 K, bezogen auf die Maximaltemperatur, abkühlen. Bei einer durchschnittlichen Abkühlgeschwindigkeit von 1 K/h (siehe Bild 5.6) bedeutet dies, dass spätestens 10 Stunden nach Erreichen des Temperaturmaximums ausgeschalt werden muss. Der UHFB besitzt zu diesem Zeitpunkt bereits eine Druckfestigkeit von ca. 90 N/mm² entsprechend ≥ 50 % der 28-Tage-Festigkeit (vgl. Bild 5.1).

Mit zunehmender Betonzugfestigkeit fielen die Beanspruchungsgrade aller Betone deutlich ab. Bei weiterer Erhärtung unter Zwang wiesen die Betone im Alter von 28 Tagen Beanspruchungsgrade von rd. 40 % auf. Dieser Wert muss jedoch, aufgrund des Verhältnisses von Zugfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit im hohen Alter von 0,9, um den Faktor 1,7 korrigiert werden. Da das Einsatzgebiet des ultrahochfesten Betons sich voraussichtlich auf Fertigteile fokussiert, spielt dieser Effekt keine Rolle.

5.4 Frühschwinden

Bereits 30 Minuten nach Wasserzugabe wurde in [5.2] die Schwindmessung (konservierende Lagerung) begonnen und eine starke Verkürzung des Betons gemessen, die nach rd. 4 Stunden zum Stillstand kam. Offensichtlich waren neben den chemischen und physikalischen Vorgängen auch temperaturbedingte Formänderungen (Abkühlen auf 20 °C) für die gemessene Verkürzung verantwortlich (siehe Bild 5.5).

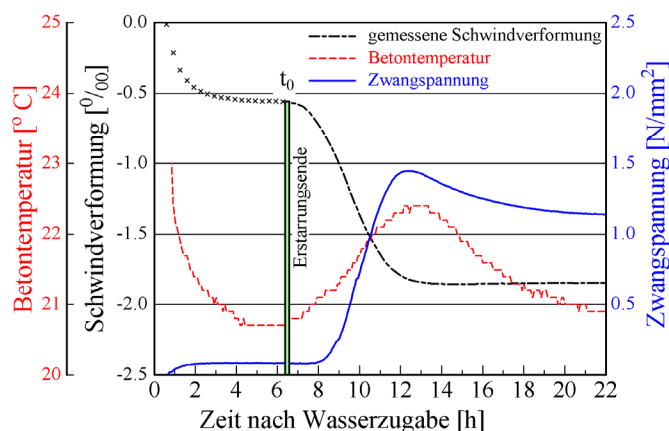


Bild 5.5: Zusammenhang zwischen Schwindverformung (konservierende Lagerung), Erstarrung, Temperaturentwicklung und Entwicklung der Zwangsspannung im jungen Alter aus [5.2]

Um die Bedeutung dieser frühen Verkürzung beurteilen zu können, wurde gleichzeitig das Erstarrungsverhalten mit dem Vicat-Gerät bestimmt. Der Beginn und das Ende des Erstarrens erfolgten erst rd. 2 Stunden

nach dem Abklingen der frühen Verkürzung (siehe Bild 5.5). Auffällig war, dass die Zeitspanne zwischen Erstarrungsbeginn und -ende nur 10 min betrug und exakt mit dem Beginn der Beschleunigungsperiode (Temperaturanstieg infolge Hydratation) zusammenfiel. Somit entspricht diese frühe Verkürzung von ca. 0,5 ‰ dem plastischen Schwinden. Folglich ist als Bezugsgröße für die Schwindverformungen die Länge der Probe nach erfolgter Erstarrung heranzuziehen.

5.5 Hydrationswärme

Wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt, setzen mit dem Erstarrungsende der Beginn der Hydrationswärmeentwicklung und die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften ein. Aufgrund der hohen Zementgehalte von rd. 700 kg/m³ können sich Bauteile aus ultrahochfestem Beton in Abhängigkeit der Querschnittsabmessungen und der Schalungsbeschaffenheit um mehr als 40 K erwärmen (siehe Bild 5.6).

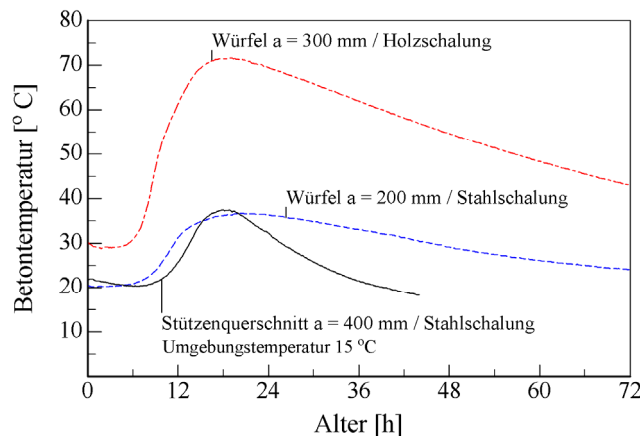


Bild 5.6: Erwärmung von Probekörpern und Bauteilen aus UHFB infolge Hydratation in Abhängigkeit der Querschnittsgeometrie und der Schalung [5.8]

In Anbetracht der Realisierung von filigranen Bauteilen aus UHFB dominiert bei der Erwärmung infolge Hydratation der Einfluss der Schalungsbeschaffenheit. Der Zeitraum zwischen Erstarrungsende und Temperaturmaximum beträgt etwa 8 bis 12 Stunden. In Abhängigkeit von dem Querschnitt, der Schalungsbeschaffenheit und der Temperaturdifferenz zwischen Beton und Umgebung erfolgt die Abkühlung des Bauteils mehr oder weniger schnell. Bei den bisher durchgeführten Messungen wurde nach Erreichen des Temperaturmaximums eine maximale Abkühlgeschwindigkeit von 0,5 bis 1,5 K/h gemessen.

5.6 Literatur zum Abschnitt 5

- [5.1] Schachinger, I.; Schmidt, K.; Heinz, D.; Schießl, P.: Early-Age Cracking Risk and Relaxation by Restrained Autogenous Deformation of Ultra High Performance Concrete. 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Juni 2002, Leipzig, Band 2, S. 1341-1354.
- [5.2] Schachinger, I.: Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität. Dissertation am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der Technischen Universität München, März 2007.
- [5.3] Schießl, P.; Beckhaus, K.; Schachinger, I.; Rucker, P.: New Results on Early-Age Cracking of Special Concrete. Cement, concrete and aggregates, Vol. 26, No. 2, Dezember 2004, S. 139-147.
- [5.4] Habel, K.: Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete. Dissertation am Institut für Tragwerke der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Thèse No 3036 (2004).
- [5.5] Al-Kubaisy, M. A.; Young, A. G.: Failure of concrete under sustained tension. Magazine of Concrete Research, Vol. 27 No. 92, September 1975, S. 171/178.
- [5.6] Rinder, T.; Reinhardt, H.-W.: Zeitstandzugfestigkeit von hochfestem Beton. Zeitschrift: Beton 7+8, 2004, S. 360-367.
- [5.7] Schachinger, I.; Schmidt, K.; Heinz, D.: Zeitabhängiges Verformungsverhalten von UHFB. Tagungsband Ultrahochfester Beton; Schriftenreihe „Innovationen im Bauwesen“ – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft, ISBN 3-89932-045-X, Leipzig, Nov. 2003, S. 67-77.
- [5.8] Mazanec, O.: Untersuchungen des Einflusses von Silikastaub auf die Verarbeitungs- und Festigkeitseigenschaften von ultrahochfestem Beton an Mischungen mit unterschiedlichen Korndurchmessern und Nachbehandlungsverfahren unter gleichzeitiger Entwicklung geeigneter Mischungsrezepturen und Verfahrensanweisungen. Diplomarbeit an der Fachhochschule München, März 2003.

6 Festbeton

6.1 Allgemeines

Die Festbetoneigenschaften ultrahochfester Betone werden durch ihr sehr dichtes Gefüge geprägt. Ihre Mikrostruktur unterscheidet sich signifikant von normalfesten und auch von hochfesten Betonen. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich ultrahochfeste Betone mit Faserzusatz in Abhängigkeit vom Fasergehalt deutlich von UHFB ohne Fasern, vor allem im Nachbruchverhalten. Vor Erreichen der Festigkeit, also im ansteigenden Ast der Spannungs-Dehnungs-Linie, sind hingegen die Unterschiede zwischen UHFB mit und ohne Faserzusatz besonders bei Druckbeanspruchung gering. Im Folgenden werden die allgemeinen Festbetoneigenschaften von UHFB beschrieben, wobei die Besonderheiten durch Faserzusatz in den einzelnen Abschnitten behandelt werden.

6.2 Mikrostruktur des Ultrahochleistungsbetons

6.2.1 Mineralphasenbestand

Als Ausgangsstoffe für die Herstellung von UHFB werden in der Regel konventionelle (HS-)Zemente, Silikastaub, Gesteinsmehle und Gesteinskörnungen verwendet (vgl. Abschnitt 3). Der Mineralphasenbestand ist daher zunächst einmal dem herkömmlicher Betone ähnlich. Als Hydratationsprodukte des Zementes entstehen Calciumsilikat- und Aluminathydrate, Tri- und Monosulfat sowie Portlandit. Wegen der unterschiedlichen chemischen Reaktionskinetik unterscheiden sich jedoch die Zusammensetzung und die Mengenverteilung der Hydratphasen im UHFB von Normalbeton. Da in der Regel C₃A-arme oder C₃A-freie HS-Zemente eingesetzt werden und für die Hydratation nur wenig Wasser zur Verfügung steht, entstehen in der Regel keine größeren Mengen an Ettringit [6.2]. Der hohe Gehalt an reaktionsfähiger Kieselsäure in Form von Silikastaub führt durch eine puzzolanische Reaktion zum Verbrauch des primär während der Zementhydratation gebildeten Calciumhydroxids unter Bildung von SiO₂-reichen CSH-Phasen [6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.6a]. Die Menge des für diese Reaktion zu Verfügung stehenden Wassers sowie das Mengenverhältnis von Ca(OH)₂ zu Silikastaub und die Reaktionsgeschwindigkeit der anderen beteiligten Phasen bestimmen, ob das gesamte aus der Primärhydratation zur Verfügung stehende Ca(OH)₂ aufgebraucht wird. Die Textur und Zusammensetzung der Hydratationsprodukte können darüber hinaus je nach Art und Intensität der Nachbehandlung noch verändert werden. Eine Wärmebehandlung bzw. ein Autoklavieren führt zur Beschleunigung und zur Steigerung der puzzolanischen Reaktion, wodurch die CSH-Phasen SiO₂-reicher werden und ihre Kettenlänge zunimmt [6.7, 6.8]. Tobermorit wird ab Temperaturen von 200 °C unter Dehydrierung zu Xonotlit, unter gleichzeitigem Druck teilweise auch zu Hydrogranat umgewandelt [6.2, 6.9].

Da die Hydratation des Zements aufgrund des sehr niedrigen äquivalenten Wasserzementwertes nur bis zu 40–60 % ablaufen kann [6.2], sind Reste der Ausgangsphasen vorhanden. Aus dem unreaktierten Klinker sind dies in erster Linie das langsamer hydratisierende C₂S sowie ggf. der schlechter lösliche anhydritische Sulfatträger oder unreaktierter Silikastaub (röntgenamorphes Kieselsäureglas). Letztlich finden sich natürlich noch die über die inerten Füller und die Gesteinskörnungen eingebrachten Mineralphasen wieder.

6.2.2 Porosität und Porengrößenverteilung

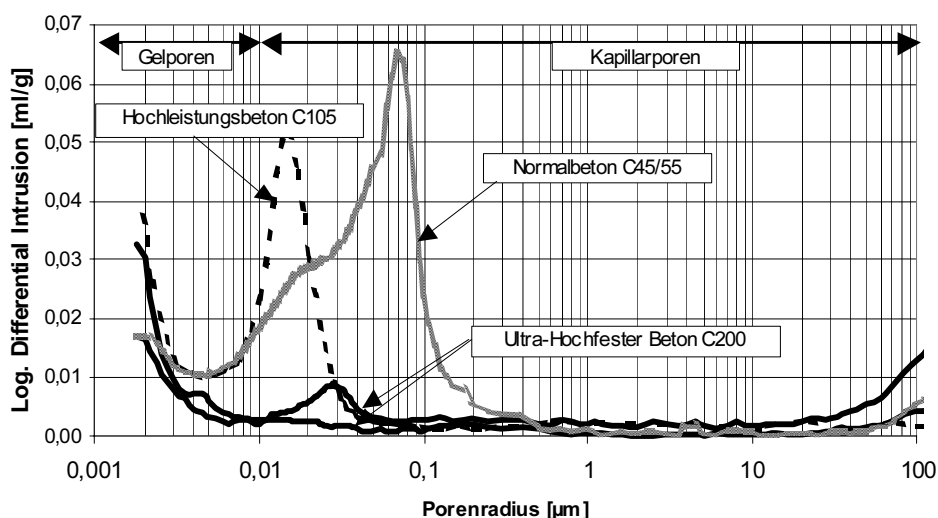


Bild 6.1: Vergleich der Hg-Porengrößenverteilung für Betone der Druckfestigkeitsklassen C45/55, C105 und C200 [6.4, 6.5]

Die Reduktion des äquivalenten Wasserzementwertes, die Zugabe reaktiver Zusatzstoffe (z. B. Silikastaub), die Optimierung der Packungsdichte im Feinkornbereich durch die Zugabe von gemahlenem Quarz oder anderen Gesteinen verringern sowohl das Gesamtporenvolumen als auch die mittlere Porengröße. Während bei hochfesten Betonen die Gesamtporosität im Bereich von 8,0 bis 12,0 Vol.-% liegt, beträgt diese bei ultrahochfesten Betonen wegen der deutlichen Abnahme der Kapillarporosität 4,0 bis 6,0 Vol.-% [6.4, 6.4a, 6.10]. Bild 6.1 zeigt einen Vergleich der Porengrößenverteilung zweier ultrahochfester Betone mit derjenigen eines hochfesten Betons C105. Der Kapillarporenanteil von UHFB liegt im Bereich von 1,5 bis 2,0 Vol.-%, der des C105 bei 8 Vol.-%.

Mit der Hg-Druckporosimetrie ist jedoch nur der Porenanteil bis hinunter zu einem Porenradius von 3 nm bestimmbar. Mit dem Heliumpyknometer können auch Poren mit kleineren Radien gemessen werden. Zusammen mit der Dichtebestimmung an größeren Bruchstücken kann damit auf den Gesamtporenanteil geschlossen werden.

Bisher konnten in vergleichenden Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit nur geringfügige Unterschiede zwischen wärmebehandelten und nicht wärmebehandelten UHFB festgestellt werden [6.10, 6.11].

6.2.3 Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementleim

Die Änderung in der Zusammensetzung, vor allem die Reduzierung des äquivalenten Wasserzementwertes, der hohe Gehalt an Silikastaub und die Optimierung der Packungsdichte im Feinkornbereich führen vor allem zur deutlichen Verbesserung der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung oder Stahlfaser (Bild 6.2). Schwachzonen infolge des Wandeffektes oder der hohen Konzentration von $\text{Ca}(\text{OH})_2$, wie sie bei Normalbeton in der Regel zu finden sind, sind im UHFB deutlich vermindert.

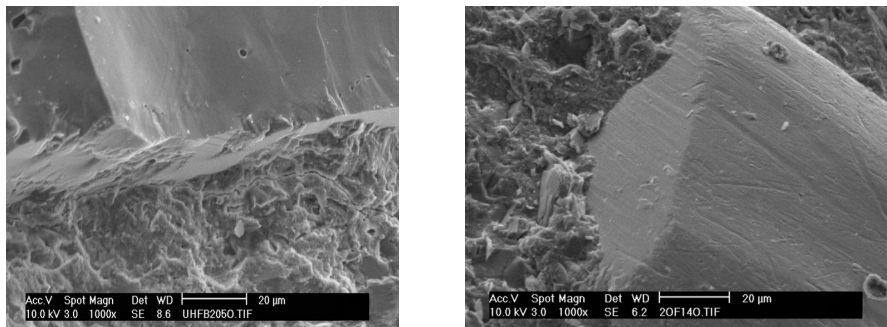


Bild 6.2: Kontaktzone zwischen Matrix und Gesteinskorn/Stahlfaser [6.12]; links: Verbundbereich zwischen Matrix und Quarzsandpartikel; rechts: Verbundbereich zwischen Matrix und Stahlfaser

Diese veränderte Mikrostruktur beeinflusst alle Festbeton- und vor allem die Dauerhaftigkeitseigenschaften überwiegend positiv. Der Widerstand gegen chemischen Angriff, korrosive Einflüsse auf die Bewehrung und die Verschleißfestigkeit wird erhöht.

6.2.4 Mikrorisse im Betongefüge

Das Potenzial zur Entstehung von Mikrorissen in hochfesten Betonen (HFB) ist bereits seit längerem bekannt (s. z. B. [6.13]). Die Mechanismen zu ihrer Entstehung sind dagegen noch nicht vollständig geklärt. Mikrorisse im Betongefüge von UHFB wurden im Gegensatz zu HFB bisher nicht festgestellt, es ist jedoch zum jetzigen Stand der Forschung nicht auszuschließen, dass sie unter bestimmten Umständen auftreten können. Die ist durch weitere Forschung abzuklären.

6.3 Verhalten unter Druckbeanspruchung

6.3.1 Spannungs-Dehnungs-Linie von UHFB ohne Fasern.

UHFB ohne Faserzusatz weist bis zu einem Spannungsniveau von ca. 80 % der Festigkeit ein nahezu linearelastisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten auf (siehe Bild 6.3). Dieses Verhalten stellt sich nach den bisherigen Ergebnissen unabhängig vom Größtkorn ein.

UHFB ohne Fasern versagt im Druckversuch explosionsartig, so dass kein abfallender Ast im Spannungs-Dehnungs-Diagramm zu beobachten ist [6.5]. Ein ähnliches Verhalten wurde bereits bei hochfesten Betonen mit einer Zylinderdruckfestigkeit ab rd. 90 N/mm² beobachtet. Entsprechend den vorliegenden Versuchsergebnissen beträgt die Bruchdehnung ε_{c1} von UHFB ca. 3,5–4,5 ‰ [6.5, 6.14], wobei feinkörniger UHFB die höheren Werte, also einen geringeren E-Modul aufwies.

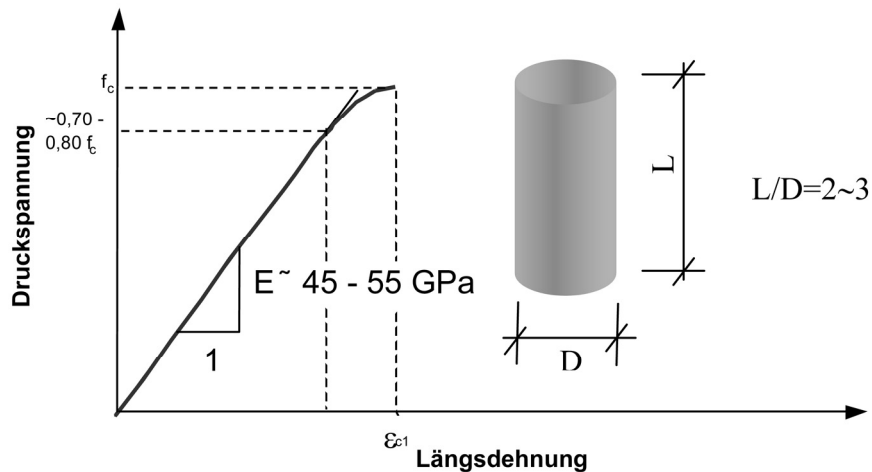


Bild 6.3: Spannungs-Dehnungs-Linie von UHFB ohne Fasern [6.5]

Das dichte Mikrogefüge führt auch zu einer Erhöhung des Elastizitätsmoduls. Er liegt bei UHFB im Bereich von 45 000 bis 55 000 MPa. Bei sehr steifen Zuschlägen, wie z. B. Bauxit, steigt der E-Modul auf bis zu 70 000 MPa an. Der Elastizitätsmodul nimmt nur unterproportional mit der Druckfestigkeit zu.

Die in DIN 1045-1 und CEB-FIP MC 90 eingeführte Beziehung zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit überschätzt in der Regel den E-Modul von UHFB. Versuchsergebnisse der Universität Leipzig [6.15] ergaben folgende Beziehung zwischen dem E-Modul E_c und der Zylinderdruckfestigkeit f_c für den untersuchten fein- und grobkörnigen UHFB:

$$\text{feinkörnigen UHFB: } E_c = 8800 \cdot f_c^{1/3} \quad (6-1)$$

$$\text{grobkörnigen UHFB mit Basaltsplitt: } E_c = 10200 \cdot f_c^{1/3} \quad (6-2)$$

$$E_c \text{ und } f_c \text{ in N/mm}^2$$

Im Bild 6.4 sind diese Ansätze im Vergleich zu Versuchsergebnissen und dem Ansatz nach DIN 1045-1 für hochfesten Beton dargestellt.

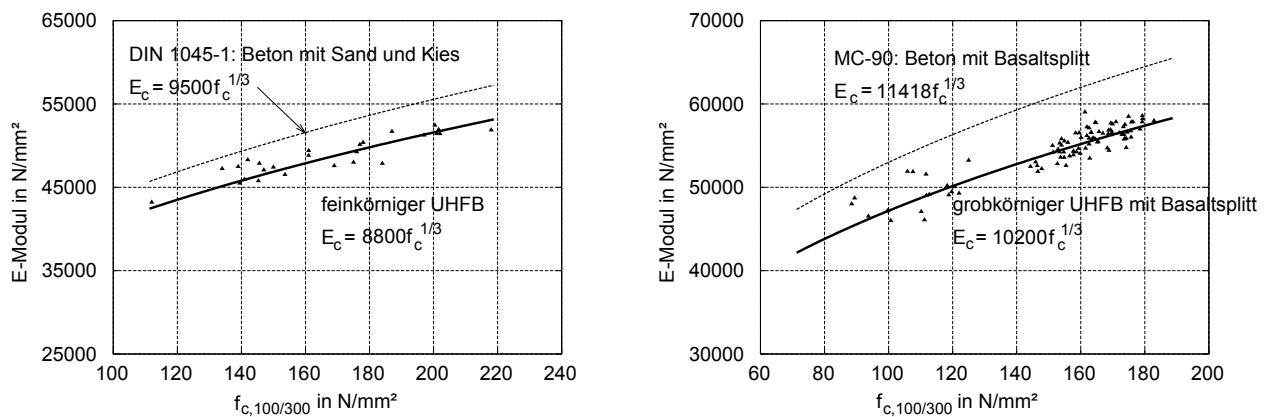


Bild 6.4: Beziehung zwischen E-Modul und Zylinderdruckfestigkeit von UHFB [6.15]

Entsprechend DIN 1045-1 wird f_{cm} wie folgt angenommen

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad [\text{N/mm}^2]$$

6.3.2 Querdehnzahl

Die Querdehnzahl des UHFB mit Zylinderdruckfestigkeit zwischen 150 und 200 N/mm² beträgt nach Untersuchungen von [6.15] rd. 0,18 bis 0,19 für Feinkornbeton beziehungsweise ca. 0,21 für UHFB mit groben Gesteinskörnungen (5–8 mm) aus Basalt. Diese Werte liegen in der Größenordnung des Normalbetons (ca. 0,20). Ein wesentlicher Unterschied zu den Normalbetonen ist jedoch, dass die Zunahme der Querdehnzahl infolge der Mikrorissbildung bei Druckbeanspruchung erst ab dem Spannungsniveau von 0,7–0,8 f_c messbar ist, während diese Grenze bei Normalbeton bei ca. 0,5 f_c liegt. Die erreichte Endquerdehnzahl für faserfreien UHFB im Bruchzustand kann mit ca. 0,3 angenommen werden (siehe Bild 6.5).

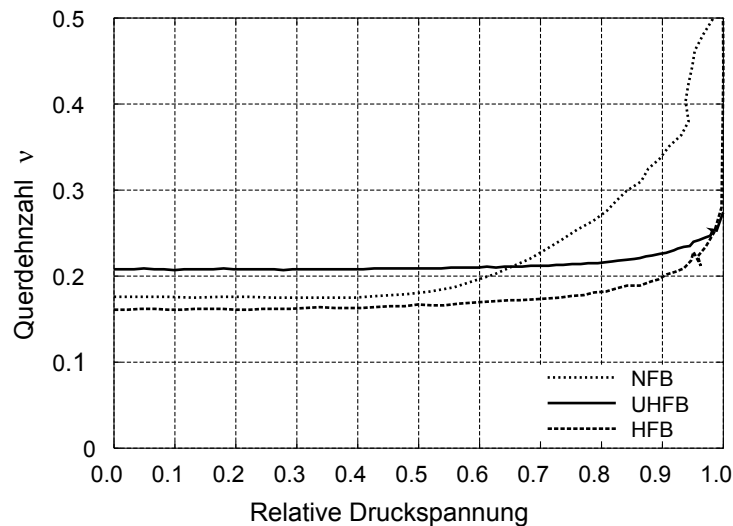


Bild 6.5: Querdehnzahl bei UHFB und Normalbeton mit steigender Druckspannung [6.15]

6.3.3 Spannungs-Dehnungs-Linie von UHFB mit Stahlfasern

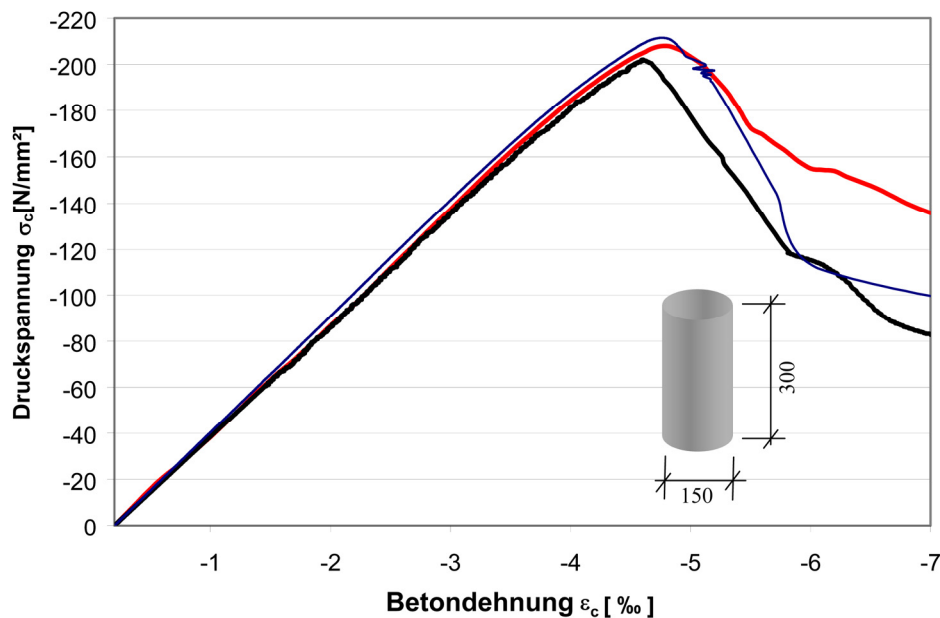


Bild 6.6: Beispiele für Spannungs-Dehnungs-Linien von UHFB mit 2,5 Vol.-% Stahlfasern [6.5]

Durch gezielte Zugabe von Fasern kann vor allem das Nachbruchverhalten des ultrahochfesten Betons verbessert werden, während sich der ansteigende Ast kaum vom faserfreien UHFB unterscheidet. Dadurch kann ein duktileres Verhalten erreicht werden. Die Spannungs-Dehnungs-Linie lässt dann in Abhängigkeit vom Fasergehalt und der Fasergeometrie (Länge, Durchmesser) einen ausgeprägten abfallenden Ast erkennen (Bild 6.6). Das Beispiel zeigt, dass der Verlauf des abfallenden Astes im Allgemeinen deutlich stärker variiert als die Steigung im ansteigenden Ast. Dies ist u. a. auf eine nicht ausreichend homogene Verteilung und auf die unterschiedliche Orientierung der Fasern im Beton zurückzuführen. Eine allgemeingültige Arbeitslinie für UHFB mit Fasern kann deshalb nicht angegeben werden. Bild 6.7 zeigt den prinzipiellen Verlauf. Zur Charakterisierung des faserhaltigen UHFB müssen im Einzelfall eingehende Untersuchungen durchgeführt werden. Die wesentlichen, das Nachbruchverhalten bestimmenden Parameter sind:

- Fasergehalt,
- Fasergeometrie (Länge, Durchmesser),
- Faserlänge bezogen auf das Größtkorn,
- Verbundeigenschaften zwischen Fasern und Matrix,
- Fasersteifigkeit, bei Verwendung eines Fasercocktails,
- Faserorientierung.

Der Einfluss der vorgenannten Größen auf die Eigenschaften von faserhaltigem UHFB wurde in [6.26, 6.27] ausführlich untersucht. Dabei zeigte sich, dass Mischungen aus geometrisch unterschiedlichen Fasern häufig vorteilhaft sind. In den bisherigen Untersuchungen wurden überwiegend hochfeste Stahlfasern mit unterschiedlicher Fasergeometrie, aber auch höherfeste Kunststofffasern aus Polyvinylalkohol oder „Fasercocktails“ aus beiden Sorten [6.16, 6.22] verwendet. Die Wirkung der Fasern hängt wesentlich vom Verbund zur Matrix ab. Ausziehversuche an Einzelfasern ergaben eine maximale Haftspannung hochfester Stahlfasern in feinkörnigem UHFB von bis zu rd. 14 N/mm^2 [6.16, 6.25]. Ab einer Einbindelänge von rd. 6,5 mm wurden die Fasern mit einem Durchmesser von 0,15 mm nicht mehr aus dem Beton herausgezogen, sondern sie rissen bei Erreichen der Zugfestigkeit ab.

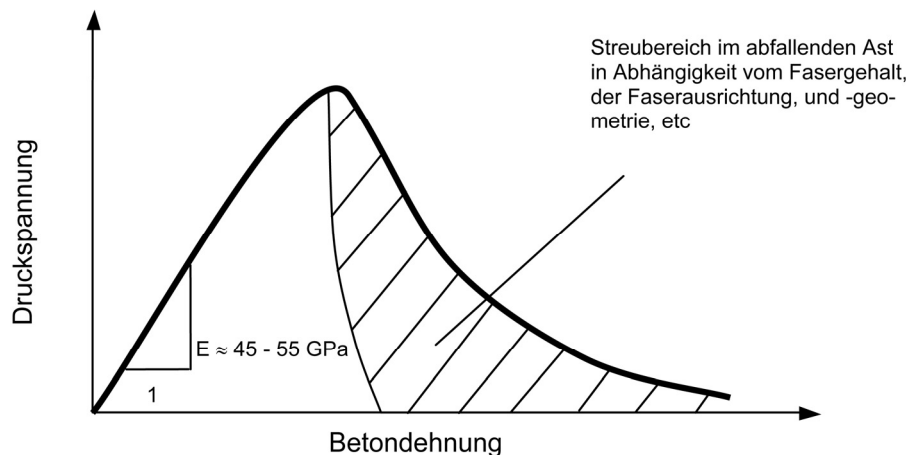


Bild 6.7: Schematische Spannungs-Dehnungslinie von UHFB mit Streubereich im abfallenden Ast in Abhängigkeit des Fasergehalts und der Faserorientierung und -geometrie

In der Regel führen übliche Fasergehalte bis 2,5 Vol.-% zu einer um höchstens 15 % höheren Zylinderdruckfestigkeit [6.5].

6.3.4 Einflüsse auf die Festigkeit

6.3.4.1 Prüfkörpergeometrie

Für UHFB liegen bisher noch keine abschließenden Ergebnisse zum Einfluss der Prüfkörperschlankheit sowie der Querdehnungsbehinderung durch die Lasteinleitung vor. Für eine einheitliche Bestimmung der Druckfestigkeit sollten Zylinder mit einem Verhältnis 1/2 (Durchmesser/Höhe) verwendet werden. Der Durchmesser des Prüfkörpers sollte mindestens 100 mm betragen. Die französische Richtlinie zur Bemessung von UHFB-Bauteilen [6.17] gibt eine von der Faserlänge abhängige Prüfkörperabmessung an, wobei der kleinste Durchmesser der Prüfzylinder 70 mm betragen sollte.

6.3.4.2 Prüfmaschine

Wegen der hohen Betonfestigkeit ist die Probekörpergeometrie so an die Leistungsfähigkeit der Prüfmaschine anzupassen, dass sich diese nicht beim Prüfen unzulässig verformt. Da UHFB kaum plastische Verformung aufweist, muss darüber hinaus bei der Probekörperpräparation besondere Sorgfalt auf die Planparallelität der Belastungsflächen gelegt werden, um eine gleichmäßige Lasteinleitung zu gewährleisten. Angesichts des hohen Spannungs- und Kraftniveaus müssen darüber hinaus die Lasteinleitungsplatten ebenfalls über eine ausreichende Steifigkeit verfügen, um eine lokale Verwölbung im Lasteinleitungsbereich zu vermeiden.

6.3.4.3 Wärmebehandlung

Eine Wärmebehandlung beschleunigt die Festigkeitsentwicklung sehr stark. Nach [6.2, 6.4, 6.5] erreicht man bei einer Wärmebehandlung mit 90°C über 48 Stunden bereits eine höhere Festigkeit als nach 28 Tagen Wasserlagerung bei 20°C . Durch eine Wärmebehandlung bei 250°C kann die Festigkeit nochmals deutliche erhöht werden, da bei dieser Temperatur nicht nur die Reaktion beschleunigt, sondern auch die Mikrostruktur verändert wird (s. 6.2.1). Die Folgen einer derartigen Behandlung, z. B. für die Dauerhaftigkeit, sind allerdings bislang noch nicht bekannt.

6.4 Verhalten unter Zugbeanspruchung

6.4.1 Zentrischer Zug

Die Zugfestigkeit von UHFB kann an gekerbten oder nicht gekerbten Prismen, Zylindern oder gesägten Flachproben aus Platten bestimmt werden.

Versuche zur einaxialen Zugfestigkeit von UHFB ohne Faserzusatz haben Festigkeiten zwischen 7 und 10 N/mm² ergeben. Nach [6.5] und [6.15] unterscheidet sich die Zugfestigkeit von Grob- und Feinkornbeton nur wenig. Die Zugfestigkeit nimmt mit Zunahme des Silikastaubgehaltes geringfügig zu. Das Versagen auf Zug ist bei ungefasertem UHFB sehr spröde, und es kann bei zentrischen Versuchen praktisch kein abfallender Ast beobachtet werden.

Je nach Fasergehalt und Fasergeometrie weist ultrahochfester Beton mit Fasern bei vergleichbaren Druckfestigkeiten im Allgemeinen eine höhere Zugfestigkeit auf als der ungefaserte UHFB. Bild 6.8 stellt die Erhöhung der Zugfestigkeit und die Verbesserung des Nachbruchverhaltens durch die Zugabe von Fasern qualitativ dar. Nochmals zu betonen ist, dass die Festigkeitszunahme und der abfallende Ast entscheidend von Fasergehalt, Fasergeometrie und Faserausrichtung abhängen [6.17], s. a. Abschnitt 6.3.3.

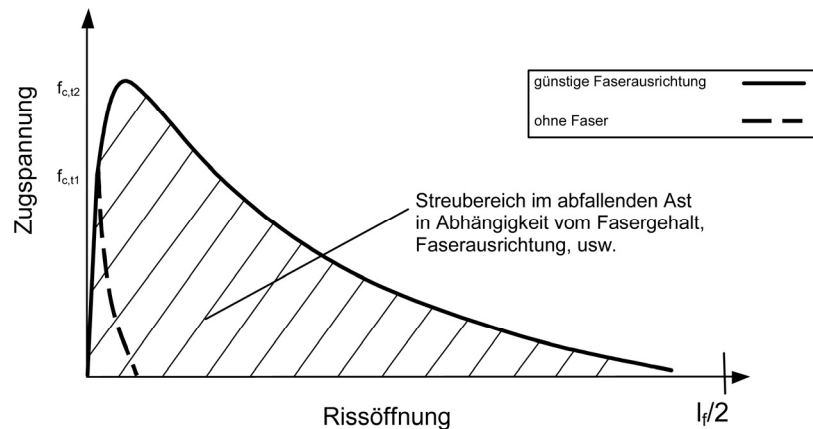
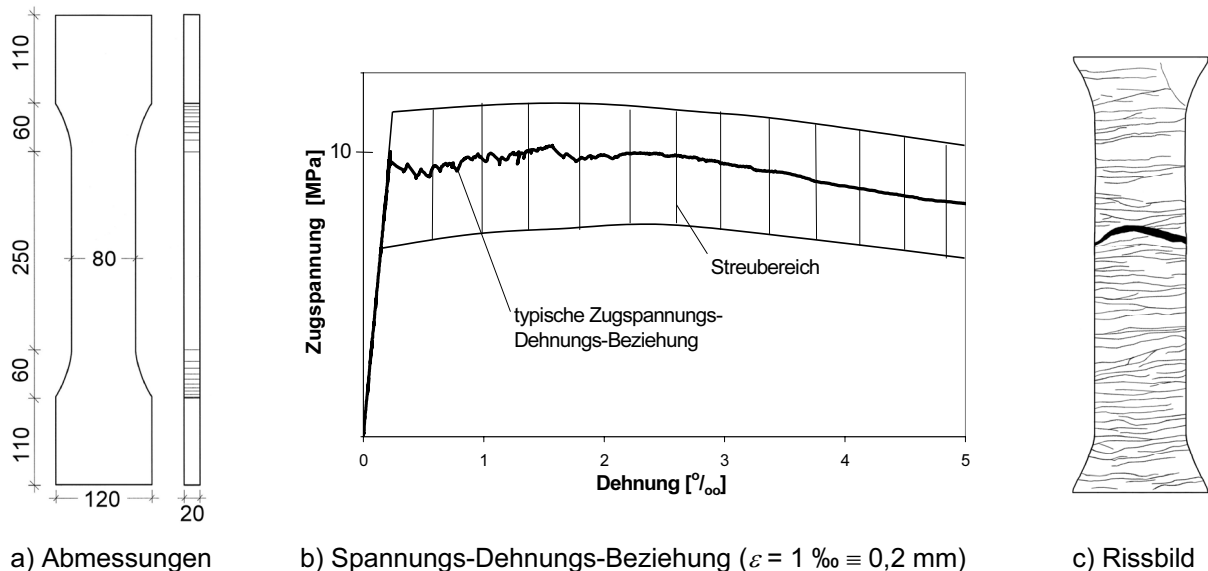


Bild 6.8: Spannungs-Rissöffnungsdiagramm bei axialem Zug



a) Abmessungen

b) Spannungs-Dehnungs-Beziehung ($\varepsilon = 1 \text{ ‰} \equiv 0,2 \text{ mm}$)

c) Rissbild

Bild 6.9: Idealer Verlauf der Zugspannungs-Dehnungs-Linie im zentrischen Zugversuchen an flachen Schulterproben aus UHFB (Fasergehalt 2 %) [6.18]

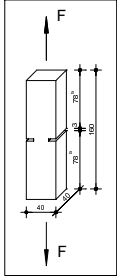
Bild 6.9 für Zugversuche an flachen Schulterproben zeigt, dass bei einigen UHFB nach Auftreten der ersten Risse keine Laststeigerung mehr festgestellt werden konnte, sondern allenfalls trat bei idealem Verlauf ein flach abfallender Ast auf. Bei Vergleichen mit anderen Versuchen ist zu beachten, dass im Bild 6.9 eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung dargestellt ist, welche die mittlere Dehnung angibt und nur den Bereich bis zu einer Rissbreite von ca. 1,0 mm erfasst. Die überwiegend herstellbedingten Streuungen sind bei zent-

rischem Zug, aber auch bei Biegezugversuchen vergleichsweise hoch und deshalb sollte die Anzahl der Versuchskörper gegenüber Versuchen an Normalbeton vergrößert werden, also z. B. sechs statt der üblichen drei Versuche.

6.4.2 Biegezug

Die Biegezugfestigkeit (Maximalwert der Randspannung) von UHFB ohne Faserzusatz, gemessen an Prismen 40 mm x 40 mm x 160 mm, ergab sich zwischen 13 und 17 N/mm², während an Balken 150 mm x 150 mm x 700 mm Werte zwischen 7 und 10 N/mm² [6.4, 6.5, 6.16] gemessen wurden. Es ist ein deutlicher Maßstabseffekt zu erkennen. Dieses Verhalten ist bruchmechanisch bedingt. Mit Stahlfasern ergeben sich höhere Biegezugfestigkeiten. In Abhängigkeit von der Höhe des Probekörpers wurden mit 2 Vol.-% Fasern Biegezugfestigkeiten zwischen rd. 15 und 40 N/mm² erreicht. Bei UHFB mit Fasern wird der bruchmechanisch bedingte Maßstabseffekt durch die parallele Ausrichtung der Fasern im Randbereich des Querschnitts verstärkt (s. Tab. 6.1).

Tabelle 6.1: Einfluss der Betonierrichtung, der Faserausrichtung und des Maßstabeffektes auf die Zugfestigkeit und die Bruchenergie bei Zug- und Biegezugbeanspruchung eines feinkörnigen UHFB mit 2 Vol.-% Stahlfasern ($d/l_f = 0,15/9$ mm), [6.5]

Probekörper	Probenalter	Einaxialer Zug		Biegezug			
				Prisma 160 * 40 * 40		Balken 700 * 150 * 150	
Nachbehandlung		90°		90°		90°	
Betonierrichtung		liegend	stehend	liegend	stehend	liegend	stehend
Bruchenergie $G_{F,10\%}$ [N/m]	7d 28d 28d*	16 757 14 555 17 014	9993	20 100 18 052 19 820	15097	20 355 19 892	14543
Zugfestigkeit f_{ct} [N/mm ²]	7d 28d 56d	14,2 13,3 17,7	7,86	34,0 35,7 36,3	22,51	22,1 22,2 22,1	17,6
* Proben mit 25 Tagen Wärmebehandlung bei 90 °C. ** Bruchenergie bei Integration bis zum Erreichen einer Resttragfähigkeit von 10 % der Maximaltragfähigkeit.							

Insbesondere bei kleiner Probekörper- oder Bauteilhöhe von weniger als 200 mm ist dieser Einfluss verhältnismäßig groß, so dass höhere Biegezugfestigkeiten erreicht werden (s. Bild 6.10).

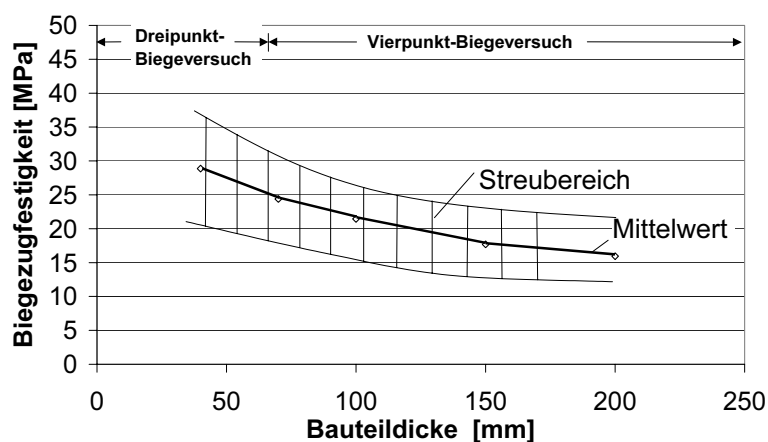


Bild 6.10: Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit von der Bauteilhöhe von Prismen für faserbewehrten UHFB mit 2 Vol.-% Fasern ($f_{ck} = 160\text{--}180$ MPa) [6.19]

Nach Bild 6.10 kann für Prismen mit Bauteilhöhe gleich der Bauteilbreite die Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit von der Prüfkörperhöhe mit folgender Formel abgeschätzt werden:

$$f_{ct,fl} = 15 \cdot \left(\frac{200}{h} \right)^{0,45} \quad \text{für } h \leq 200 \text{ mm} \quad (6-3)$$

mit: h = Prismenhöhe [mm]
 $f_{ct,fl}$ = Biegezugfestigkeit des Prismas mit Bauteilhöhe h [MPa]

In [6.17] werden für Biegezugversuche folgende Versuchsanordnungen vorgeschlagen:

- 4-Punkt-Biegeversuch zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit (an ungekerbten Prüfkörpern) unter Verwendung eines Korrekturfaktors für den Maßstabseinfluss;
- 3-Punkt-Biegeversuch an gekerbten Prismen zur Bestimmung des Faserbeitrags in einem gerissenen Querschnitt.

Als Probekörper werden Prismen mit quadratischem Querschnitt verwendet, deren Länge viermal der Höhe/Breite a entspricht: $l = 4 a$. Die Spannweite beträgt $3 a$. Weil die Dicke der Zone, in der die Fasern randparallel ausgerichtet sind, mit steigender Faserlänge zunimmt, werden in Abhängigkeit von der Faserlängen l_f die Dicken der Probekörper wie folgt gewählt:

- Prismen $70 \cdot 70 \cdot 280 \text{ mm}^3$ für $l_f \leq 15 \text{ mm}$
- Prismen $100 \cdot 100 \cdot 400 \text{ mm}^3$ für $15 < l_f \leq 20 \text{ mm}$
- Prismen $140 \cdot 140 \cdot 560 \text{ mm}^3$ für $20 < l_f \leq 25 \text{ mm}$
- Prismen mit Breite und Höhe $a > 5 l_f$ für $l_f > 25 \text{ mm}$

Das DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton (2001) [6.20] und der Entwurf der DAfStb-Richtlinie (2005) [6.21] schlagen für den 4-Punkt-Biegeversuch einen Balken mit den Abmessungen $b/d/l = 150/150/700 \text{ mm}$ als Probekörper zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit vor (Bild 6.10).

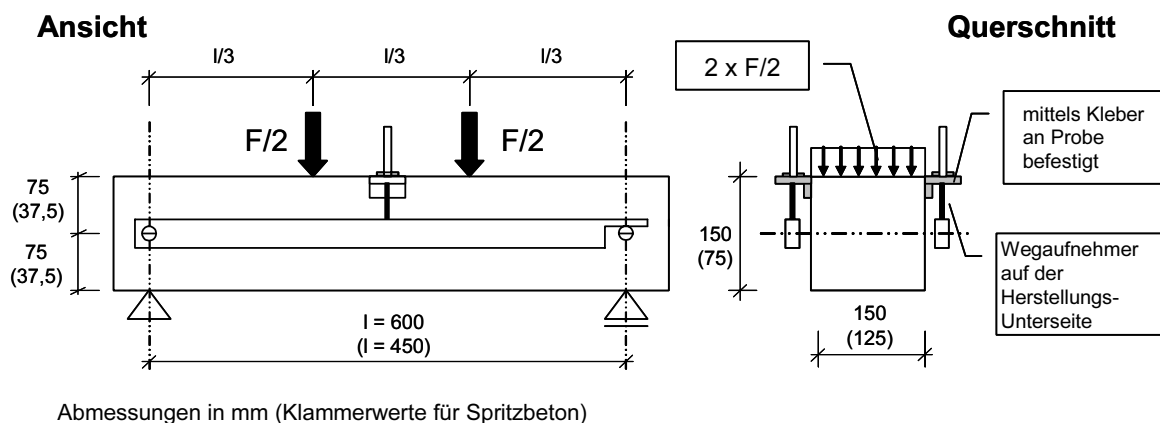


Bild 6.11: Standardbalken nach DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton bzw. DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton (Entwurf 2005) [6.21]

Da die Fasern im UHFB meist recht kurz sind, ist die Randzone, in dem sich die Fasern entlang der Schalung ausrichten, bei diesem Versuchskörper, bezogen auf die Körperhöhe, relativ klein. Es kann daher vereinfachend von einer gleichmäßigen Faserverteilung ausgegangen werden. Bauteile aus faserhaltigem UHFB sind aber häufig dünner als 150 mm. Der Randbereich kann dann nicht mehr vernachlässigt werden. Aus dieser Sicht scheint die Regelung von [6.17] besser geeignet zu sein.

Ähnlich wie beim einaxialen Zugversuch spielen auch beim Biegezugversuch die Faserausrichtung, der Fasergehalt und die Fasergeometrie eine große Rolle, insbesondere für das Nachbruchverhalten.

Fasercoktails aus Stahl- und Polyvinylalkoholfasern (PVA) können aufgrund ihres von Stahlfasern abweichenden Dehn- und Verbundverhaltens die Biegezugfestigkeit oder die Energieaufnahme unter bestimmten Voraussetzungen besonders wirksam erhöhen [6.16, 6.22, 6.25], siehe Bild 6.12.

Im Rahmen des DFG-SPP wird u. a. die Prüfung der Druck- und Biegezugfestigkeit sowie der Faserverteilung und der Faserorientierung optimiert und vereinheitlicht, siehe Abschnitt 8.

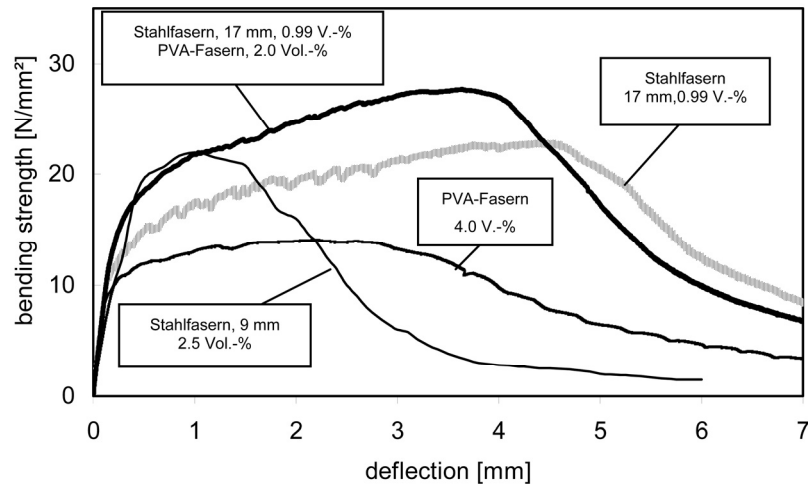


Bild 6.12: Einfluss von Stahl- und PVA-Fasern auf die Duktilität von UHFB [6.22]

6.4.3 Ableitung der zentrischen Zugfestigkeit aus der Druckfestigkeit

Eine abgesicherte Beziehung zwischen Druckfestigkeit und zentrischer Zugfestigkeit für UHFB kann anhand der vorhandenen Versuchsergebnisse noch nicht angegeben werden. In DIN 1045-1 wird folgende Beziehung für hochfesten Beton (Festigkeitsklasse ab C55/67) angegeben:

$$f_{ctm} = 2,12 \ln(1 + f_{cm}/10) \quad (6-4)$$

Die folgende einfachere Beziehung nach Gl. (6-5) [6.23] liefert fast gleiche Werte:

$$f_{ctm} = 1,115 f_{ck}^{(1/3)} \quad (6-5)$$

Die bisherigen Ergebnisse lassen jedoch darauf schließen, dass diese Beziehungen für hochfesten Beton (Festigkeitsklasse ab C55/67) nicht ohne weiteres auf UHFB übertragen werden können, sondern zu niedrige Werte liefern.

6.4.4 Ableitung der zentrischen Zugfestigkeit aus Biegezugversuchen

In Anlehnung an [6.24] wurde in [6.17] für UHFB vorgeschlagen, die zentrische Zugfestigkeit aus dem Biegezugversuch gemäß Gl. (6-6) zu ermitteln:

$$f_{ct} = f_{ct,fl} \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7}}{1 + 2 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7}} \quad (6-6)$$

mit: $h_0 = 100 \text{ mm}$
 $h = \text{Prismenhöhe [mm]}$
 $f_{ct,fl} = \text{Randspannung bei Biegerissbildung (Elastizitätsgrenze) [MPa]}$

Gl. (6-4) bezieht sich auf die Randspannung beim Erstriss bzw. auf die Elastizitätsgrenze, wohingegen sie ursprünglich empirisch für die Biegezugfestigkeit, also die nominelle Randspannung bei Höchstlast, abgeleitet wurde.

Auch nach dem DBV-Merkblatt für Stahlfaserbeton [6.20] und der DAfStb-Richtlinie für Stahlfaserbeton [6.21] kann die zentrische Zugfestigkeit von Stahlfaserbeton ebenfalls aus der Biegezugfestigkeit ermittelt werden.

6.4.5 Spaltzugfestigkeit

Zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit des UHFB sollten Zylinder mit einer Schlankheit $\lambda = d/h = 2$ und einem Durchmesser von mindestens 100 mm verwendet werden.

Gemäß den bisherigen Untersuchungsergebnissen liegt die Spaltzugfestigkeit von UHFB ohne Fasern etwa in der Größenordnung der zentrischen Zugfestigkeit. Für faserhaltigen UHFB liegen derzeit nur sehr wenige Ergebnisse vor [6.12].

6.4.6 Einfluss der Prüfmaschine auf das Zugtragverhalten

Spezifische Untersuchungen zum Einfluss der Prüfmaschine bei der Prüfung von UHFB auf Zug liegen zurzeit noch nicht vor. Die Prüfmaschine muss so steif sein, dass die Prüfergebnisse nicht verfälscht werden. Das Nachbruchverhalten von UHFB mit Fasern kann mit Hilfe von weggesteuerten Versuchen mit einer Geschwindigkeit von rd. 0,01 mm/s gemessen werden.

6.4.7 Einfluss der Fasergeometrie und -orientierung auf das Tragverhalten von UHFB unter Zugbeanspruchung

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten erwähnt wurde, streut das Nachrisstragverhalten von UHFB mit Fasern bei Zug- und Biegezugbeanspruchung in Abhängigkeit von der Fasergeometrie, dem Fasergehalt und der Faserorientierung. Die Einflüsse solcher Faktoren können mit Biegezugversuchen an Prüfkörpern mit möglichst bauteilähnlichen Abmessungen erfasst werden.

In [6.27] wurde an einem UHFB mit 8 mm Größtkorn die Wirkung von 80 und 120 kg/m³ Fasern mit einer Länge von rd. 30 mm im Vergleich zu 13 mm langen Fasern untersucht. In Bild 6.13 sind die Ergebnisse von 4-Punkt-Biegezugprüfungen an Balken 150/150/700 mm dargestellt. Beim UHFB mit den kurzen Fasern (120 kg/m³, $l_f = 13$ mm) wurden im Verformungsbereich I (Rissbreite und Durchbiegung 0,5 mm) eine hohe Nachrisfestigkeit von bis zu rd. 15 N/mm² erzielt. Im Verformungsbereich II (Rissbreite und Durchbiegung bis 3,5 mm) fällt die Festigkeit dann kontinuierlich ab, da die Fasern ausgezogen werden. Bei den längeren Stahlfasern (80 kg/m³, $l_f = 30$ mm) nahm die Biegezugfestigkeit im Nachrisbereich erwartungsgemäß deutlich langsamer ab.

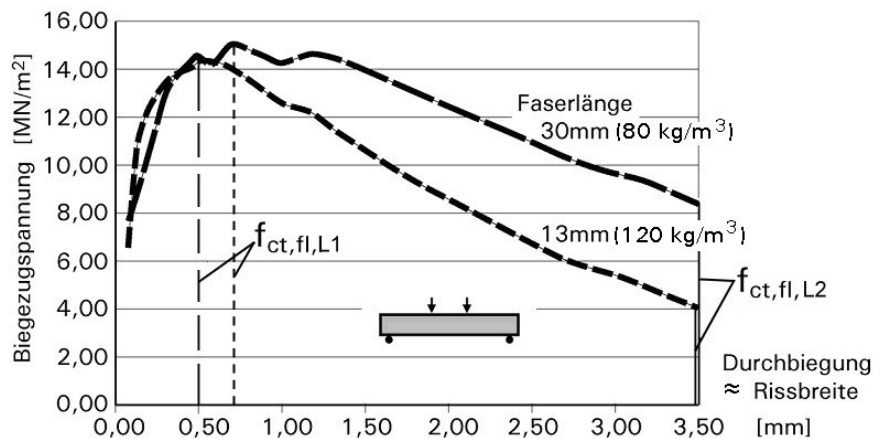


Bild 6.13: Spannungs-Verformungs-Linien eines UHFB mit langen und kurzen Fasern [6.27]

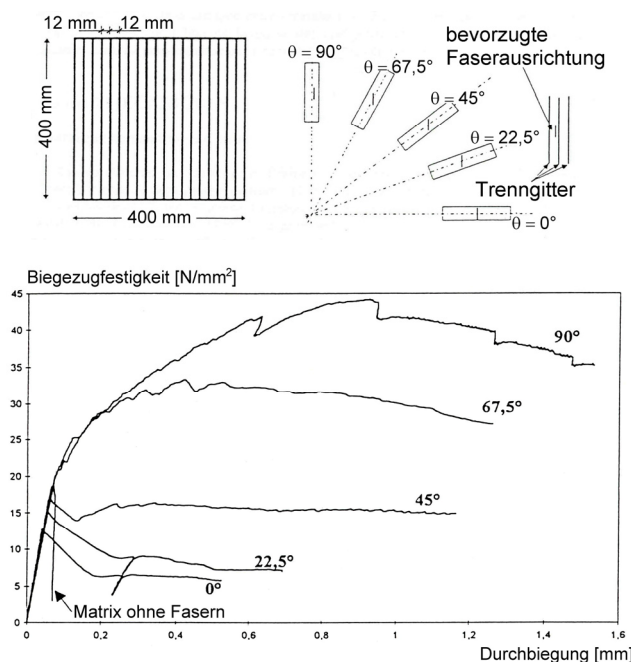


Bild 6.14: Einfluss der Faserorientierung auf die Biegezugfestigkeit [6.28]

Der Einfluss der Faserorientierung auf die erreichbare Festigkeit und das Tragverhalten von UHFB unter Zugbeanspruchung wurde in [6.28] eingehend untersucht. Bild 6.14 zeigt die Ergebnisse. Im besten Fall ($\theta = 90^\circ$) liegen alle Fasern in Zugrichtung und im ungünstigsten Fall ($\theta = 0^\circ$) senkrecht zur Zugrichtung. In letzterem Fall haben die Fasern sogar eine trennende Wirkung, und die Biegezugfestigkeit liegt unterhalb einer reinen Betonmatrix.

Die Orientierung der Fasern im Bauteil, insbesondere bei dünnen Bauteilen, wird durch den Betoniervorgang entscheidend beeinflusst. Bei UHFB mit selbstverdichtenden Eigenschaften orientieren sich die Fasern oft in Fließrichtung; in Spezialfällen, z. B. bei der Herstellung von Tunnelschalen, wurden allerdings auch Ausrichtungen senkrecht zur Fließrichtung beobachtet [6.29]. Bei Rüttelbeton besteht ferner die Tendenz, dass sich die Fasern bei Zuführung von Verdichtungsenergie liegend einschwimmen. Insbesondere lange Fasern richten sich entlang der Schalung parallel zu dieser aus. Die Faserausrichtung hängt auch vom Fasergehalt ab. Bei niedrigeren Fasergehalten orientieren sich die Fasern vor allem in Feinkornbetonen leichter in eine Richtung. Allgemein kann festgestellt werden, dass die Probekörper mit Beanspruchung senkrecht zur Ausrichtung der Fasern eine geringere Zug- bzw. Biegezugfestigkeit aufweisen als bei mit Beanspruchung parallel zur Orientierungsrichtung. Zur Verdeutlichung dieses Verhaltens sind in Tabelle 6.1 einige Ergebnisse aus [6.22, 6.30] dargestellt.

Der dabei untersuchte feinkörnige UHFB mit 2 Vol.-% Stahlfasern ($d/l_f = 0,15/9$ mm) hatte selbstverdichtende Eigenschaften. In den Bildern 6.15 und 6.16 sind die im Biegezugversuch ermittelten Spannungs-Verformungs-Kurven von Plattenstreifen dargestellt, die in Längs- und Querrichtung aus unterschiedlich betonierten Platten herausgesägt wurden. Der Beton wurde einmal mittig eingebracht und verlief konzentrisch zu den Seitenflächen. Im anderen Fall wurde er mit einem Betonierrohr gerichtet in Längs- und Querrichtung verteilt. Der Unterschied in der strömungsbedingten Faserorientierung lässt sich aus der wesentlich geringeren Streuung der Kurven ablesen. Aus diesem Grund sollte bei der Bestimmung der Biegezugfestigkeit nicht nur die Prüfkörpergeometrie, sondern auch das Vorgehen beim Betonieren angegeben werden.

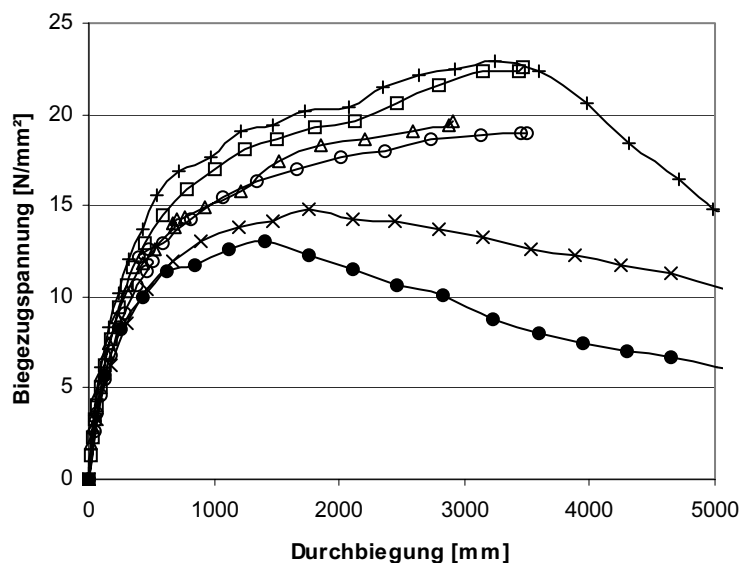


Bild 6.15: Streuung der Last-Verformungs-Kurven von Plattenstreifen, die aus einer Platte mit einer inhomogenen Faserteilung und einer ungünstigen Faserorientierung herausgesägt wurden [6.22, 6.30]

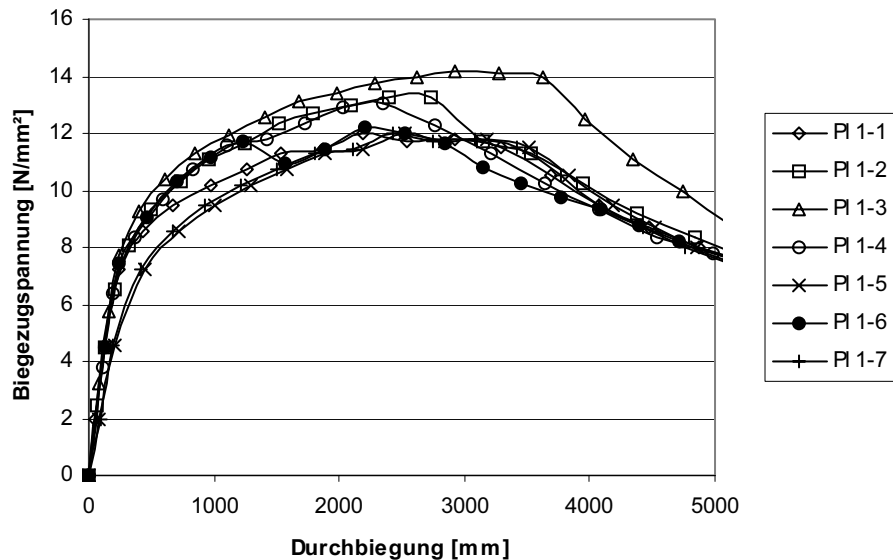


Bild 6.16: Last-Verformungs-Kurven analog zu Bild 6.15 bei herstelltechnisch gleichmäßigerer Faserverteilung und verbesserter Faserorientierung [6.22, 6.30]

6.4.8 Bruchmechanisches Verhalten

In Tabelle 6.1 ist die Bruchenergie wiedergegeben, die an unterschiedlichen Prüfkörpern aus feinkörnigem UHFB mit 2 Vol.-% Stahlfasern gemessen wurde [6.5]. Es zeigt sich deutlich, dass die Prüfkörpergeometrie die Bruchenergie beeinflusst.

In [6.31] wurden die bruchmechanischen Kenngrößen von faserfreiem UHFB mittels Keilspaltversuchen ermittelt. Die Bruchenergie von feinkörnigem UHFB betrug dabei etwa 40 % der Bruchenergie von hochfesten Betonen. Durch Zugabe grober Gesteinskörnung (Basaltsplitt mit Körngröße zwischen 2 und 5 mm) konnte die Bruchenergie zwar erhöht werden, sie betrug aber trotzdem nur ungefähr 100 N/m und blieb niedriger als bei hochfestem Beton. Mit Fasern nimmt die Bruchenergie um bis zu mehrere Zehnerpotenzen zu. In Abhängigkeit von der Fasergeometrie und dem Fasergehalt liegt die Bruchenergie der untersuchten UHFB mit Stahlfasern zwischen 1200 und 40 000 N/m. Dabei spielt die Faserausrichtung wiederum eine wesentliche Rolle.

Das bruchmechanische Verhalten von Beton wird u. a. auch mit der charakteristischen Länge l_{ch} nach Hillerborg u. a. [6.32] beschrieben. Im Vergleich zu den an normal- und hochfesten Betonen ermittelten Werten von Hillerborg sind die charakteristischen Längen von UHFB deutlich kleiner, was das bekanntlich sprödere Bruchverhalten von UHFB bestätigt [6.31].

6.5 Zeitabhängige Verformungen

6.5.1 Autogenes Schwinden

Nach Untersuchungen in [6.5] und [6.15, 6.33] lag das gesamte Schwindmaß eines versiegelten feinkörnigen UHFB unter isothermen Lagerungsbedingungen im Alter von 7 Tagen nach Betonieren bei rd. 0,7 mm/m. Bis zum Alter von 28 Tagen nahm das Schwindmaß auf rd. 0,9 mm/m zu (siehe Bild 6.17).

Einen deutlichen Einfluss auf das autogene Schwinden haben der verwendete Zement und der Zementleimgehalt. Bild 6.17 zeigt, wie durch die Wahl von HS-Zement und durch einen größeren Anteil grober Gesteinskörnung die Schwindverformung verringert werden kann [6.15].

Das hohe autogene Schwindmaß kann zu hohen Zugspannungen bei einer Verformungsbehinderung führen. Dies gilt nicht nur für die Behinderung von Bauteilverformungen insgesamt, sondern insbesondere auch für den inneren Zwang infolge Dehnungsbehinderung durch den Bewehrungsstahl. Aus diesem Grund sollte der Reduzierung des autogenen Schwindens bei der Zusammenstellung der Rezeptur besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Der Einfluss von Stahlfasern auf das autogene Schwinden ist, wie Bild 6.18 zeigt, nach bisher vorliegenden Ergebnissen gering. Eine Zugabe von 2,5 Vol.-% feiner Stahlfasern ($L/D = 9/0,15$ mm) erbrachte nur eine geringe Abnahme des autogenen Schwindmaßes [6.17].

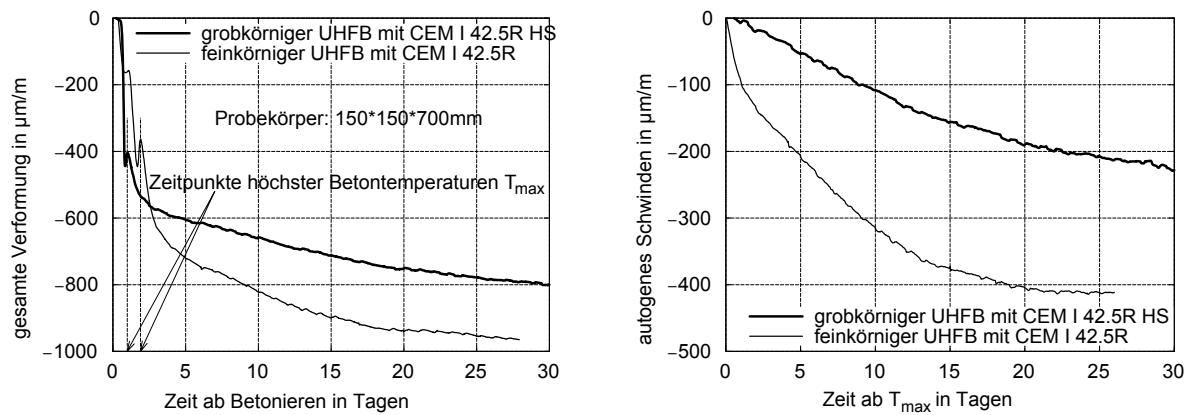


Bild 6.17: Gesamte Verformung (links) und autogenes Schwinden (rechts) von feinkörnigen und grobkörnigen UHFB [6.15]

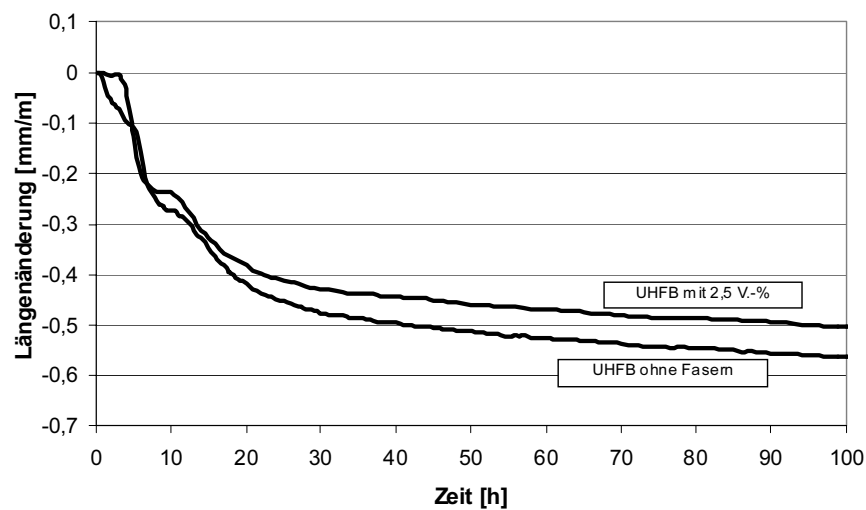


Bild 6.18: Autogene Schwindverformung in Abhängigkeit vom Stahlfasergehalt [6.5]

6.5.2 Trocknungsschwinden

Der zeitliche Verlauf des Trocknungsschwindens entspricht im Wesentlichen dem des hochfesten Betons. Das trocknungsbedingte Schwindmaß ist jedoch deutlich geringer. Ein Zusatz von Stahlfasern verringert das Trocknungsschwinden nur unwesentlich. Bild 6.19 zeigt, dass die Menge an Silikastaub das Trocknungsschwinden von UHFB nicht beeinflusst.

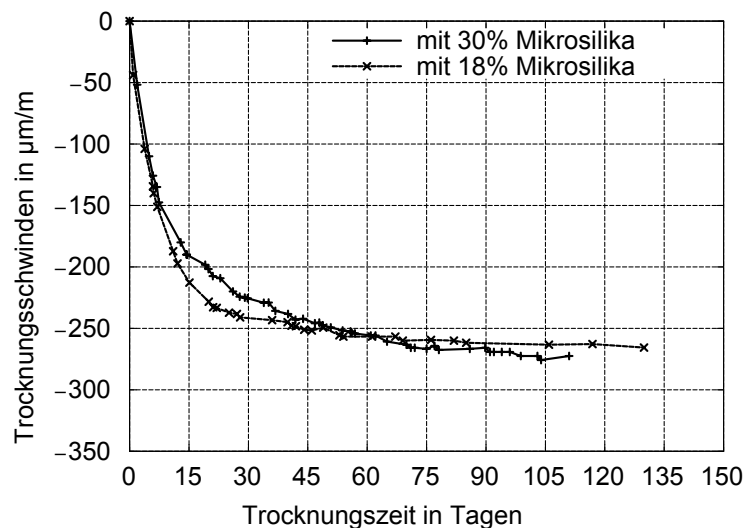


Bild 6.19: Trocknungsschwinden von UHFB [6.15]

Durch eine Wärmebehandlung kann das Schwinden zu einem großen Teil vorweggenommen werden. Die Bilder 6.20 und 6.21 zeigen den Unterschied in der Gesamtschwindverformung zwischen wärmebehandelten (Bild 6.20) und nicht wärmebehandelten Proben (Bild 6.21) für einen fein- und grobkörnigen UHFB mit 2,5 Vol.-% Stahlfasern (Mischungszusammensetzung s. Tabelle 3.5) nach Untersuchungen in [6.5]

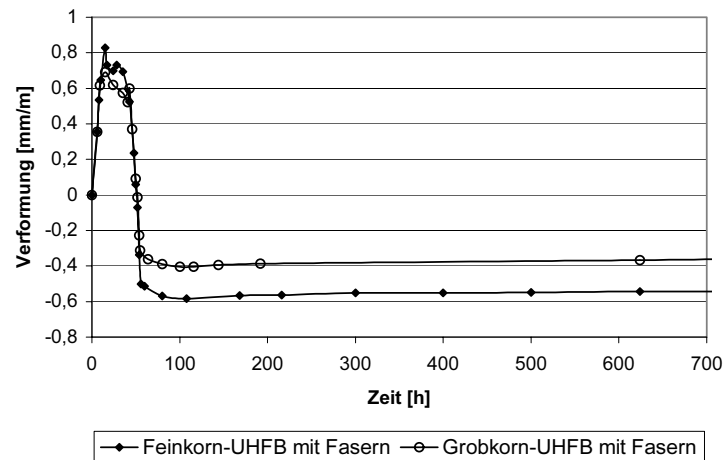


Bild 6.20: Gesamtverformung infolge Trocknungsschwinden für wärmebehandelten fein- und grobkörnigen UHFB mit 2,5 Vol.-% Stahlfasern (Mischungszusammensetzung s. Tabelle 3.5), [6.5]

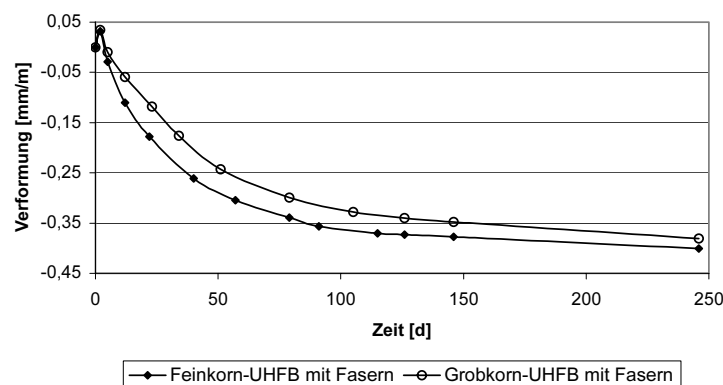


Bild 6.21: Gesamtverformung infolge Trocknungsschwinden für nicht wärmebehandelten fein- und grobkörnigen UHFB mit 2,5 Vol.-% Stahlfasern (Mischungszusammensetzung s. Tabelle 3.5), [6.5]

Dieses Verhalten ist insbesondere für die Fertigteilbauweise vorteilhaft, weil es auf diese Weise einfach möglich ist, Schwindspannungen in der Gesamtkonstruktion zu minimieren. Der Einfluss der Betonstahlbewehrung auf die Verformungsbehinderung ist noch nicht ausreichend untersucht worden. Durch Vorspannung kann der Neigung zur Rissbildung früh entgegengewirkt werden.

6.5.3 Frühschwinden (Plastisches Schwinden oder Kapillarschwinden)

Wegen des geringen Wasser- und hohen Feinkorngehaltes neigt der UHFB sehr stark zur Bildung einer sog. „Elefantenhaut“ und von Rissen im plastischen Zustand (kapillares Schwinden). Durch eine entsprechende Nachbehandlung kann die Reißneigung in diesem frühen Stadium deutlich reduziert werden.

In [6.34] wurde die an verformungsbehinderten Prüfkörpern gemessene Rissfläche als Maß für die Reißneigung infolge Frühschwindens gewählt. Die Zugabe von Stahlfasern erbrachte, wie bei normal- und hochfestem Beton, keine Verringerung der Schwindrissfläche. Bei der Zugabe von bis zu 5 kg/m³ Polypropylenfasern traten zwar mehr Risse auf, diese waren jedoch feiner und kürzer. Die bezogene Schwindrissfläche konnte durch die Zugabe von PP-Fasern gegenüber UHFB ohne Fasern oder mit Stahlfasern um bis zu 90 % verringert werden (siehe Bild 6.22).

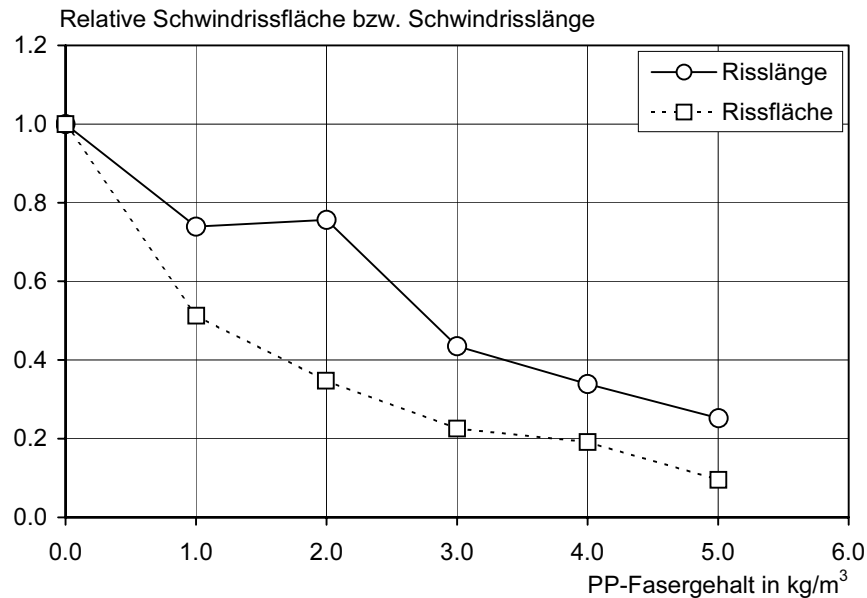


Bild 6.22: Einfluss der PP-Fasern auf das Fröhschwinden von UHFB nach [6.34]

6.5.4 Kriechen

6.5.4.1 Nicht wärmebehandelter UHFB

Ergebnisse in [6.67] ergaben für nicht wärmebehandelten grobkörnigen UHFB eine Grenze der linearen Beziehung zwischen Kriechverformung und Spannung von 50 bis 60 % der Festigkeit zum Zeitpunkt des Belastungsbeginns. Darüber hinaus weisen die Ergebnisse darauf hin, dass mit den Ansätzen in DIN 1045-1 die Kriechzahl von UHFB unterschätzt wird (Bild 6.23). Basierend auf den Ergebnissen von [6.67] sollte die Gleichung der DIN 1045-1 wie folgt modifiziert werden:

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{1,5(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0,42} \quad (6-7)$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{70}{f_{cm}} \right)^{0,7} ; \alpha_2 = \left(\frac{70}{f_{cm}} \right)^{0,2} ; \alpha_3 = \left(\frac{70}{f_{cm}} \right)^{0,5} \quad (6-8)$$

Entsprechend der obigen Gleichung ergibt sich eine Grundkriechzahl von $\varphi_0 = 0,9$, welche auch den Angaben in [6.17] entspricht.

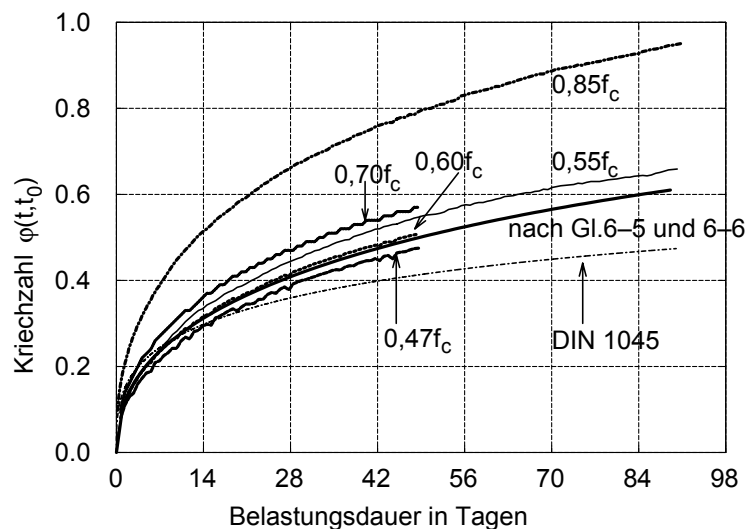


Bild 6.23: Zeitliche Entwicklung der Kriechzahl von nicht wärmebehandeltem grobkörnigem UHFB (Belastungsalter = 28 Tage) [6.15]

Einige Ergebnisse der Kriechuntersuchungen für feinkörnigen UHFB sind in den Tabellen 6.2 und 6.3 dargestellt. Sie deuten auf eine starke Abhängigkeit der Kriechzahl vom Alter der Probe zum Belastungsbeginn hin.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Kriechuntersuchungen mit feinkörnigem UHFB entsprechend [6.17]

Belastungsalter (Tage)	Kriechmaß ($10^{-6}/\text{MPa}$)	Kriechzahl (–)
1	46,9	2,27
4	37,2	1,80
7	32,5	1,57
28	22,2	1,08

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Kriechuntersuchungen von feinkörnigem UHFB [6.35a]

Belastungsalter (Tage)	Belastungsdauer (Tage)	Belastungsniveau	Kriechmaß ($10^{-6}/\text{MPa}$)	Kriechzahl (–)
7	135	0,45 f_c , abgedichtet	37,2	1,613
7	135	0,45 f_c , frei	42,1	1,787

Eine Formulierung der entsprechenden Zeitfunktionen für feinkörnigen UHFB erscheint derzeit aufgrund der noch nicht ausreichenden Datendichte nicht sinnvoll. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Für nicht wärmebehandelten UHFB wird in [6.17] der Wert 0,8 vorgeschlagen.

6.5.4.2 Wärmebehandelter UHFB

Erste Versuche zu diesem Thema [6.5] ergaben für einen wärmebehandelten UHFB mit Grobkorn aus Basalt bei einem Spannungsniveau von 45 % der Bruchfestigkeit eine Kriechzahl von 0,2 nach 90 Tagen Belastungsdauer. Der Beton war zum Belastungsbeginn 28 Tage alt. Dieser Wert ist als Bemessungswert der Grundkriechzahl für wärmebehandelten UHFB auch in [6.17] angegeben.

6.6 Wärmedehnzahl

Nach Untersuchungen in [6.33] liegt die Wärmedehnzahl des erhärteten selbstverdichtenden feinkörnigen UHFB bei rd. $12 \mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$. Dieser Wert liegt in der gleichen Größenordnung wie der des Normalbetons (rd. $11 \mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$).

Es ist keine Wärmedehnzahl für UHFB in sehr jungem Alter (einige Stunden nach Betonieren bis 3 Tage) bekannt. Untersuchungen hierfür sind erforderlich, um das tatsächliche autogene Schwinden genauer bestimmen zu können.

6.7 Verhalten unter dynamischer Belastung

Im Hinblick auf den Widerstand gegen Ermüdung wurden Versuchsserien an ungerissenen Prüfkörpern aus UHFB mit und ohne Fasern in [6.5, 6.5a] durchgeführt. Für faserhaltige UHFB wurde ein Wöhler-Diagramm für Druckschwellbelastung erstellt (Bild 6.24). In Bild 6.24 sind die ertragenen Spannungen auf die Druckfestigkeit bezogen.

Die in Bild 6.24 ebenfalls eingetragene Linie für Normalbeton zeigt, dass trotz des bei UHFB wesentlich höheren Spannungsniveaus kein signifikanter Unterschied zum Verhalten von Normalbeton besteht [6.61, 6.62].

In [6.5, 6.25] sind Ergebnisse zur Biegezugfestigkeit gerissener Balken unter Schwellbelastung dargestellt. Dabei wurden gerissene Balken mit den Abmessungen $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ aus UHFB mit 17 mm langen Stahlfasern ($d/l_f = 115$) sowie unterschiedlich langen Polyvinylalkoholfasern im 4-Punkt-Biegezugversuch mit einer Oberspannung von rd. 10 N/mm^2 schwellend auf Biegezug beansprucht. Die initiierte Rissweite betrug rd. 0,5 mm. Mit mindestens rd. 1,8 Vol.-% Stahlfasern konnten die Balken 1 Mio. Lastwechsel ertragen, ohne zu versagen. Die Balken mit 4 Vol.-% Polyvinylalkoholfasern und mit einem Fasercocktail aus 1 Vol.-% Stahl- und 2 Vol.-% Kunststofffasern erreichten, wie Bild 6.25 zeigt, bei steigender Rissöffnung je nach Faserart und -menge zwischen rd. 30 000 und rd. 170 000 Lastwechseln.

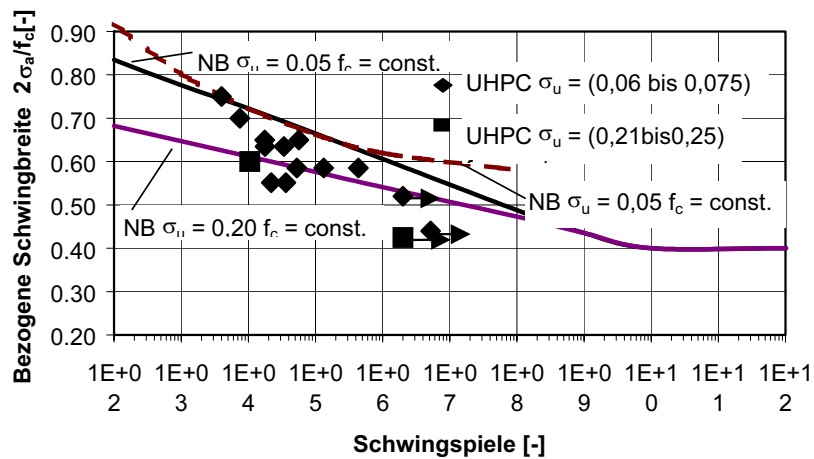


Bild 6.24: Wöhler-Diagramm für grobkörnigen UHFB mit Fasern [6.5]

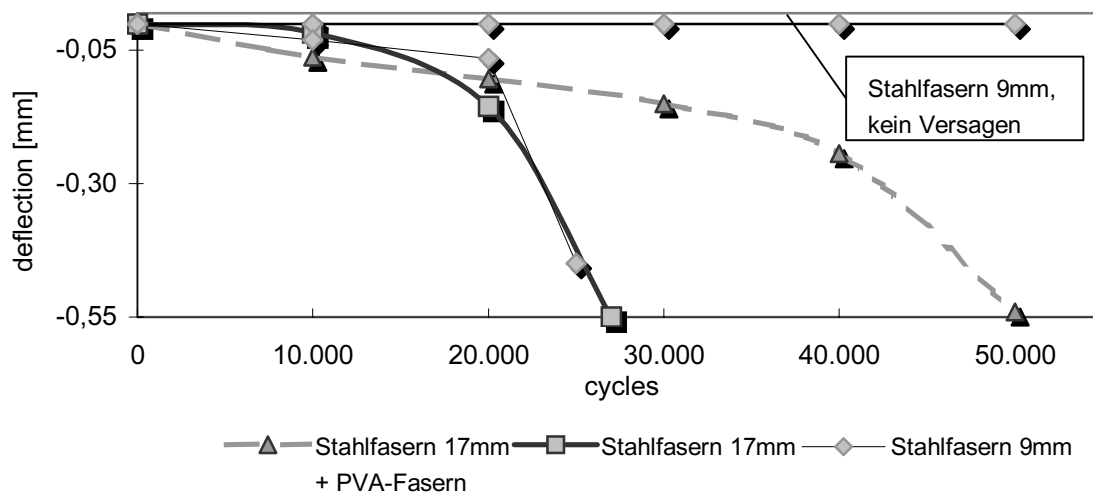


Bild 6.25: Zunahme der Verformung bei vorgerissenem faserhaltigem UHFB unter Schwellbeanspruchung auf Biegezug [6.26].

6.8 Festigkeit unter mehraxialer Belastung und Teilflächenpressung

Derzeit gibt es nur wenige Erkenntnisse über das Verhalten von UHFB unter einem mehrachsigen Druckspannungszustand. Wie bei normalfesten bzw. hochfesten Betonen ist hierbei eine Zunahme der Festigkeiten bei gleichzeitiger Steigerung der Duktilität zu erwarten. Allerdings verringert sich der positiv wirkende Effekt der Umschnürung mit zunehmender Betondruckfestigkeit. Darüber hinaus bleibt bei UHFB die Querdehnzahl bis zu einem Druckspannungsniveau von ca. 70 % konstant [6.15]. Die Querdehnungszunahme im nichtelastischen Bereich ist ebenfalls gering, so dass insgesamt eine geringere Tragfähigkeitssteigerung bei einer Teilflächenbelastung im Vergleich zu Normalbeton und hochfestem Beton zu erwarten ist. Diese Einschätzung wurde durch die Versuchsergebnisse in [6.35] bestätigt. Eine Übertragung des Bemessungsansatzes der DIN 1045-1 auf UHFB führt zu Unsicherheiten. Für die Ermittlung der zulässigen Teilflächenbelastung muss ein Reduzierungsfaktor eingeführt werden (siehe Abschnitt 7). Weiterhin zeigten die Versuche, dass bei der Bemessung eine Unterscheidung zwischen feinkörnigen und grobkörnigen UHFB vorgenommen werden sollte. Der Feinkornbeton konnte im Vergleich zum Grobkornbeton (mit einer 5 mm Basaltkörnung) eine geringere Teilflächenbeanspruchung aufnehmen. Die wenigen Versuche mit faserbewehrten UHFB haben bisher widersprüchliche Ergebnisse geliefert.

6.9 Verbund zwischen UHFB und Betonstahl bzw. Spannstahl

Für das Verbundverhalten zwischen UHFB und Stabstahl bzw. Spannstahl liegen zwar einige Versuchsergebnisse vor. Bemessungsregeln für Verbundspannungen und Verankerungslängen sind jedoch nicht vorhanden. Auch die französische Richtlinie [6.17] macht hierzu keine Angaben.

In Frankreich wurden Ausziehversuche an Litzen und an Drähten durchgeführt. Dabei wurde sowohl die Einbindelänge als auch die Betondeckung variiert. Versuche in [6.36] an faserbewehrtem UHFB ergaben, dass die Verbundspannung bei veränderlicher Einbindelänge praktisch konstant bleibt und dass sie bei zunehmender Betondeckung linear ansteigt (Bild 6.26). Versuche mit profilierten oder nicht profilierten Litzen bzw. Drähten ergaben, dass die Rippen bei den Litzen keinen Einfluss haben, allerdings steigt bei den Drähten die maximale Verbundspannung auf einen Wert von 35 N/mm². Für Litzen liegen bei ausreichender Betondeckung die Werte bei etwa 40 MPa.

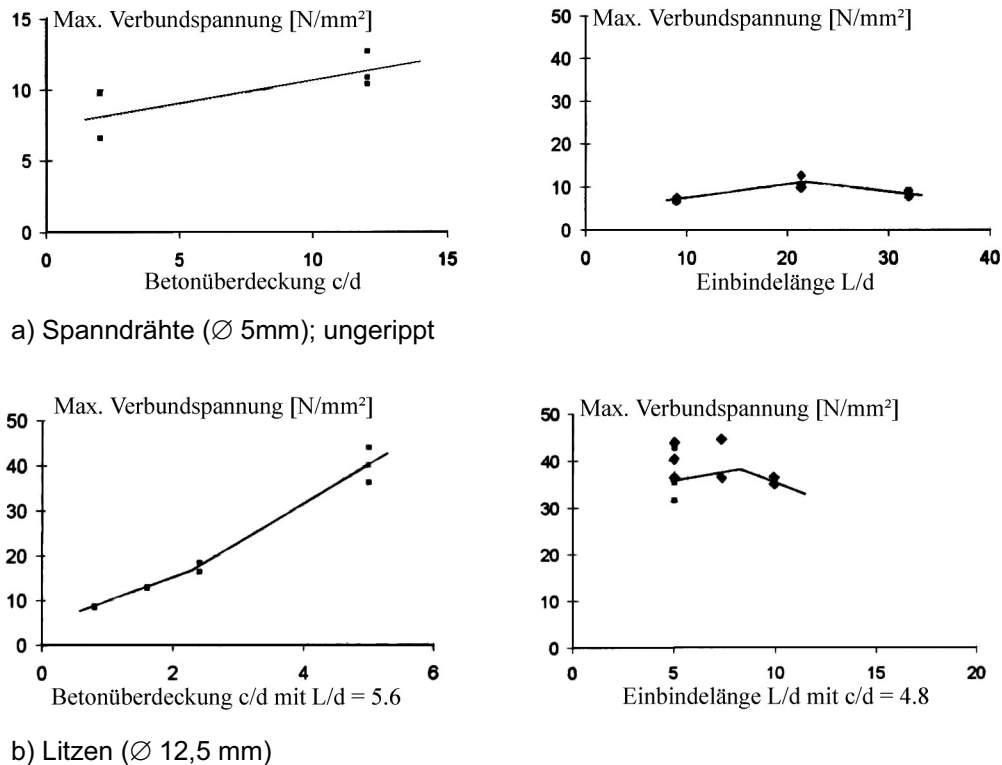


Bild 6.26: Maximale Verbundspannung für Drähte und Litzen in Abhängigkeit der Betondeckung c bzw. der Einbindelänge L im Verhältnis zum Stabdurchmesser d [6.36]

In [6.37] wurde bei Ausziehversuchen mit Stabstahl Ø 10 mm, einer Verbundlänge von 20 mm und einer Betondeckung kleiner 25 mm ein Aufspalten der Betondeckung in Längsrichtung festgestellt. Ebenso wie bei diesen Versuchen konnten auch in [6.19] mit Ductal® und Betonstählen Ø 4 mm sehr hohe Verbundspannungen in der Größenordnung von 40 bis 70 MPa erreicht werden.

Aufgrund dieser hohen Verbundfestigkeiten muss bei dem Probekörper für Ausziehversuche gemäß RILEM die Verbundlänge von $5 \cdot \varnothing$ verringert werden, da der Stabstahl nicht herausgezogen werden konnte, bevor er zu fließen begann. Um die Verbundfestigkeit zu ermitteln, sollte wie in Bild 6.27 dargestellt die Verbundlänge auf $2 \cdot \varnothing$ vermindert werden. Die relativ kurze Verbundlänge erfordert sehr große Sorgfalt bei der Herstellung von Probekörpern, da sonst große Streuungen in den Versuchsergebnissen auftreten können.

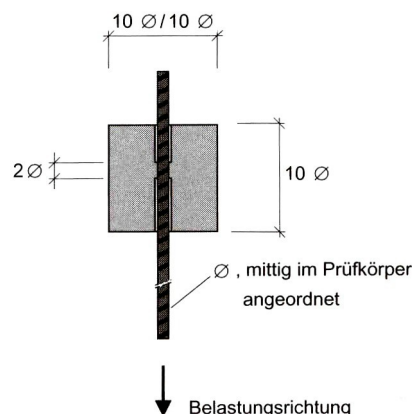


Bild 6.27: Versuchskörper zur Ermittlung der Verbundfestigkeit in Anlehnung an RILEM

In Bild 6.28 ist exemplarisch die in [6.18] ermittelte Beziehung zwischen den Verbundspannungen und den Verschiebungen am lastfreien Ende wiedergegeben.

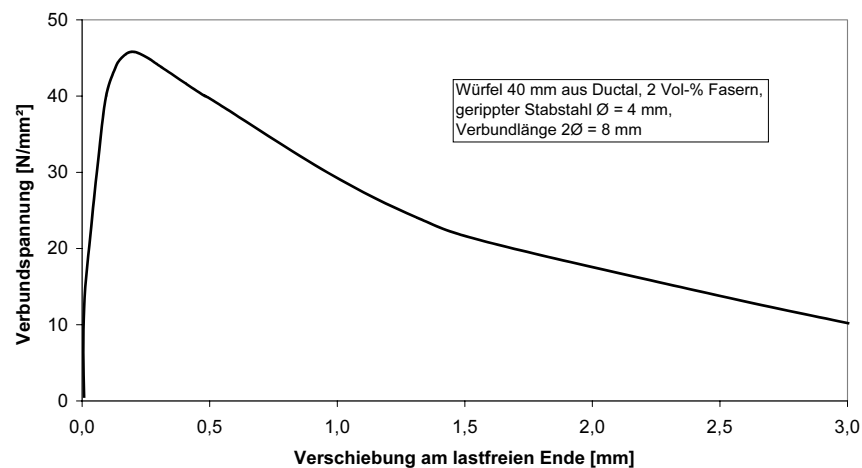


Bild 6.28: Beispiel für eine Beziehung zwischen den Verbundspannungen und den Verschiebungen am lastfreien Ende [6.18]

Das Bild 6.29 zeigt einige Versuchsergebnisse aus [6.37] für einen UHFB ohne Fasern mit Größtkorn 5 mm und einen gerippten Stabstahl $\varnothing 10$ mm.

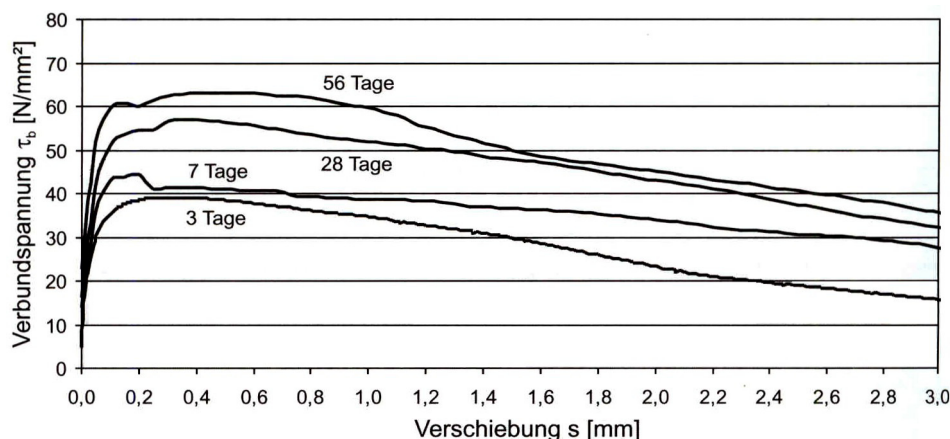


Bild 6.29: Beispiel für eine Beziehung zwischen den Verbundspannungen und den Verschiebungen am lastfreien Ende bei einer Verbundlänge von $1,5 \varnothing$ [6.37]

In [6.64] wurden 3,50 m lange, mit Litzen vorgespannte Verbundträger auf Biegung beansprucht. Dabei wurde festgestellt, dass der lichte Abstand zwischen den Litzen verringert und dass u. a. auf eine Querkraftbewehrung verzichtet werden kann.

6.10 Widerstand gegen Brandeinwirkung

6.10.1 Allgemeines

Die aus der Brandeinwirkung resultierende Erwärmung führt innerhalb des Betongefüges zu einer physikalisch und chemisch bedingten Phasenumbildung und zu inneren Spannungszuständen und damit makroskopisch zum Verlust an Steifigkeit und Festigkeit.

Dabei unterscheidet sich normalfester Beton ganz wesentlich von hochfestem und ultrahochfestem Beton. In Brandversuchen zeigen hochfeste und ultrahochfeste Betone die Neigung zu frühzeitigen Abplatzungen an den brandbeanspruchten Oberflächen [6.38]. Ursache ist das im Vergleich zum Normalbeton deutlich geringere Transportvermögen für Feuchte in der sehr dichten, kapillarporenenarmen Zementsteinmatrix. Auch im Vergleich zum hochfesten Beton ist die Porosität bei ultrahochfesten Betonen nochmals geringer. Diese hohe Dichtheit des UHFB wirkt sich im Brandfall nachteilig aus. Wird ein Betonkörper durch eine Brandbeanspruchung erhitzt, so verdampft ab einer Temperatur von 105 °C freies und physikalisch gebundenes Was-

ser. Ein Teil diffundiert in den Betonkörper hinein und kondensiert in den noch nicht erhitzten Zonen [6.39]. Dieser Vorgang wird durch die quasi vollständige Füllung einer temperaturbedingten Kondensationszone mit Wasser abgeschlossen. Die weitere Diffusion des Wasserdampfes in die kühleren Zonen des Betons wird hierdurch unterbunden. Als Folge steigt der Dampfdruck insbesondere innerhalb der Kapillarporen des Zementsteingefüges. Bei einem Normalbeton mit seiner relativ hohen Porosität kann sich der Dampfdruck zum einen in größeren Poren entspannen oder durch Entweichen abbauen. Beim sehr dichten ultrahochfesten Beton hingegen kommt es zu einem Anstieg des Wasserdampfdruckes. Überschreitet dieser die Zugfestigkeit des Betons, kommt es zu explosionsartigen Abplatzungen, die bei weiterem Fortschreiten (komplette Zerstörung der Oberfläche) zum Materialversagen und somit zum Bauteilversagen führen. Die temperaturabhängigen Festigkeits- und Steifigkeitsveränderungen sind in diesem Fall nicht maßgebend. Bild 6.30 stellt den zuvor beschriebenen Prozess schematisch dar.

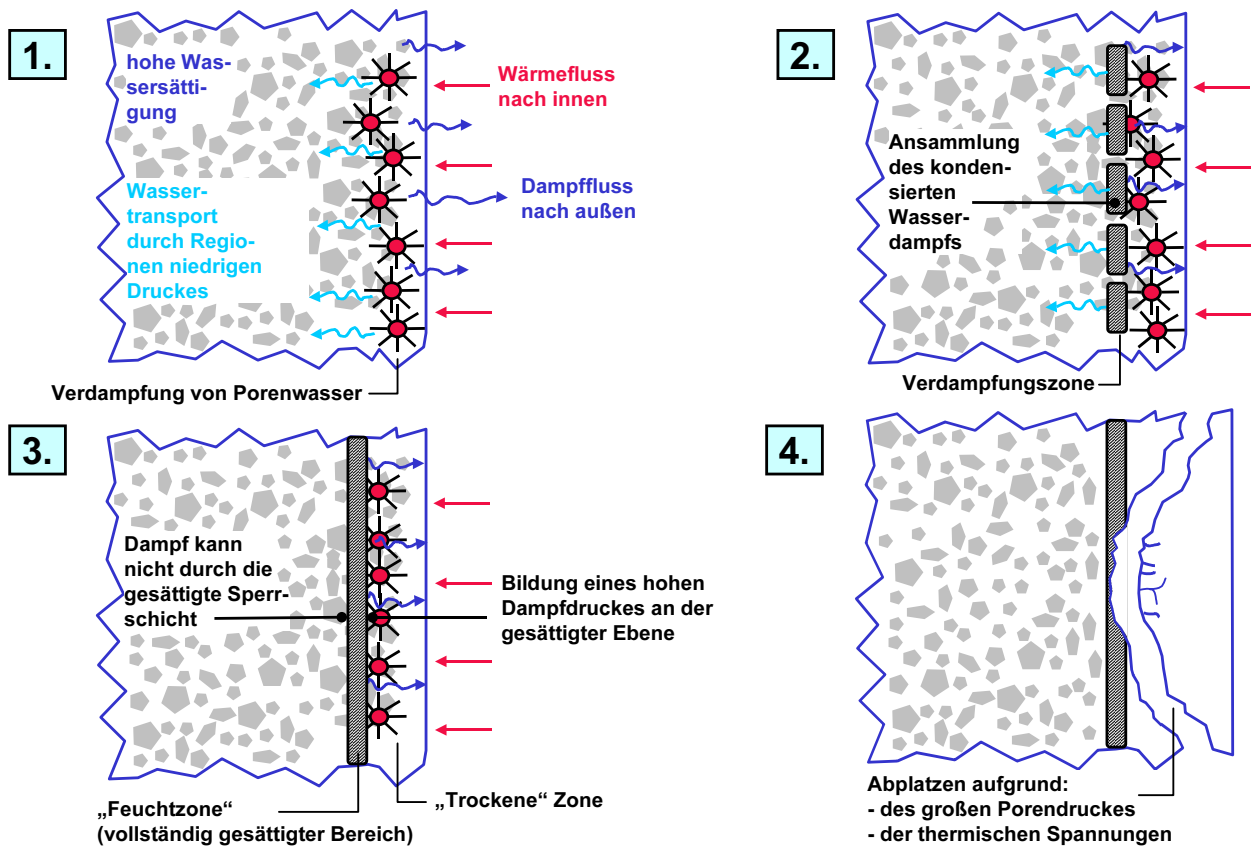


Bild 6.30: Darstellung der Entstehung von Abplatzungen bei hochfesten und ultrahochfesten Betonen in Anlehnung an [6.39]

Bild 6.31 verdeutlicht schematisch die deutlich geringere trockene Zone im Bereich der beflamten Seite bei hochfestem Beton. Die gesättigte Zone liegt somit näher an der brandbeanspruchten Oberfläche, was zu einem zeitlich früheren Abplatzen führt. Für ultrahochfesten Beton ist dieses Phänomen noch ausgeprägter.

Eine weitere Grund für den Aufbau erhöhter innerer Spannungen stellt die Gesteinskörnung dar [6.40, 6.41, 6.42]. Insbesondere quarzitisches Gesteinskörnungen zeigen eine temperaturabhängige Anomalie ihres Temperatur-Ausdehnungsverhaltens. Ursache hierfür ist, dass sich bei einer Temperatur von 573 °C der Tief-Quarz (α -Quarz) unter Atmosphärendruck in Hoch-Quarz (β -Quarz) umwandelt (Quarzsprung). Bei dieser spontanen Phasenumwandlung vergrößert sich das Volumen des Gesteins [6.42].

Aus mehreren Versuchen ist bekannt, dass durch die Zugabe feiner Stahl- und/oder Kunststoff-Fasern, wie z. B. Polypropylenfasern, das Brandverhalten hochfester Betone und ultrahochfester Betone verbessert werden kann [6.38, 6.43, 6.44, 6.45, 6.46, 6.46a].

Die Wirkung solcher Fasern lässt sich darauf zurückführen [6.46], dass die Permeation des Betons durch die Bildung von Kapillarporen und durchlässige Übergangszonen verbessert wird, die beim Abschmelzen und Verbrennen der Fasern gebildet werden (s. Bild 6.32). Bei einem Brand wird so ein für Wasserdampf ausreichend permeables System gebildet, in welchem sich der Wasserdampfdruck hinreichend schnell abbauen kann, so dass es zu Abplatzungen kommt.

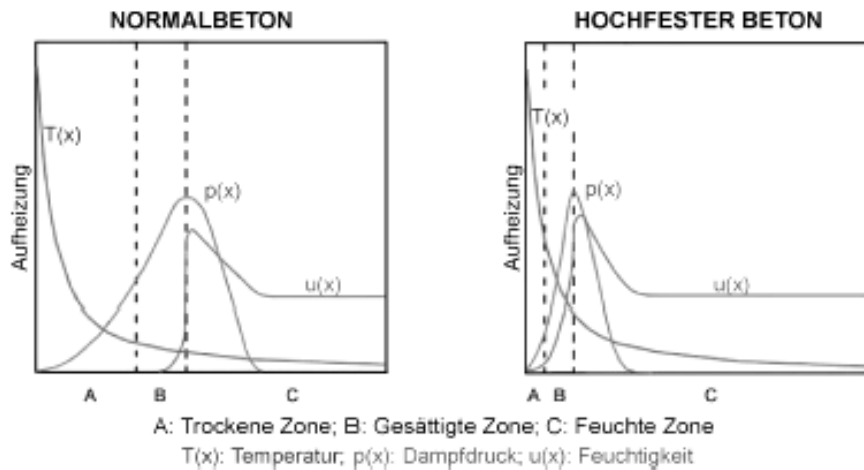


Bild 6.31: Unterschied zwischen Normalbeton und Hochleistungsbeton [6.39]

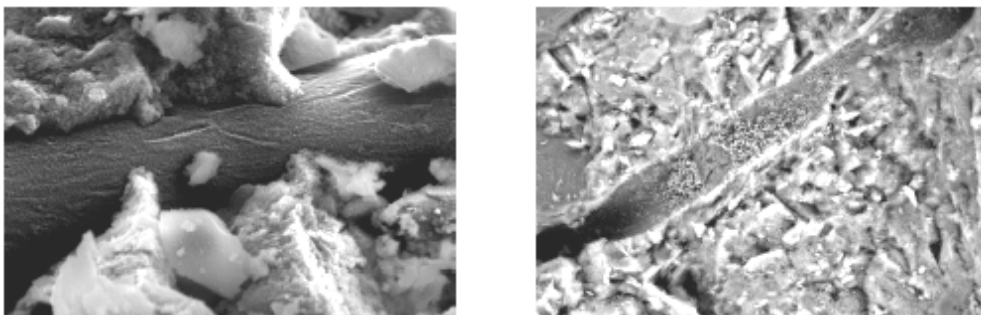


Bild 6.32: Polypropylenfaser vor (links) und nach (rechts) der Beflammung [6.42]

6.10.2 Stahlfasern

Betone erleiden im Temperaturbereich von 100 °C bis 200 °C infolge der Entwässerung von Hydratationsprodukten und anderen Einflüssen Festigkeitsverluste, insbesondere Zugfestigkeitsverluste. Durch die Zugabe von Stahlfasern erhöht sich die Aufheizgeschwindigkeit im Beton und damit auch der Beginn der Gefügestörung [6.46]. Andererseits können Stahlfasern das Abfallen von abgesprengten Betonschollen verhindern. Diese schützen dann den noch nicht zerstörten Beton vor direkter Beflammung, wodurch die Temperaturanstiegsgeschwindigkeit im Inneren des Betons reduziert wird. Sie stellen allerdings nur eine zeitlich begrenzte Barriere dar. Bei länger andauernder Brandbelastung geht diese Schutzwirkung aufgrund der Erweichung der Fasern und des reduzierten Verbunds (unterschiedliche Temperatureindringkoeffizienten) zwischen Fasern und Beton jedoch verloren.

6.11 Dauerhaftigkeit und besondere Eigenschaften

6.11.1 Alkalität der Porenlösung

Die Alkalität der Porenlösung und damit der hohe pH-Wert wird im Wesentlichen von den löslichen Alkalien (Na^+ , K^+) des Zementes bzw. Zusatzstoffes bestimmt. Aufrechterhalten wird diese hohe Basizität der Porenlösung durch das bei der Zementhydratation abgespaltene Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), das im Porenwasser allerdings nur zu einem geringen Anteil gelöst ist. Als kristalliner Bodenkörper steht es in großen Mengen für die puzzolanische Reaktion des Silicastaubes oder der Flugasche zur Verfügung und kann daher als Alkalitätsreserve angesehen werden (pH rd. 12,5 für eine gesättigte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung).

Aufgrund des sehr niedrigen Anteils an nicht chemisch gebundenem Wasser darf bezweifelt werden, dass nennenswerte Mengen an Porenwasser mit einem entsprechenden „Alkalitätsdepot“ vorhanden sind [6.47]. Infrarotspektroskopische Messungen zeigten, dass dies lediglich im Gelporenbereich unter 50 nm der Fall ist [6.48]. Der absolut gesehen hohe Anteil an Silikastaub ist in Relation zu dem ebenfalls hohen Zementanteil von meist mehr als 600 bis 1000 kg/m^3 Beton zu sehen. Dennoch dürfte der Anteil an verfügbarem Calciumhydroxid ähnlich niedrig sein wie bei Betonen mit hohen Puzzolangehalten nach [6.49, 6.50]. Andererseits ist ein erheblicher Teil des Zementes nicht hydratisiert. Inwieweit er z. B. bei einer Gefügeschädigung aktiviert wird und dadurch z. B. Risse geschlossen werden, ist noch nicht bekannt.

In [6.65, 6.66] wurden hochfeste Zementsteine mit 25 M.-% Silikastaub und einer Kombination von 15 M.-% Silikastaub und 40 M.-% Flugasche in Verbindung mit CEM I ($w/b = 0,23$) und 25 M.-% Silikastaub in Verbindung mit CEM III/A ($w/b = 0,34$) untersucht. Dabei wurde das gesamte Calciumhydroxid durch die puzzolanische Reaktion abgebaut, d. h., die Alkalitätsreserve ist aufgebraucht. Weiterhin werden Alkalien in Reaktionsprodukte eingebaut.

6.11.2 Diffusion und Permeabilität

Die hohe Gefügedichtigkeit des UHFB spiegelt sich u. a. in den bisher veröffentlichten Daten zur Diffusion wider. In [6.49] wird über einen Chloriddiffusionskoeffizienten in der Größenordnung von $0,02 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ berichtet, der damit um einen Faktor von mehr als 100 unter dem Vergleichswert eines Betons der Festigkeitsklasse C30/37 lag. Im Rahmen der üblichen Versuchsdauer war UHFB auch noch quasi „migrationsdicht“ für Chloridionen [6.51]. Dort wird ein Diffusionskoeffizient von $2 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ angegeben.

Der Chloriddiffusionswiderstand von UHFB wurde in [6.52] in Anlehnung an den Migrationstest in [6.53] bestimmt. Mit einer Chlorideindringtiefe von weniger als 0,1 mm war der Eindringwiderstand sehr hoch. Im Vergleich dazu betrug die Eindringtiefe bei dem in Bild 6.33 ebenfalls dargestellten Normalbeton mit einem Zementgehalt von 350 kg/m^3 und einem Wasserzementwert von 0,50 rd. 23 mm und bei einem hochfesten Beton mit einem Zementgehalt von 450 kg/m^3 und einem Wasserzementwert von 0,33 immerhin noch 7 mm.

In [6.18a] wurde neben der Permeabilität auch die kapillare Wasseraufnahme unterschiedlich zusammengesetzter UHFB untersucht. Der Unterschied zu Normalbetonen betrug mehr als eine Zehnerpotenz. Orientierende Versuche in [6.18b] bestätigen dies.

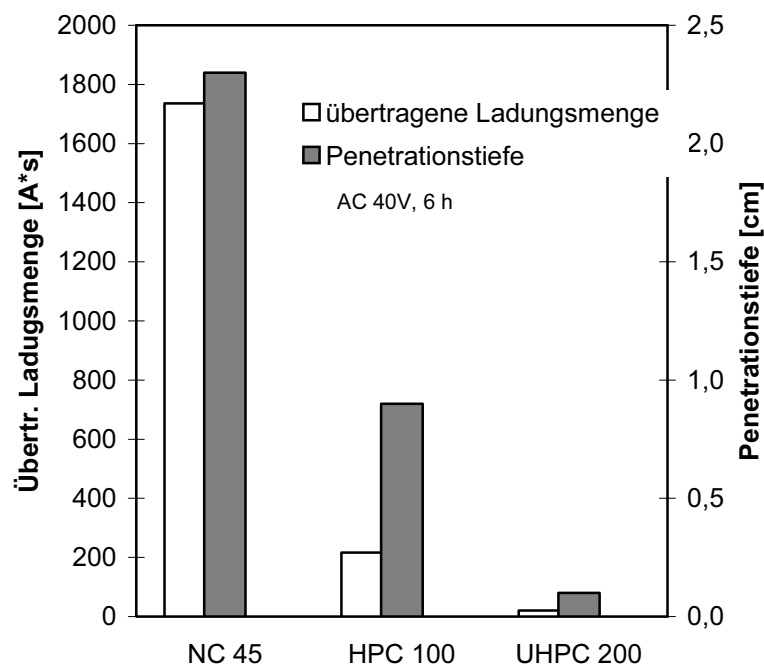


Bild 6.33: Übertragene Ladungsmenge und Eindringtiefe im Chloridwiderstandstest [6.5, 6.52]

Über Permeabilitätsmessungen wird in der Literatur für Ductal und in [6.5, 6.52] für feinkörnige UHFB berichtet.

Bei Versuchen in [6.54] konnte an Labormischungen mit dem vorhandenen Prüfaufbau keine Gaspermeation festgestellt werden. Daraus lässt sich ebenfalls ein Permeabilitätskoeffizient ableiten, der deutlich kleiner als 10^{-17} m^2 ist. Die Untersuchungen in [6.52] an wassergelagerten und an wärmebehandelten Feinkornbetonen ergaben Permeabilitätskoeffizienten von $1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ für den wärmebehandelten und bis $8 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ für den wassergelagerten UHFB, siehe Bild 6.34.

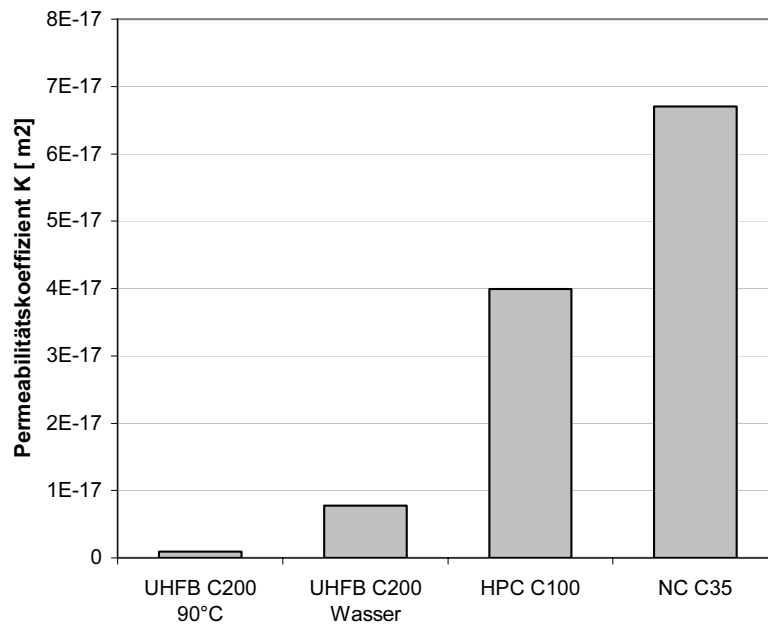


Bild 6.34: Permeabilitätskoeffizient geprüft mit Stickstoff [6.5, 6.52]

6.11.3 Widerstand gegen chemischen Angriff

6.11.3.1 Treibender Angriff

Alkalikieselsäurereaktion AKR

Normalerweise stellt der sehr hohe Gehalt an Zement, Silikastaub und Quarzsand hinsichtlich der Alkalikieselsäurereaktion einen Risikofaktor dar. Gestresste Quarzsande und agglomerierter Silikastaub können zusammen mit den Alkalihydroxiden in der Porenlösung zur Bildung des Alkali-Kieselsäure-Gels führen, das unter Wasseraufnahme betonschädigende Quelldrücke aufbaut. Aufgrund der hohen Gefügedichtigkeit und der inneren Austrocknung des UHFB ist dieses Risiko aber als sehr klein einzuschätzen, obwohl noch keine abgeschlossenen Versuchsergebnisse vorliegen.

Um die Verarbeitbarkeit des Frischbetons zu verbessern, wird zudem in der Regel ein NA-Zement mit einem deutlich reduzierten Anteil an wasserlöslichen Alkalisulfaten (Na_2O -Äquivalent $< 0,60$) verwendet. Der niedrige Wasserzementwert von etwa 0,20 bedingt zudem eine sehr geringe Menge an Porenlösung. Weiterhin kann wegen der sehr hohen Dichte der Matrix und der geringen Kapillarporosität sehr wenig bis gar kein Wasser in den Beton eindringen. Trotzdem wirft der vergleichsweise hohe Silikagehalt die Frage auf, ob infolge unzureichend dispergierten Silikastaubs dennoch eine AKR denkbar ist. Deshalb wurden Versuche zur optimalen Dispergierung von Silikastaub bei Herstellung eines Pulverpremixes durchgeführt. Aus Mischungen, bei denen Agglomerate aus Zement und/oder Silikastaub festgestellt wurden, wurden hochfeste und ultrahochfeste Betone hergestellt und mit einem einfachen Schnelltest in Anlehnung an RILEM TC 106-2 auf AKR geprüft. Die Betone wurden mit Normensand nach DIN EN 196 hergestellt. Die Geometrie der Prismen ($10 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) wurde modifiziert und der Mischablauf nach DIN EN 196-1 wurde verkürzt. Es wurden 6 Mischzemente, eine Silikasurry (67 % Feststoff), eine rückgetrocknete Slurry ($< 125 \mu\text{m}$) und eine Serie ohne Silikastaub geprüft. Die rückgetrocknete Slurry wies relativ dichte Agglomerate mit einem hohen Anteil an Agglomeraten zwischen 63 und $125 \mu\text{m}$ auf. Wie in Bild 6.35 zu erkennen ist, blieben die Dehnungen aller Proben mit Ausnahme derjenigen mit getrockneter Slurry unterhalb der Dehnung der Mischung ohne Silikastaub. Offensichtlich wird die Reaktion des Quarzsandes mit der im Versuch verwendeten heißen Prüflauge, die in der Nullprobe zu einer deutlichen Expansion führte, durch den fein verteilten Silikastaub abgepuffert. Auf schadensauslösende Agglomerate lässt lediglich die Probe mit der rückgetrockneten Slurry schließen. Eine lichtmikroskopische Aufnahme zeigt deutlich die Vielzahl von Alkali-Kieselsäuregel-Knollen, die Auslöser der Dehnung waren (Bild 6.35).

Versuche in der Nebelkammer ($20^\circ\text{C}/100\% \text{ r. F.}$) zeigten ebenfalls den sehr hohen Widerstand von wärmebehandeltem UHFB gegen die starke Beanspruchung durch die 80°C heiße Natronlauge (1N).

Für die sachgerechte Herstellung von ultrahochfestem Beton ist die ausreichende Dispergierung des Silikastaubes somit sehr wichtig. Bei der Verwendung von Silikasuspensionen können leicht Agglomerate auftreten. Bei der Lagerung der Slurry und in Transportleitungen kann sie unter Umständen leicht antrocknen, wobei sehr dichte Agglomerate entstehen können.

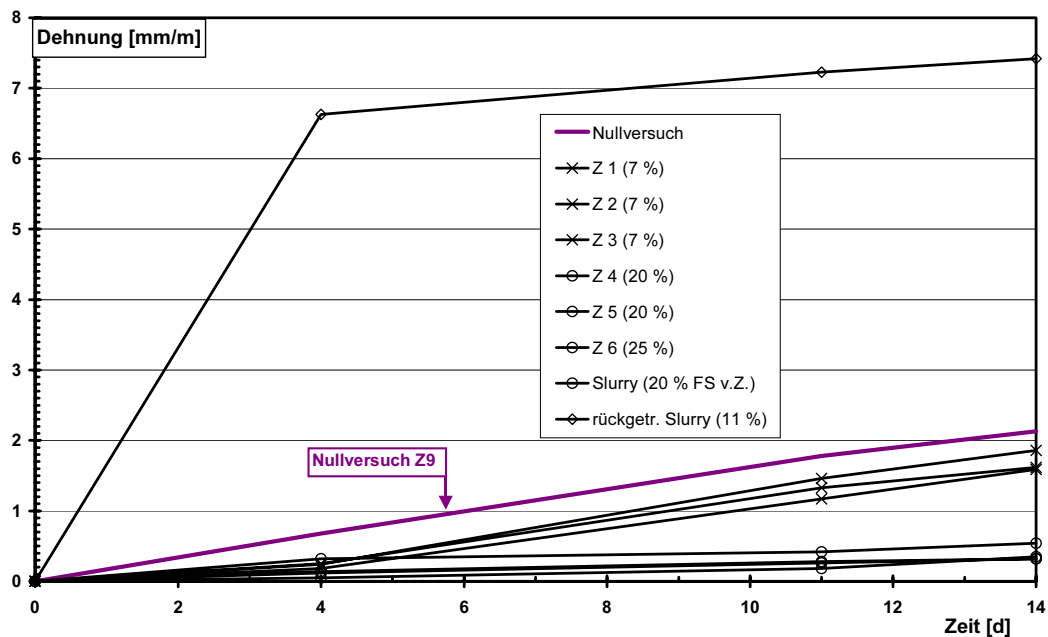


Bild 6.35: Dehnungen infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion von Proben mit unterschiedlich dispergiertem Silikastaub bzw. Silikasuspensionen [6.56]

Inwieweit für grobkörnigen UHFB die Regelungen der Alkalirichtlinie des DAfStb anwendbar sind, muss noch untersucht werden.

Sulfatwiderstand

Derzeit liegen noch keine abschließenden Erkenntnisse zur Betonschädigung durch Sekundärettringitbildung vor. Da in der Regel C_3A -arme und -freie HS-Zemente verwendet werden, ist das Risiko einer Sekundärettringitbildung entsprechend gering. Die niedrige Kapillarporosität und die hohe Dichtheit des Gefüges verhindern zudem, dass das zur Treibreaktion benötigte Wasser eindringt. Nach [6.55] ist eine Sekundärettringitbildung bei Beton immer die Folge einer Vorschädigung.

Orientierende Versuche in [6.56], bei denen in Anlehnung an DIN EN 1376-2 Prüfkörper aus UHFB abwechselnd in gesättigter Sulfatlösung und trocken an Laborluft gelagert wurden, bestätigen, dass mit einem Sulfatreiben nicht zu rechnen ist. Obwohl die Prüfkörper teilweise im Alter von 7 Tagen mit flüssigem Stickstoff so vorgeschädigt wurden, dass sichtbare Mikrorisse auftraten, wurden bis zu einem Alter von 90 Tagen an beiden untersuchten Betonen sowohl mit C_3A -freiem HS-Zement als auch mit üblichem Portlandzement mit einem C_3A -Gehalt von 12 M.-% mittels Ultraschall keine Gefügeveränderungen festgestellt. Mit dem Elektronenmikroskop wurden lediglich in den thermisch vorgeschädigten Betonprüfkörpern sehr geringe nicht schädigende Mengen an Ettringit detektiert.

Die hohe Gefügedichtigkeit behindert auch die für eine Korrosion notwendige Zufuhr an Sulfationen und an Wasser von außen in den Beton. Auch die „Delayed Ettringite Formation“ (DEF), die auf eine Rückbildung des aus primärem Trisulfat entstandenen Monosulfates zu Ettringit im erstarrten Betongefüge beruht und somit nicht auf die Zufuhr von Sulfat angewiesen ist, ist nicht zu erwarten. Bei Verwendung von HS-Zementen wird in Verbindung mit den niedrigen Wassergehalten bereits die primäre Ettringit-Bildung unterdrückt [6.3]. Inwieweit eine Treibreaktion möglich ist, wenn kein HS-Zement verwendet wird, muss noch abgeklärt werden. Aufgrund des hohen Zementgehaltes und der mit hohen Temperaturen von 8–90 °C erfolgenden thermischen Nachbehandlung ist zumindest ein potenzielles Risiko nicht auszuschließen. Schädigungen an UHFB aufgrund von DEF sind aber in der Literatur bisher nicht beschrieben worden.

6.11.3.2 Lösender Angriff

Der Widerstand von UHFB gegen Säureangriff wurde bislang nicht untersucht. Er dürfte wegen des sehr dichten Gefüges, wegen des geringen Anteils an $Ca(OH)_2$ und/oder durch die Wahl hüttensandhaltiger Zemente höher sein als bei Normalbeton. Genaues ist aber bislang nicht bekannt.

6.11.4 Widerstand gegen physikalischen Angriff

6.11.4.1 Frost-Tau-Widerstand

Untersuchungen zum Frostwiderstand von UHFB wurden bislang nur in [6.56] sowie in [6.4, 6.57] veröffentlicht. Bei den Untersuchungen in [6.57] ergab sich beim CIF-Test nach 28 Frost-Tau-Zyklen eine Abwitterungsmenge von unter 30 g/m^2 . Der mit Ultraschall gemessene relative E-Modul der beanspruchten Proben war praktisch unverändert, d. h., das innere Gefüge des UHFB war ungestört.

6.11.4.2 Frost-Taumittel-Widerstand

Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes mit dem CDF-Test nach [6.58] zeigte UHFB ohne zusätzliche Mikroluftporen einen sehr hohen Frost-Tausalz-Widerstand. In [6.5] lag die Abwitterungsmenge bei dem Beton M1Q nach Tabelle 3.5 mit nur noch 200 g/m^2 nach 28 und lediglich 290 g/m^2 nach 56 Frost-Tau-Zyklen noch immer signifikant unter derjenigen von Normalbeton und von hochfestem Beton mit Luftporen und weit unter dem für dieses Verfahren angegebenen Richtwert von 1500 g/m^2 , s. Bild 6.36.

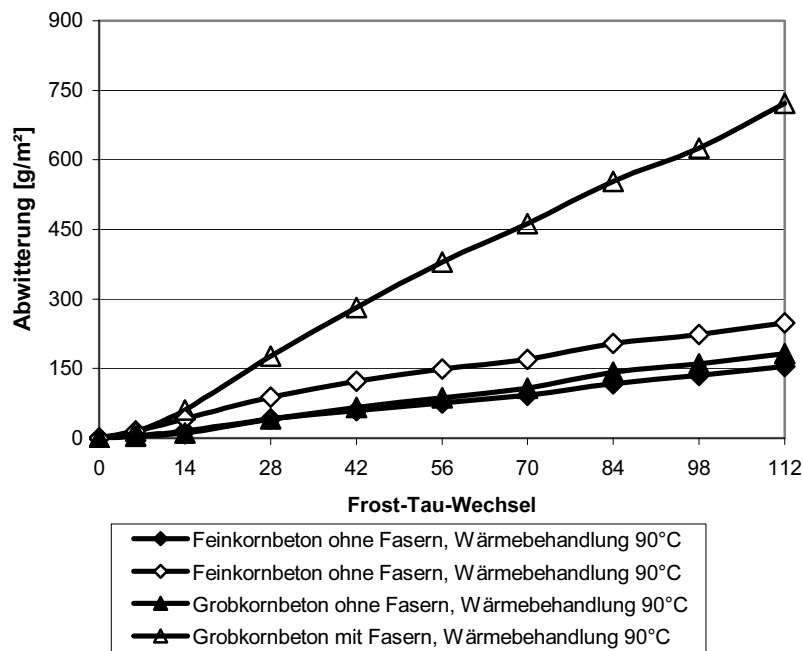


Bild 6.36: Abwitterungsmenge von wärmebehandelten, grob- und feinkörnigen UHFB nach 112 Frost-Tau-Wechseln im CIF-Test [6.5]

Auch nach 112 Wechseln lagen die Abwitterungen des ungünstigsten grobkörnigen UHFB B3Q nach Tabelle 3.5 mit 750 g/m^2 weit unter dem Richtwert. Der Unterschied zwischen wärmebehandelten und wassergelagerten Proben war dabei insgesamt gering.

6.11.5 Korrosionsschutz

6.11.5.1 Carbonatisierung

Unterschreitet der pH-Wert des Betons der Randzone eines Betonbauteils einen Wert von etwa 9, so kann der Betonstahl korrodieren, wenn ausreichend Feuchtigkeit zur Verfügung steht. Wegen des vergleichsweise geringen Ca(OH)_2 durch die Reaktion mit Silikastaub ist zunächst einmal theoretisch ein erhöhtes Korrosionsrisiko nicht auszuschließen.

Dem steht wiederum die sehr hohe Dichtigkeit des UHFB-Gefüges entgegen. Kohlendioxid und Wasser können nur in sehr geringen Mengen eindringen [6.4, 6.49].

Der Carbonatisierungsfortschritt von zwei UHFB-Betonen M1Q (s. Tabelle 3.5) und B3Q nach [6.4, 6.5] wurde an Prüfkörpern untersucht, die nach einem Tag ausgeschalt, bei 90°C wärmebehandelt und anschließend bei 20°C und bei 65 % r. F. gelagert wurden. Im Alter von 90 Tagen war die Randzone noch nicht carbonatisiert. Auch nach 180 Tagen war die Carbonatisierungstiefe mit 0,3 bis 0,4 mm sehr klein. Nach 3 Jahren erreichte sie höchstens 1,7 mm. Die Messwerte stimmen größenordnungsmäßig mit der Carbonatisierungstiefe der im Außenbereich ungeschützt der Witterung ausgesetzten gleichartigen Betonprüfkörpern überein. Sie lag dort nach 3 Jahren zwischen 1,5 und 2,5 mm.

6.11.5.2 Chloridinduzierte Korrosion

Der Widerstand von ultrahochfesten Betonen gegenüber dem Eindringen von Chloridionen durch Diffusionsvorgänge wird in Abschnitt 6.10.2 behandelt. Durch den vollständigen Verbrauch von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und das Einbinden von Alkalien in CSH-Phasen sinkt der pH-Wert in der Porenlösung deutlich ab (s. Abschnitt 6.11.1). Durch diesen Effekt wird der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt in der Porenlösung stark reduziert. Untersuchungen in [6.65, 6.66] zum Korrosionsverhalten von Betonstählen in hochfesten Betonen, denen bei der Herstellung abgestuft unterschiedliche Chloridmengen zugegeben wurden, zeigten, dass die Korrosionsgeschwindigkeiten des Stahles dennoch schnell auf vernachlässigbar kleine Werte absanken, obwohl in den Mischungen keine Alkalitätsreserve mehr enthalten war. Der Grund für dieses Verhalten liegt in der deutlichen Verdichtung des Porengefüges.

6.11.6 Verschleißwiderstand

Hochleistungsbeton wird häufig und mit Erfolg bei Bauwerken verwendet, die einen hohen Widerstand gegen Abrasion und Erosion haben müssen. Dieser hohe Widerstand kommt durch die Dichtigkeit und Festigkeit des Zementsteins zustande. So wird dieser Baustoff z. B. erfolgreich beim Bau von Tosbecken für große Wasserstauwerke verwendet und weist dort gegenüber Normalbeton einen nur verschwindend geringen Verschleiß auf [6.59]. In den Niederlanden gibt es Überlegungen, die Stahltores des Oosterschelde-Sperrwerkes durch solche aus UHFB zu ersetzen [6.60]. Der Verschleißwiderstand dürfte noch weitaus höher liegen als bei Hochleistungsbeton. Als Maß hierfür können orientierende Versuche zur Oberflächen-Zugfestigkeit dienen, bei denen mit 6 bis 8 N/mm² auch im Vergleich zu hochfestem Beton sehr hohe Werte gemessen wurden [6.22, 6.63].

6.12 Literatur zum Abschnitt 6

- [6.1] Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig, June 2002.
- [6.2] Richard, P.; Cheyrezy, M.: Composition of Reactive Powder Concretes. In: Cement and Concrete Research 25 (1995), Nr. 7, S. 1501-1511.
- [6.3] Cheyrezy, M.; Maret, V.; Frouin, L.: Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). In: Cement and Concrete Research 25 (1995), Nr. 7, S. 1491-1500.
- [6.4] Schmidt, M.; E. Fehling; T. Teichmann; K. Bunje, R. Bornemann: Ultra-Hochfester Beton: Perspektive für die Betonfertigteileindustrie. Betonwerk u. Fertigteil-Technik (BFT) (2003) H. 3, S. 16-29. Ebenso: Beton-Fertigteil-Jahrbuch 2003.
- [6.4a] Schmidt, M.; Geisenhanslüke, C.: Optimierung der Zusammensetzung des Feinstkorns von Ultra-Hochleistungs- und von Selbstverdichtendem Beton. In: beton, Nr. 5, 2005.
- [6.5] Fehling, E.; Schmidt, M.; Teichmann, T.; Bunje, K.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Beton (UHPC), Forschungsbericht an die DFG, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universität Kassel, Heft 1 (2004), Hrg. Schmidt, M. u. Fehling, E.
- [6.5a] Bunje, K.; Fehling, E.: About the fatigue limit (mechanical durability) of Ultra High Performance Concrete; 4th International Ph. D. Symposium in Civil Engineering, Munich, September 2002.
- [6.6] Gatty, L. u. a., 1998: Gatty, L.; Bonnamy, S.; Feylessuofi, A.; Damme van, H.; Richard, P.: Silica Fume Distribution and Reactivity in Reactive Powder Concretes. Detroit: American Concrete Institute, ACI SP-178, 1998. – In: Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, (Malhotra, V.M. (Ed.)), Vol. 2, S. 931-953.
- [6.6a] Zanni, H. u. a., 1996: Zanni, H.; Cheyrezy, M.; Maret, V.; Phillipot, S.; Nieto, P.: Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) Using ²⁹Si NMR. In: Cement and Concrete Research 26 (1996), Nr. 1, S. 93-100.
- [6.7] Hilbig, H.: Verfolgung der Zementhydratation mit Festkörper-NMR-Spektroskopie. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2000. – In: Beiträge zum 38. Forschungskolloquium am 2. und 3. März 2000 an der Technischen Universität München, S. 87-95.
- [6.8] Zanni, H.; Cheyrezy, M.; Maret, V.; Phillipot, S.; Nieto, P.: Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) Using ²⁹Si NMR. In: Cement and Concrete Research 26 (1996), Nr. 1, S. 93-100.
- [6.9] Philipp, U.; Dehn, F.; Schreiter, P.: Temperatureinfluss auf die Phasen- und Gefügebildung in UHFB, In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.: Ultrahochfester Beton – Innovationen im Bauwesen, Bauwerk-Verlag, Berlin 2003.
- [6.10] Teichmann, Th.; Bunje, K.; Schmidt, M.; Fehling, E.: Durability of Ultra High Performance Concrete (UHPC); In König, G.; Dehn, F.; Faust, T.: Proceedings of the 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig, June 2002.

- [6.11] Teichmann, Th.; Schmidt, M.: Mix Design and Durability of Ultra High Performance Concrete (UHPC); 4th International Ph.D.Symposium in civil Engineering, Munich, 2001.
- [6.12] Orgass, M.; Klug, Y. (2004): Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes. In: Ultra High Performance Concrete (UHPC). Proceedings International Symposium on Ultra-High Performance Concrete 2004. Kassel, 13.-15. Sept. 2004. Vol. 3 Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universität Kassel: (eds.: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C.), Vol. 3, pp. 637-647.
- [6.13] Wiens, U.; Schröder, P.; Meng, B.; Schießl, P.: Mikrorissbildung in Hochleistungsbeton – Vom Modell zu den Auswirkungen auf Betoneigenschaften. In: DAfStB-Forschungskolloquium 36/DAfStB. Aachen: RWTH, 1998, S. 234-247.
- [6.14] Ma, J.; Orgass, M.; Dehn, F.; Schmidt, D.; Tue, N. V.: Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates. In: Ultra High Performance Concrete (UHPC). Proceedings International Symposium on Ultra-High Performance Concrete 2004. Kassel, 13.-15. Sept. 2004. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universität Kassel, Vol. 3, pp. 205-212.
- [6.15] Tue, u. a., 2004: Tue, Nguyen Viet; Dehn, Frank u. a.: Das Verbundrohr als Innovationsmotor für hybrides Bauen, Schlussbericht an Bilfinger Berger AG (nicht veröffentlicht), Universität Leipzig 2004.
- [6.16] Bornemann, R.; Faber, S.; Schmidt, M.: UHPC mit Stahl- und hochfesten Kunststofffasern. Versuchsbericht FG Werkstoffe des Bauwesens, Universität Kassel 2004 (unveröffentlicht).
- [6.17] Association Française de Génie Civil (AFGC): Documents scientifiques et techniques: Bétons fibrés à ultra-hautes performances (Recommandations provisoires), Janvier 2002.
- [6.18] Reineck, K.-H.; Greiner, S.; Lichtenfels, A. (2003): Wasserspeicher aus UHFB – Bemessung. in: Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Bauwerk Verlag GmbH. Berlin 2003, S. 257-268 (Herausgeber: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.).
- [6.18a] Reinhardt, H.-W.; Jooß, M. (2003): Wasserspeicher aus UHFB-Technologie. in: Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Bauwerk Verlag GmbH. Berlin 2003, S. 239-255 (Herausgeber: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.).
- [6.18b] Institut für Bauforschung (ibac): Tastversuche zur Permeabilitätsmessung von Ultrahochfesten Betonen. RWTH Aachen (2002) unveröffentlicht.
- [6.19] Reineck, K.-H.; Greiner, S. (2004): Tests on ultra-high performance fibre reinforced concrete for designing hot-water tanks and UHPFRC-shells. In: Ultra High Performance Concrete (UHPC). Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete 2004. Kassel, 13.-15. Sept. 2004. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universität Kassel: (eds.: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C.), Vol. 3, pp. 361-374.
- [6.20] Deutscher Beton-Verein e.V.: DBV Merkblatt „Stahlfaserbeton“, Oktober 2001.
- [6.21] DAfStB-Richtlinie Stahlfaserbeton (Entwurf 2005).
- [6.22] Schmidt, M.; Teichmann, T.: New Developments in Ultra-High-Performance Concrete – Non corrosive PVA-fibres and glueing of structural elements. FIB-Congress Naples 2006.
- [6.23] fib Bulletin 12 (2001): Punching of structural concrete slabs – technical report by the CEB/fib Task Group „Utilisation of concrete tension in design“. fib, Lausanne, April 2001.
- [6.24] CEB-FIP MC 90: Design of concrete structures. CEB-FIP-Model-Code 1990. Thomas Telford, 1993
- [6.25] Bornemann, R.; Faber, S.: UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading. In: Ultra High Performance Concrete (UHPC). Proceedings International Symposium on Ultra-High Performance Concrete 2004. Kassel, 13.-15. Sept. 2004. Vol. 3 Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universität Kassel: (eds.: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C.), Vol. 3, pp. 673-681.
- [6.26] Markovic, I.: High-Performance Hybrid-Fibre Concrete – Development and Utilisation –. Diss. TU Delft, 16-1-2006. DPU Science, Delft University Press, 2006.
- [6.27] Teutsch, M.; Grunert, J.P.: Biegebemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton. Beton- u. Stahlbetonbau 99 (2004), H. 8, S. 1-5.
- [6.28] Bernier, G.; Behloul, M. (1996): Effet de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique des BPR. pp. 233-240. 2^e colloque international francophone sur les bétons renforcés de fibres métalliques. Toulouse. 4 et 5 juillet 1996.
- [6.29] Grünewald, S.: Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. Delft University Press, Diss., 2004.
- [6.30] Schmidt, M.: Ultra-High-Performance Concrete: Progress in Materials, Design and Application. Proceedings Conmat05, Vancouver Canada Aug. 2005.

- [6.31] Ma, J.; Schneider, H.; Wu, Z.: Bruchmechanische Kenngrößen von UHFB; Ultrahochfester Beton. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.: Ultrahochfester Beton – Innovationen im Bauwesen, Bauwerk-Verlag, Berlin 2003.
- [6.32] Hillerborg, A.; Modéer, M.; Petersson, P.E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. In Cement and Concrete Research, Vol. 6, No. 6, 1976, pp. 773-782.
- [6.33] Ma, J.; Dehn, F.; König G.: Autogenous shrinkage of self-compacting ultra-high performance concrete, in Proceeding „International Conference on Advances in Concrete and Structures“, Mai, 2004, Xuzhou, P.R. China.
- [6.34] Schneider, U.; Horvath, J.: Herstellung und Eigenschaften von Ultra Hochleistungsbetonen. Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz d. TU Wien, H. 8, Wien 2003.
- [6.35] Klotz, S.; Holschemacher, K.: Teilflächenpressung bei UHFB, in: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.: Ultrahochfester Beton – Innovationen im Bauwesen, Bauwerk-Verlag, Berlin 2003
- [6.35a] Ma, J.; Schneider, H.: Creep of ultra-high performance concrete under compressive stresses, Leipzig Annual Civil Engineering Report, No. 8, 2003.
- [6.36] Cheyrezy, M.; Roux, N.; Behloul, M.; Ressicaud, A.; Demonté, A. (1998): Bond strength of reactive powder concrete. pp. 65-68 in: Proceedings of the 13th FIP Congress. FIP Challenges for Concrete in the Next Millenium, Volume 1, Amsterdam, 23-29 May 1998.
- [6.37] Weiße, D.: Verbundverhalten der Bewehrung in UHFB. In: Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen. Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Herausgeber: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F., Bauwerk Verlag GmbH. Berlin, November 2003, S. 199-214.
- [6.38] Hertel, C.; Orgass, M.; Dehn, F.: Brandschutztechnische Aspekte bei Faserbetonen, In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hrsg.): Faserbeton – Innovationen im Bauwesen, Bauwerk-Verlag, Berlin 2002.
- [6.39] Schneider, U.; Horvath, J.: Abplatzverhalten an Tunnelinnenschalenbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau 97, H. 4, S. 185-190, 2002.
- [6.40] Meyer, A.; Resch, H.: Materialtechnische Grundlagen zur Optimierung von Ziegelrohstoffen. In: Ziegelindustrie International, Nr. 10, S. 656-663, 1998.
- [6.41] Hewlett, P. C.: Lea's chemistry of cement and concrete.
- [6.42] Bornemann, R.; Schmidt, M.; Vellmer, C.: Brandverhalten ultra-hochfester Betone, In: beton 9/2002, S. 418-422.
- [6.43] Diederichs, U.: Hochtemperatur- und Brandverhalten von hochfestem Stahlfaserbeton. In: Betonbau Forschung, Entwicklung und Anwendung, Heft 142, S. 67-76, TU Braunschweig 1999.
- [6.44] Schneider, U.; Horvath, J.; Dehn, F.: Abplatzverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) unter Brandbeanspruchung, Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER), No. 6, Universität Leipzig 2001.
- [6.45] Schneider, U.; Horvath, J.; Dehn, F.: Faserbewehrte ultrahochfeste Betone, In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hrsg.): Faserbeton – Innovationen im Bauwesen, Bauwerk-Verlag, Berlin 2002.
- [6.46] Dehn, F.; König, G.: Fire Resistance of different Fibre Reinforced High-Performance Concretes, In: Naaman, A; Reinhardt, H.-W.: Workshop HPFRCC 4, Ann Arbor (USA), Juni 2003.
- [6.46] Schneider, U.; Horvath, J.: Abplatzverhalten von Tunnelinnenschalenbeton unter hohen Temperaturen, Zement+Beton, Heft 1/02, S. 10-14, Wien, 2002.
- [6.46a] Schneider, U.; Horvath, J.; Diederichs, U.: Verhalten von Ultrahochfesten Betonen (UHPC) unter Brandbeanspruchung. In: Beton- und Stahlbetonbau 97, H.7, 2003.
- [6.47] Richard, P.; Cheyrezy, M.: Composition of Reactive Powder Concretes. In: Cement and Concrete Research 25 (1995), Nr. 7, S. 1501-1511.
- [6.48] O' Neil, E.F.; Dauriac, C.E.; Gilliland, S.K.: Development of Reactive Powder Concrete (RPC) Products in the United States Construction Market. Detroit: American Concrete Institute, ACI SP 167, 1996. – In: High Strength Concrete: An International Perspective, S. 249-261.
- [6.49] Meng, B.; Wiens, U.: Wirkung von Puzzolanen bei extrem hoher Dosierung – Grenzen der Anwendbarkeit –. Weimar : Bauhaus-Universität, 1997. – In: 13. Internationale Baustofftagung, – ibausil – 24.-26. September 1997 in Weimar, S. 1.0175-1.0186.
- [6.50] Feylessoufi, A.; Villieras, F.; Michot, L.J.; Donato de, P.; et al.: Water Environment and Nanostructural Network in a Reactive Powder Concrete. In: Cement and Concrete Composites 18 (1996), S. 23-29.

- [6.51] Andrade, C.; Sanjuan, M.A.; Roux, N.: Durability and Life-Expectancy of Ultra-High Strength Concrete. Montreal: CANMET/ACI, 1997. – In: Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Sydney, August 1997, (Malhotra, V.M. (Ed.)), Supplementary Papers, S. 695-708.
- [6.52] Teichmann, T.; Schmidt, M.: Influence of the packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC; In: Proceedings Int. Symposium on ultra-high performance concrete, Kassel, 13.-15. September 2004.
- [6.53] Tang, L.; Nilsson, L. O.: Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. ACI Materials Journal 89; S. 49-53; 1992.
- [6.54] Acker, P.: Ultra High-Performance Concretes – Properties and Applications. Vortrag beim „Aachener Baustofftag 1998“, Institut für Bauforschung, RWTH Aachen.
- [6.55] Bollmann, K.: Ettringitbildung in nicht wärmebehandelten Betonen.; Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2000.
- [6.56] Ludwig, H.-M.; Thiel, R.: Dauerhaftigkeit von UHFB, In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.: Ultrahochfester Beton – Innovationen im Bauwesen, Bauwerk-Verlag, Berlin 2003.
- [6.56] Teichmann, Th., Universität Kassel, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens: Untersuchungen zur Sekundärettringitbildung in Ultra-Hochfesten Betonen; unveröffentlicht, Kassel, 2002.
- [6.57] Teichmann, T.: Tastversuche zum Frost-Tau-Widerstand von Ultra-Hochfesten Betonen. Versuchsbericht Kassel, 2003 (unveröffentlicht).
- [6.58] RILEM „Recommendation for test method for the freeze-thaw resistance of concrete. Test with sodium chloride solution (CDF)“; Materials and Structure, 1996, 29, pp. 523-528.
- [6.59] Hewlett, P.C.: Chemistry of Cement and Concrete; LEA'S, Fourth Edition, London, 1998.
- [6.60] Walraven, J.C.: Designing with ultra high strength concrete: Basics, potentials and perspectives. In: Proceedings Int. Symposium on ultra-high performance concrete, Kassel, 13.-15. September 2004, pp. 853-864.
- [6.61] Gaede, K.: Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck-Schwellbeanspruchung; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 144.
- [6.62] Klausen, D.; Weigler, H.: Betonfestigkeit bei konstanter und veränderlicher Dauerschwellbeanspruchung; Betonwerk + Fertigteiltechnik 45 (1979) H. 3, S. 158/163.
- [6.63] Schmidt, M.; Teichmann, T.: Untersuchungen an geklebten UHPC-Verbindungen für die Zustimmung im Einzelfall für die Gärtnerplatzbrücke in Kassel. Untersuchungsbericht, Universität Kassel, 2005.
- [6.64] Tuchlinski, D.; Hegger, J.; Kommer, B.: Untersuchungen an Spannbetonträgern aus UHPC. In: Beton- und Fertigteiltechnik (BFT) (2006), H. 1, S. 14-20.
- [6.65] Wiens, U.; Breit, W.; Schießl, P.: Influence of High Silica Fume and High Fly Ash Contents on Alkalinity of Pore Solution and Protection of Steel against Corrosion. Detroit: American Concrete Institute, ACI SP-153, 1995. – In: Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete (Malhotra, V.M. (Ed.)), Vol. 2, S. 741-761.
- [6.66] Wiens, U.: Erweiterte Untersuchungen zur Alkalität von Betonen mit hohen Puzzolangehalten. Aachen: Institut für Bauforschung, 1998. – Forschungsbericht Nr. F 505
- [6.67] Tue, N. V.; Ma, J.; Orgass, M.: Kriechen von Ultrahochfestem Beton (UHFB), Bautechnik 83 (2006), Heft 2, S. 119-124

7 Bemessung und Konstruktion

7.1 Einführung und Vorbemerkungen

Die Regeln zur Bemessung und Konstruktion von ultrahochfesten Betonen (UHFB) sollen in erster Linie auf DIN 1045-1 [7.1] basieren, in der das Bemessungskonzept und die Nachweisverfahren für normal- und hochfeste Betone festgelegt sind. Dementsprechend folgt die Gliederung dieses Kapitels im Wesentlichen den Abschnitten 9 bis 11 der DIN 1045-1. Weiterhin werden die Regelungen des DBV-Merkblattes [7.2] für Stahlfaserbeton bzw. die darauf aufbauende DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [7.3] herangezogen. Eine weitere wichtige Quelle ist die französische Richtlinie der AFGC/SETRA [7.4], die erstmals umfassend die Bemessung von Bauteilen aus UHFB behandelte. Auch wird Bezug genommen auf die japanische Richtlinie für „Ultra-High Strength Fiber-Reinforced Concrete Structures“ (USC) der JSCE [7.5].

Nachfolgend wird in der Gliederung keine Trennung von ultrahochfesten Faserfeinkornbetonen (Größtkorn ≤ 1 mm) und ultrahochfesten Betonen mit groben Zuschlägen (> 1 mm bis etwa 8 mm) vorgenommen, sondern es werden die Unterschiede ggf. in den jeweiligen Abschnitten behandelt. Weiterhin wird in der Gliederung auch keine Trennung in UHFB mit Fasern und UHFB ohne Fasern vorgenommen, auch wenn UHFB aus heutiger Sicht vorzugsweise als faserbewehrter Werkstoff (UHFFB) eingesetzt wird, weil er abhängig von Fasergehalt und Faserart duktileres Verhalten aufweist. Bei UHFB ohne Fasern kann duktileres Verhalten nur durch eine Umschnürung erreicht werden, wie beispielsweise bei mit UHFB gefüllten Stahlrohren.

Ein besonders wichtiger Aspekt ist der Betoniereinfluss, und zweifelsohne muss der Einfluss der Faserorientierung und die Möglichkeit von Schwachstellen im Bemessungskonzept von faserbewehrtem UHFB berücksichtigt werden. Beispielsweise kann dies durch die Annahme höherer Streubreiten bei der Festlegung der Bemessungswerte, durch einen höheren Sicherheitsbeiwert generell oder durch einen Beiwert für die Faserorientierung erfolgen. Nachfolgend wird daher der Einfluss der Faserorientierung bei den einzelnen Bemessungswerten berücksichtigt. Allerdings kann der Betoniereinfluss nicht völlig durch derartige Abminderungen abgedeckt werden, wie z. B. das gehäufte Auftreten örtlicher Fehlstellen. Diesen Effekten kann nur durch eine sorgfältige Qualitätssicherung begegnet werden (vgl. Abschnitt 4.5).

An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass bisher nur wenige Erfahrungen mit Bauteilen aus UHFB vorliegen. Darüber hinaus sind verschiedene Aspekte dieses modernen Werkstoffs noch nicht ausreichend untersucht worden, so dass bei jedem Pilotprojekt wissenschaftliche Begleitung und maßstabsgetreue Bauteilversuche zu empfehlen sind.

7.2 Bemessungsgrundlagen für ultrahochfeste Betone

7.2.1 Bemessungswert der Druckfestigkeit

7.2.1.1 Richtlinie AFGC/SETRA [7.4]

Die Druckfestigkeit wird an Zylindern $\varnothing 70$ mm, $h = 140$ mm bzw. $\varnothing 110$ mm, $h = 220$ mm bestimmt.

Der Bemessungswert ergibt sich nach [7.6] zu:

$$\sigma_{bc} = \frac{0,85}{\theta \gamma_b} f_{cj} \quad (7-1)$$

mit: $\theta =$ Beiwert zur Dauer der Lasteinwirkung
 $\theta = 1,0$ für Lasteinwirkung länger als 24 h
 $\theta = 0,9$ für Lasteinwirkung zwischen 1 h und 24 h
 $\theta = 0,85$ für Lasteinwirkung kürzer als 1 h
 $f_{cj} =$ (charakteristische) Druckfestigkeit im Alter j

Der Sicherheitsbeiwert γ_b beträgt nach [7.6], Abs. 4.3, im Normalfall bei Betonkonstruktionen $\gamma_b = 1,5$. In Sonderfällen, z. B. wenn eine besondere Überwachung erfolgt, darf der Wert $\gamma_b = 1,3$ angesetzt werden. Dies ist vergleichbar mit der Regelung in DIN 1045-1 [7.1] mit $\gamma_c = 1,35$ für Fertigteile.

7.2.1.2 JSCE-Richtlinie für USC [7.5]

Gemäß der japanischen Richtlinie für USC (ultra high-strength fiber-reinforced concrete) [7.5] wird die Druckfestigkeit an Zylindern mit $\varnothing 100$ mm bestimmt. Der Bemessungswert ist wie folgt definiert:

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (7-2)$$

mit: $\gamma_c = 1,3$

7.2.1.3 Bemessungswert auf Grundlage der DIN 1045-1 [7.1]

Mit den im Abschnitt 6.3.1 angegebenen Probekörpern, also Zylindern mit $h / \varnothing \approx 2$ bis 3 und $\varnothing \geq 100$ mm, kann die charakteristische Druckfestigkeit f_{ck} ermittelt werden. Sie ist der kleinste Wert einer Versuchsserie mit in der Regel 5 Proben. Bei ausreichender Anzahl von Messergebnissen (> 15) kann die charakteristische Druckfestigkeit über die statistische Auswertung ermittelt werden; sie entspricht dem 5%-Fraktilwert der Messreihe. Abweichend zu den Betonen gemäß DIN 1045-2 [7.7] werden nach derzeitigem Kenntnisstand bei UHFB keine Umrechnungsbeiwerte wegen unterschiedlicher Prüfkörperabmessungen benötigt.

Für normalfesten Beton wird in DIN 1045-1 [7.1] bei der Festlegung des Bemessungswertes $f_{cd} = 0,85 f_{ck} / \gamma_c$ der Dauerstandeinfluss in dem Faktor 0,85 mit ca. 0,90 berücksichtigt. Für UHFB liegen derzeit keine Untersuchungen zum Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit bis hin zur Dauerstandsbelastung auf das Trag- und Verformungsverhalten vor. Wegen der geringeren Kriechmaße ist ein geringerer Dauerstandseinfluss zu erwarten, so dass der o. a. für Normalbeton gültige Faktor 0,90 vermutlich auf der sicheren Seite liegt.

Für den Einfluss der Prüfkörpergeometrie auf die Druckfestigkeit von UHFB liegen bisher keine abschließenden Ergebnisse vor. Insgesamt kann auf der sicheren Seite liegend der Faktor 0,85 bei der Ermittlung des Bemessungswerts der Betondruckfestigkeit beibehalten werden.

Der Bemessungswert für hochfesten Beton in DIN 1045-1 [7.1] ist wie folgt definiert:

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c \cdot \gamma_c}, \quad (7-3)$$

Dabei wird der Sicherheitsbeiwert γ_c von 1,50, bzw. ggf. 1,35 für Fertigteile nach DIN 1045-1, 5.3.3 (7), ab der Festigkeitsklasse C55/67 mit folgendem Beiwert vergrößert:

$$\gamma_c' = \frac{1}{(1,1 - f_{ck} / 500)} \geq 1,00 \quad (7-4)$$

Dies bedeutet für die höchste Betonfestigkeitsklasse C100/115 gegenüber dem Normalbeton eine Abminderung des Bemessungswertes um rd. 10 %. Diese Abminderung wird in DIN 1045-1 [7.1] mit der höheren Streuung der Materialeigenschaften begründet. Im DAfStb-Heft 525 [7.8] wird bei der Begründung für diesen zusätzlichen Sicherheitsbeiwert weiterhin noch auf die Empfindlichkeit gegenüber Abweichungen bei der Herstellung des Betons sowie auf das sprödere Versagen hochfester Betone hingewiesen.

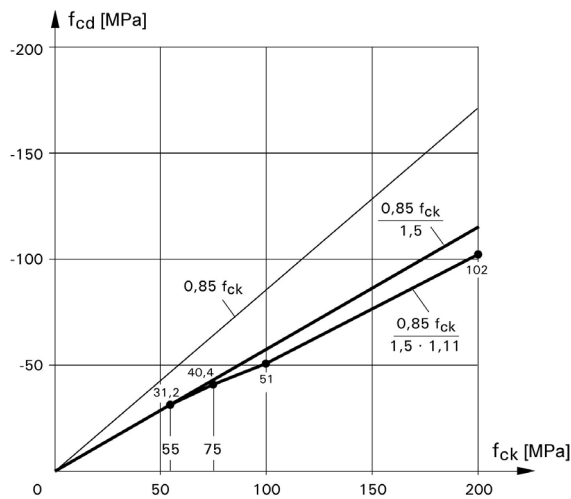
Würde man diesen Sicherheitsbeiwert über den ursprünglich definierten Anwendungsbereich hinaus unverändert für UHFB übernehmen, dann würde sich ein Abminderungsbeiwert von $\gamma_c' = 1,429$ für einen Beton der Druckfestigkeitsklasse C200 ergeben. Dies erscheint jedoch unbegründet angesichts der umfangreichen Qualitätssicherung bei UHFB. Andererseits treffen die im DAfStb Heft 525 [7.8] genannten Begründungen auch auf UHFB ohne Fasern zu, so dass dafür ein völliger Verzicht auf γ_c' nicht gerechtfertigt erscheint. Es wird deshalb vorsichtshalber vorgeschlagen, die o. a. Gl. (7-4) für UHFB ohne Fasern weiterhin zu verwenden, aber bei $\gamma_c' = 1,25$ (bei C150) zu begrenzen:

$$\gamma_c' = \frac{1}{(1,1 - f_{ck} / 500)} \quad (7-5)$$

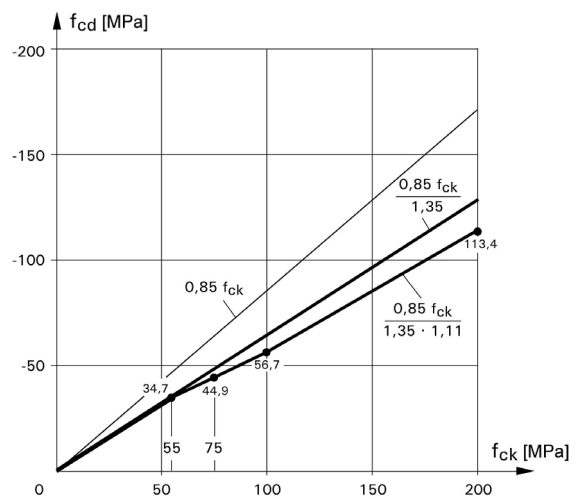
mit $1,0 \leq \gamma_c' \leq 1,25$

Der Vorschlag nach Gl. (7-5) für γ_c' ist, abgesehen von den o. a. Begründungen, auch als Vorsichtsmaßnahme wegen mangelnder Erfahrungen zu werten. Nach Vorliegen ausreichender baupraktischer Erfahrung können diese Werte überprüft und ggf. korrigiert werden.

Für faserbewehrten UHFB (UHFFB) oder ausreichend umschnürten, nicht faserbewehrten UHFB (z. B. in Rohren) treffen die o. g. Begründungen für γ_c' ebenfalls zu, aber die Sprödigkeit der Werkstoffe ist deutlich verringert, so dass ein niedrigerer Wert für γ_c' gerechtfertigt erscheint. Um konform mit DIN 1045-1 [7.1] zu bleiben, soll der Höchstwert nach DIN 1045-1 $\gamma_c' = 1,11$ angesetzt werden. Im Bild 7.1 sind für faserbewehrten UHFB die Bemessungswerte f_{cd} nach Gl.(7-3) für $\gamma_c = 1,5$ bzw. 1,35 gegen f_{ck} abgetragen, um die Auswirkungen dieses Ansatzes aufzuzeigen.



a) für Ortbeton ($\gamma_c = 1,5$)



b) für Fertigteile ($\gamma_c = 1,35$)

Bild 7.1: Bemessungswerte f_{cd} für faserbewehrten UHFB in Abhängigkeit von f_{ck} für UHFB auf Grundlage der DIN 1045-1 [7.1]

7.2.1.4 Vergleich der Vorschläge und Diskussion

Die Vorschläge in den Abschnitten 7.2.1.1 bis 7.2.1.3 sind grundsätzlich ähnlich. Sieht man von dem in der Richtlinie AFGC/SETRA [7.4] angegebenen Beiwert θ für sehr kurzzeitige Belastungen ab, ist ausgehend von dem charakteristischen Wert f_{ck} (5%-Fraktilwert) der Bemessungswert für UHFB für alle drei betrachteten Richtlinien wie folgt definiert:

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{c,UHFB}} \quad (7-6)$$

Der Unterschied liegt somit im zugrunde gelegten Sicherheitsniveau. Die Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Sicherheitsbeiwerte $\gamma_{c,UHFB}$. Es zeigt sich, dass der im Abschn. 7.2.1.3 vorgeschlagene Sicherheitsbeiwert auf Grundlage der DIN 1045-1 [7.1] deutlich über den Werten der französischen und der japanischen Richtlinie liegt. Dies liegt an dem zusätzlichen Sicherheitsbeiwert γ_c' nach DIN 1045-1, 5.3.3 (7).

Tabelle 7.1: Sicherheitsbeiwert $\gamma_{c,UHFB}$ für verschiedene Richtlinien

Norm/Richtlinie	$\gamma_{c,UHFB}$	
AFGC / SETRA [7.4] bzw. [7.6]	Normalfall: 1,5	Spezialfälle: 1,3
JSCE – USC [7.5]	1,3	
Vorschlag auf Grundlage DIN 1045-1 [7.1]	ohne Fasern	für $f_{ck} \geq 150$ MPa: Ort beton: $1,5 \cdot 1,25 = 1,885$ Fertigteile: $1,35 \cdot 1,25 = 1,688$
	mit Fasern	für $f_{ck} \geq 150$ MPa: Ort beton: $1,5 \cdot 1,11 = 1,665$ Fertigteile: $1,35 \cdot 1,11 = 1,499$

Das erforderliche Sicherheitsniveau für hochfesten Beton wurde [7.9] überprüft. Sie führten eine statistische Auswertungen der im Rahmen der Qualitätskontrolle ermittelten Druckfestigkeitswerte von 153 Prüfstellen bzw. Bauwerken, davon 56 mit hochfesten Beton, durch. Danach nimmt der Variationskoeffizient der Druckfestigkeit mit zunehmender Druckfestigkeit ab. Die Autoren schlagen deshalb vor, auf den Ansatz des zusätzlichen Sicherheitsbeiwerts γ_c' zu verzichten.

Darüber hinaus wird in [7.9] vorgeschlagen, den Teilsicherheitsbeiwert γ_c neu festzulegen. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_c setzt sich dabei wie folgt zusammen:

$$\gamma_c = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} \cdot \gamma_{conv} \quad (7-7)$$

mit:

- γ_{m1} = Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Materialstreuungen
- γ_{m2} = 1,05 = Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der geometrischen Parameter und Modellunsicherheiten
- γ_{conv} = 1,15 = Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen Bauwerks- und Laborfestigkeit

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{m1} nimmt dabei mit zunehmender Betonklasse von 1,25 bei C20/25 bis auf 1,07 bei C100/115 ab. Somit fällt der gesamte Teilsicherheitsbeiwert γ_c von 1,51 bei C20/25 auf 1,29 bei C100/115 ab.

Bei UHFB findet eine noch strengere Qualitätssicherung sowie Auswahl der Ausgangsstoffe statt, so dass diese Ergebnisse auch auf UHFB übertragbar sein sollten. Demnach könnten folgende Sicherheitsbeiwerte angesetzt werden:

- $\gamma_c = 1,35$ für Fertigteile aus faserbewehrtem UHFB;
- $\gamma_c = 1,5$ für Ortbeton – Bauteile aus faserbewehrtem UHFB;
- nur für nicht faserbewehrten UHFB sollte, wie zuvor erläutert, sicherheitshalber zusätzlich noch $\gamma_c' = 1,25$ angesetzt werden. Weiterhin sollte zur Sicherstellung duktilen Versagens die bezogene Druckzonenhöhe von biegebeanspruchten Bauteilen, ähnlich wie bei hochfestem Beton, auf $x/d \leq 0,35$ begrenzt werden.

Endgültige Festlegungen sind erst dann möglich, wenn entsprechende Untersuchungen und die entsprechenden Auswertungen für UHFB ohne und mit Fasern vorliegen.

7.2.2 Bemessungswert der Zugfestigkeit

7.2.2.1 Definition

Der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit ergibt sich für einen faserbewehrten UHFB in Anlehnung an die fib-Recommendations [7.10] und AFGC/SETRA [7.4] zu:

$$f_{ctd} = \frac{0,85 f_{ctk}}{\gamma_{ct} \cdot \gamma_f} \quad (7-8)$$

mit

- f_{ctk} = 5 %-Fraktilwert der Betonzugfestigkeit (Höchstwert der σ - ε -Linie)
- γ_{ct} = Sicherheitsbeiwert für die Zugfestigkeit von Faserbeton
 - = 1,3 für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit
 - = 1,0 für Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
- γ_f = Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung möglicher Unregelmäßigkeiten in der Faserorientierung:
 - = 1,25 allgemein, außer lokalen Effekten
 - = 1,75 zur Erfassung lokaler Effekte (Fehlstellen)

Der Beiwert 0,85 soll die Abminderung infolge Dauerstandsbelastung berücksichtigen und wird zunächst von hochfestem Beton übernommen (s. Untersuchungen in [7.11]).

Der charakteristische Wert der Zugfestigkeit f_{ctk} sollte durch Versuche an herausgeschnittenen Probekörpern aus einem Bauteil mit annähernd wahren Abmessungen sowie unter Beachtung der Betonier-, Belastungs- und Verdichtungsrichtung (insbesondere am Rütteltisch) ermittelt werden. Hierzu sind zentrische Zugversuche oder Biegeversuche, wie sie in den Abschnitten 6.4.2 und 7.2.2.4 vorgestellt werden, geeignet. Für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf Basis von Vorversuchen ergibt Gl. (7-7) mit $(\gamma_{ct} \cdot \gamma_f) = (1,30 \cdot 1,25) = 1,625$ einen etwas geringeren Teilsicherheitsbeiwert für den „ungerissenen Zustand“ als der Wert von $\gamma_{ct}^I = 1,80$ für Stahlfaserbeton nach dem DBV-Merkblatt [7.2] bzw. der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [7.3].

7.2.2.2 Theoretische Abschätzung der Zugfestigkeit aufgrund von Fasergehalt und -orientierung

Für den gerissenen Zustand ist die Zugfestigkeit von Fasergehalt, Faserorientierung, Faserzugfestigkeit und der Verbundfestigkeit zwischen Faser und Matrix abhängig, die alle nur begrenzt von der Beton- bzw. Matrixgüte abhängen. Unter der Annahme, dass die Faserzugfestigkeit hoch genug ist und das Versagen durch Faserauszug erfolgt, wird in [7.12] folgende Beziehung für die Zugfestigkeit f_{ct} (= maximale Zugspannung $\sigma(0)$ bei einer Rissbreite $w = 0$ mm) vorgeschlagen:

$$f_{ct} = \sigma(0) = (l_f / \varnothing_f) \alpha_x \rho_f \eta \tau_{adh} \quad (7-9)$$

- mit l_f = Faserlänge [mm]
 $\varnothing_f$ = Faserdurchmesser [mm]
 α_x = Faserorientierungsbeiwert in Zugrichtung: bei isotroper Faserverteilung gilt $\alpha_x = 0,5$; bei parallelen Fasern in Zugrichtung gilt $\alpha_x = 1$
 ρ = Volumengehalt der Fasern [–]
 η = Beiwert zur Berücksichtigung des für verschiedene Faserneigungswinkel unterschiedlich großen Auszieh Widerstands: für BPR ist $\eta \approx 1,2$ nach Behloul [7.12] sowie Bernier und Behloul [7.13]
 τ = Verbundspannung zwischen Faser und Matrix in [MPa]
 τ_{adh} = mittlere Verbundfestigkeit Faser – Matrix; für BPR ist $\tau_{adh} \approx 11,5$ MPa nach Behloul [7.12]

Die Gl. (7-9) beschreibt den Auszieh Widerstand von glatten Fasern ohne Endverankerung, die im Mittel eine Einbindelänge von $l_f/4$ aufweisen. Es wird weiterhin ein Mindestfasergehalt vorausgesetzt. Dieser Ansatz wurde für BPR bzw. Ductal® abgeleitet. Für andere Faserbetone müssen der Faserorientierungsbeiwert und die Verbundspannung ermittelt sowie der Ansatz insgesamt überprüft werden. Dies gilt insbesondere für sehr hohe Fasergehalte.

7.2.2.3 Ableitung der Zugfestigkeit aus Biegezugversuchen nach AFGC/SETRA

Das Vorgehen nach AFGC/SETRA [7.4] wird in den Abschnitten 6.4.2 und 6.4.4 erläutert.

7.2.2.4 Ableitung der Zugfestigkeit aus Biegezugversuchen in Anlehnung an die Stahlfaserbetonrichtlinien von DBV [7.2] und DAfStb [7.3]

Um die Zugfestigkeit zu bestimmen, wird im DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton [7.2] bzw. in der DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [7.3] ein Standardprüfkörper für einen Biegeversuch (vgl. Bild 6.11) angegeben. Aus den Last-Verformungs-Beziehungen dieses Versuchskörpers lassen sich die Zugfestigkeit und eine Nachrisszugfestigkeit (bei einer Rissöffnung von etwa 3,5 mm) ableiten.

Bild 6.13 zeigt beispielhaft das Ergebnis eines Vierpunkt-Biegeversuchs und die Definitionen für die maßgebenden Biegezugfestigkeiten als Ausgangsgrößen für die Festlegung einer Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung. In Anlehnung an das DBV-Merkblatt bzw. an die DAfStb-Richtlinie für Stahlfaserbeton wird die für die Bemessung erforderliche Spannungs-Dehnungs-Linie gemäß Bild 7.7 mit den wie folgt definierten Spannungswerten hergeleitet:

- $f_{ct,fl,L1}$ bei Erreichen der Biegezugfestigkeit;
- $f_{ct,fl,L2}$ bei Erreichen einer Durchbiegung von 3,5 mm.

Die Spannungen für die markanten Punkte in der Bemessungskurve werden wie folgt ermittelt:

$$f_{ctk,I} = 0,4 \cdot f_{ctk,fl,L1} \quad (7-10)$$

$$f_{ctk,II} = \beta \cdot f_{ctk,fl,L2} \quad (7-11)$$

Die Beiwerte 0,4 in der Gl. (7-10) und β in der Gl. (7-11) wurden durch Nachrechnungen der Versuche ermittelt. Analog zum Normalbeton mit Druckfestigkeiten bis C50/60 hängt der Beiwert β vom Verhältnis $f_{ctk,fl,L2}/f_{ctk,fl,L1}$ ab und kann Bild 7.2 entnommen werden.

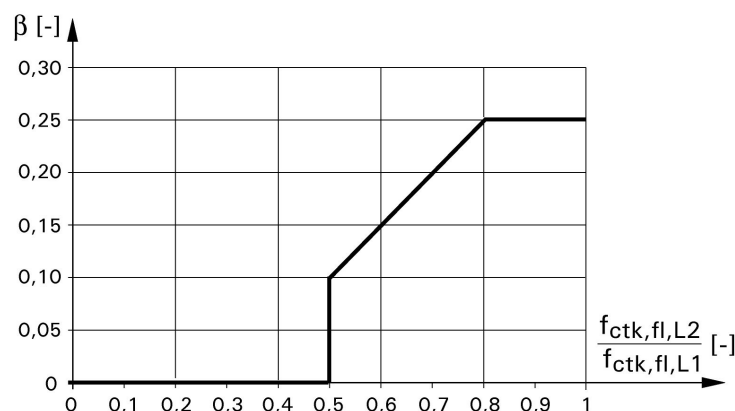


Bild 7.2: Werte für den Beiwert β in Gl. (7-11) (in Anlehnung an [7.14])

Kritisch ist bei diesem Vorgehen zu bewerten, dass ein Standardprüfkörper verwendet und somit der Maßstabeffekt nicht berücksichtigt wird, der bei faserbewehrtem UHFB vorwiegend auf die Faserorientierung zurückzuführen ist. Weiterhin gilt die DAfStb-Richtlinie nur für Betonklassen bis C50/60. Für UHFB wurde nur in [7.14] diese Regelungen überprüft (vgl. Abschn. 7.2.4.3.2).

7.2.3 Weitere Materialeigenschaften für die Bemessung

7.2.3.1 Elastizitätsmodul von UHFB

Für mögliche Werte des Elastizitätsmoduls sei auf Abschnitt 6.3.1 verwiesen. Für Vorbemessungen kann der Wert $E_c = 50 \text{ GPa}$ verwendet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der E-Modul von UHFB von verschiedenen Einflüssen abhängt, wie dies auch bei Normalbeton der Fall ist. Da Bauteile aus UHFB in der Regel dünn und somit verformungsempfindlich sind, sollte der E-Modul im Einzelfall durch Versuche bestimmt werden, wobei die Abmessungen für die Probekörper im Abschnitt 6.3.1 angegeben sind.

7.2.3.2 Querdehnzahl

Die Querdehnzahl kann zu $\mu = 0,2$ angesetzt werden.

7.2.3.3 Wärmedehnzahl

Die Wärmedehnzahl kann zu $\alpha_T = 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 1/K$ angesetzt werden, falls kein genauerer Wert bekannt ist.

7.2.3.4 Schwinden und Kriechen

Für die Bemessung von Bauteilen aus UHFB sind sowohl autogenes Schwinden als auch Trocknungsschwinden zu beachten, wobei in der Regel das autogene Schwinden dominiert. Nach vorliegenden Ergebnissen (s. Abschnitt 6.5.1) hängt das autogene Schwinden sehr deutlich von der Betonzusammensetzung ab. Für das Trocknungsschwinden kann für nicht wärmebehandelten UHFB im Allgemeinen ca. $250 \mu\text{m/m}$ und nach einer Wärmebehandlung $0 \mu\text{m/m}$ angesetzt werden (s. Abschnitt 6.5.2).

Die Kriechzahl kann nach der Richtlinie AFGC/SETRA [7.4] wie folgt angesetzt werden:

- $\varphi = 0,8$ ohne Wärmebehandlung;
- $\varphi = 0,2$ nach einer Wärmebehandlung.

Diese Werte gelten nur für UHFB mit einem Belastungsalter von 28 Tagen. Bei früherem Belastungsbeginn ist bei nicht wärmebehandelten UHFB mit höheren Werten zu rechnen, siehe Abschnitt 6.5.4.

Für das nichtlineare Kriechen bei hohen Betondruckspannungen können noch keine Angaben gemacht werden. Für den zeitlichen Verlauf des Kriechens kann die in Abschn. 6.5.4 angegebene Zeitfunktion verwendet werden, bis weitere Erkenntnisse vorliegen.

7.2.4 Spannungs-Dehnungs-Linie für nichtlineare Verfahren der Schnittgrößenermittlung und für die Verformungsberechnungen

7.2.4.1 Spannungs-Dehnungs-Beziehung nach AFGC/SETRA [7.4]

In der Richtlinie AFGC/SETRA [7.4] wird zur Vereinfachung der Berechnungen aus einer Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung hergeleitet. Die Dehnungen an den jeweiligen markanten Punkten im Bild 7.3 hängen von der Rissbreite und Bauteilhöhe ab. Die maximale Grenzdehnung ist jedoch kein pauschaler Wert, sondern wird in Abhängigkeit von der Faserlänge und der Bauteilhöhe bestimmt. Folgende Punkte werden verwendet, um die Spannungs-Dehnungs-Beziehung zu beschreiben:

- Elastizitätsgrenze:

$$\varepsilon_e = \frac{f_{tj}}{E_{ij}} \quad (7-12)$$

mit: f_{tj} = Zugfestigkeit der Matrix
 E_{ij} = E-Modul für Kurzzeitbelastung
 J = Alter in Tagen

- Grenze bei Rissbreite $w = 0,3 \text{ mm}$:

$$\varepsilon_{0,3} = \frac{w_{0,3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{E_{ij}} \quad (7-13)$$

mit: $w_{0,3} = 0,3 \text{ mm}$
 l_c = charakteristische Länge; i. Allg.: $l_c = 2/3 h$

- Grenze bei Rissbreite $w = 0,01 \cdot h$:

$$\varepsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{E_{ij}} \quad (7-14)$$

mit: $w_{1\%} = 0,01 \cdot h$ (h = Höhe des Prismas für den Biegezugversuch)

- Grenzdehnung:

$$\varepsilon_{\text{lim}} = \frac{l_f}{4 l_c} \quad (7-15)$$

mit: l_f = Faserlänge

l_c = charakteristische Länge; i. Allg.: $l_c = 2/3 \cdot h$

- Spannung bei Erreichen von $w = 0,3 \text{ mm}$:

$$\sigma_{bt} = \frac{\sigma(w_{0,3})}{K} \quad (7-16)$$

mit: $K = \gamma_f$ nach Gl. (7-8)

- Spannung bei Erreichen von $w = 0,01 \cdot h$:

$$\sigma_{1\%} = \frac{\sigma(w_{1\%})}{K} \quad (7-17)$$

- sowie:

$$\sigma_{bc} = 0,6 \cdot f_{cj} \quad (7-18)$$

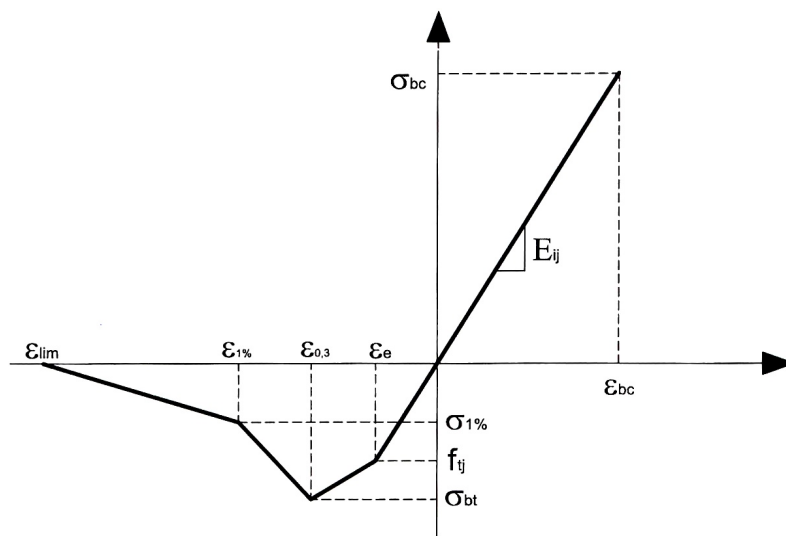


Bild 7.3: Spannungs- Dehnungs-Beziehung nach AFGC/SETRA [7.4]

Die in Bild 7.3 angegebene Spannungs-Dehnungs-Beziehung ist ebenso wie die für den Bruchzustand gemäß Abschnitt 7.2.5.1 im Allgemeinen für die Bemessung geeignet. Für Spezialfälle, bei denen sich die Fasern besonders ausrichten, z. B. bei dünnen Platten, wird von AFGC/SETRA [7.4] in Anhang 3 vorgeschlagen, die Spannungs-Dehnungs-Beziehung über Versuchsrückrechnungen zu bestimmen.

7.2.4.2 Spannungs-Rissbreiten-Beziehung auf Grundlage der theoretischen Abschätzung der Zugfestigkeit aufgrund von Fasergehalt und -orientierung

Auf Grundlage der theoretischen Abschätzung der Betonzugfestigkeit von UHFB nach [7.12], vgl. Abschn. 7.2.2.2, bzw. mit Kenntnis der Zugfestigkeit und Fasergeometrie lässt sich wie für Stahlfaserbeton (vgl. z. B. [7.15]) ein theoretischer Ansatz für die Spannung $\sigma(w)$ im gerissenen Querschnitt in Abhängigkeit von der Rissbreite w und der Faserlänge l_f angeben:

$$\sigma(w) = (1 - 2 w / l_f)^2 \cdot f_{ct} \quad (7-19)$$

mit: f_{ct} = $\sigma(w = 0)$ = Zugfestigkeit nach Gl. (7.9)

Für einen ultrahochfesten Faserfeinkornbeton, wie z. B. BPR oder Ductal[®], ergibt sich dann die im Bild 7.4 dargestellte, vereinfachte σ - ε - bzw. σ - w -Beziehung.

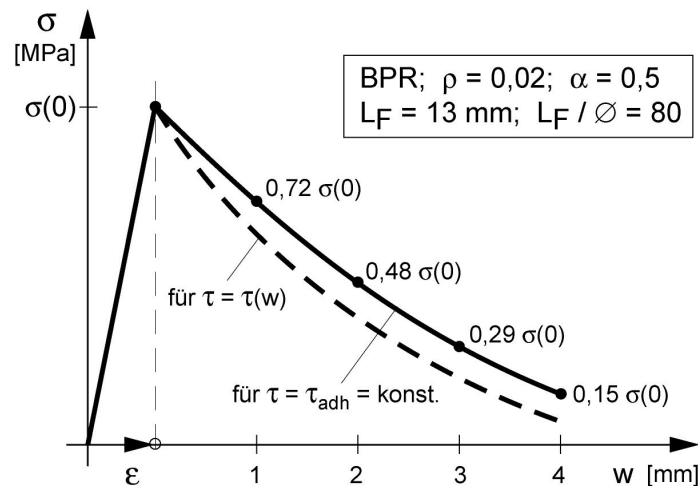


Bild 7.4: Spannungs-Rissbreiten-Beziehung für faserbewehrten UHFB, nach: Behloul [7.12]
(L_F = Faserlänge; $\varnothing$ = Faserdurchmesser; ρ = Fasergehalt; α = Faserorientierungsfaktor, vgl. Abs. 7.2.2.2)

Dieser Spannungs-Rissbreiten-Ansatz kann bei Bedarf in einen Spannungs-Dehnungs-Ansatz übergeführt werden, indem die diskreten Risse über eine äquivalente Länge bzw. Rissbandbreite verschmiert werden. AFGC/SETRA [7.4] geben z. B. eine äquivalente Länge von $2/3 \cdot h$ an. In [7.22] wird bei der Modellierung des Spannungs-Rissöffnungs-Verhaltens zwischen der Zugfestigkeit f_{ct} der reinen UHFB-Matrix, der Rissspannung $\sigma_{cf,cr}$ des ideellen Querschnitts, der ideellen Rissspannung des Faserbetons $\sigma_{cf,cr}^i$ sowie der Faserwirksamkeit σ_{cf0} (maximale Faserbetonspannung des gerissenen Querschnitts) unterschieden (Bild 7.5).

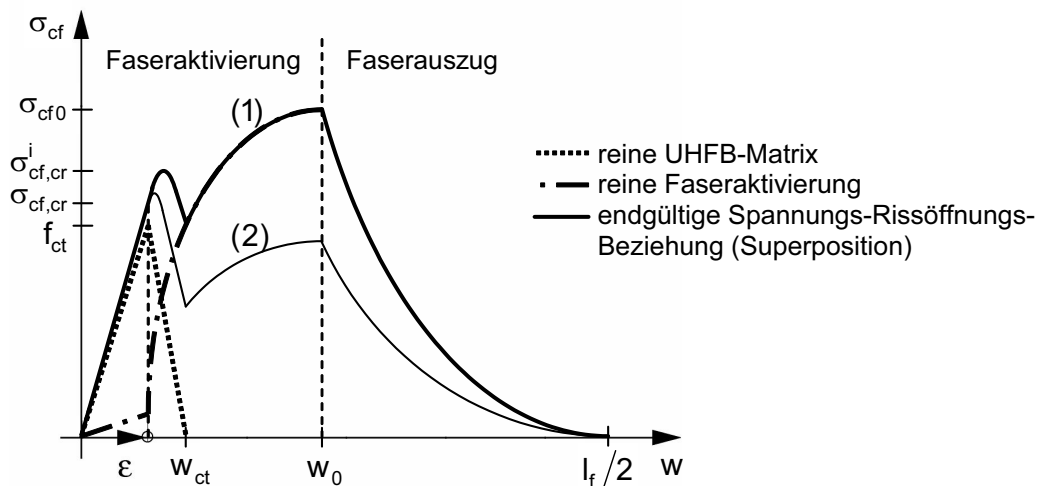


Bild 7.5: Spannungs-Rissbreiten-Beziehung für faserbewehrten UHFB, nach [7.22]
(1) UHFFB mit verfestigendem Verhalten nach Erstrissbildung ($\sigma_{cf0} > \sigma_{cf,cr}^i$)
(2) UHFFB mit entfestigendem Verhalten nach Erstrissbildung ($\sigma_{cf0} < \sigma_{cf,cr}^i$)

Bis zum Erreichen der Rissspannung $\sigma_{cf,cr}$ des ideellen Querschnitts verhält sich faserbewehrter UHFB weitgehend linear-elastisch (Zustand I). Im Anschluss kommt es infolge Interaktion der sich im öffnenden Riss entfestigenden Matrix und der bereits aktivierten Fasern zu einem stabilen Mikrorisswachstum. Die ideale Rissspannung des Faserbetons $\sigma_{cf,cr}^i$ kennzeichnet als (lokales) Maximum den Übergang zum Makroriss. Sie wächst rechnerisch mit dem Fasergehalt sehr deutlich an.

Die Faserwirksamkeit σ_{cf0} entspricht der maximalen Tragfähigkeit der Faserbewehrung (reiner Zustand II). Sie markiert zugleich den Übergang von der Phase der Faseraktivierung in die Phase des Faserauszugs. In

Abhängigkeit der Faserart und des Fasergehalts kann die Faserwirksamkeit kleiner oder größer als die ideale Rissspannung des Faserbetons sein. Entsprechend zeigt der UHFB bei Erstrissbildung ein ausschließlich entfestigendes Verhalten oder ein verfestigendes Verhalten mit ausgeprägter Mehrfachrissbildung (vgl. z. B. [7.16]).

Die Faserwirksamkeit σ_{cf0} kann sinngemäß nach Gleichung (7-9) ermittelt werden. Sie wird jedoch im Unterschied zu [7.12] rechnerisch erst bei einer Rissbreite w_0 nach Gleichung (7-20) erreicht.

$$w_0 = \frac{\tau_f \cdot l_f^2}{E_f \cdot d_f} \quad (7-20)$$

mit: τ_f = mittlere Faserverbundspannung
 l_f = Faserlänge
 d_f = Faserdurchmesser
 E_f = Elastizitätsmodul des Faserwerkstoffs

In der Faseraktivierungsphase gilt für die über den Makroriss übertragene Faserbetonspannung:

$$\sigma_{cf} = \sigma_{cf0} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{w}{w_0}} - \frac{w}{w_0} \right) \quad (7-21)$$

mit: σ_{cf0} = Faserwirksamkeit, sinngemäß nach Gleichung (7-9) ermittelt
 w = aktuelle Rissbreite
 w_0 = Rissbreite bei Erreichen der Faserwirksamkeit nach Gleichung (7-20)

Die Phase des Faserauszug kann insbesondere bei kurzen Fasern durch Gleichung (7-19) zutreffend beschrieben werden.

Der in Bild 7.5 qualitativ dargestellte Spannungs-Rissöffnungs-Zusammenhang konnte in zentrischen Zugversuchen an mit unterschiedlichen Fasern und Fasergehalten bewehrtem UHFB experimentell bestätigt werden. In [7.22] wird darüber hinaus eine Erweiterung vorgenommen, die den Einfluss des Schwindens des UHFB zu berücksichtigen gestattet.

7.2.4.3 Spannungs-Dehnungs-Beziehung für UHFB in Anlehnung an DIN 1045-1 [7.1]

7.2.4.3.1 Druckspannungs-Dehnungs-Beziehung für UHFB

Für die praktische Anwendung kann eine Druckspannungs-Dehnungs-Beziehung gemäß Bild 7.6 angewendet werden. Dabei können für den Elastizitätsmodul die im Abschn. 7.2.3.1 bzw. 6.3.1 angegebenen Werte angesetzt werden. Der abfallende Ast wurde im Bild 7.6 nur angedeutet, weil für seinen Verlauf noch keine abgesicherten Aussagen gemacht werden können, die einen Bemessungsansatz rechtfertigen würden.

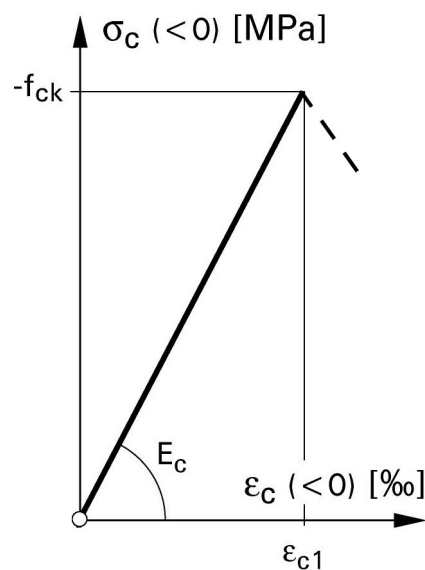


Bild 7.6: Vereinfachte Druckspannungs-Dehnungs-Beziehung

7.2.4.3.2 Spannungs-Dehnungs-Linie im Zugbereich in Anlehnung an das Stahlfaserbetonmerkblatt des DBV [7.2] und den Richtlinienentwurf des DAfStb [7.3]

Um die bei der Bemessung übliche Vorgehensweise weiter verwenden zu können, wird auch hier anstelle der Zugspannungs-Rissöffnungs-Beziehung eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den Zugbereich aus den Versuchen hergeleitet. Diese hat auch den Vorteil, dass problemlos auch die Kombination mit Betonstahlbewehrung behandelt werden kann, wie es bereits für faserbewehrten Normalbeton erfolgreich praktiziert wurde. Hierzu wird im DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton [7.2] bzw. in der DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [7.3] ein Standardprüfkörper (vgl. Bild 6.11) angegeben, und aus den Last-Verformungs-Beziehungen dieses Versuchskörpers lässt sich mit den in Abschnitt 7.2.2.4 angegebenen Festigkeitswerten die Spannungs-Dehnungs-Beziehung für zentrischen Zug herleiten.

Diese Regelung ist auch für Abschätzungen bzw. für Vorbemessungen bei UHFB geeignet. In [7.14] wurde beispielsweise bei Nachrechnungen von Versuchen mit Grobkorn-UHFB eine gute Übereinstimmung erzielt. Bei Feinkornbeton lagen Versuchs- und Rechenergebnisse jedoch weit auseinander. Bei genauen Nachweisen muss insbesondere berücksichtigt werden, dass die Biegezugfestigkeit einen Maßstabseffekt aufweist, s. Tabelle 6.1. Nachfolgend ist als Beispiel dargestellt, wie sich die Spannungs-Dehnungs-Linie im Zugbereich auf der Grundlage der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [7.3] unter bestimmten Annahmen für UHFB ergibt.

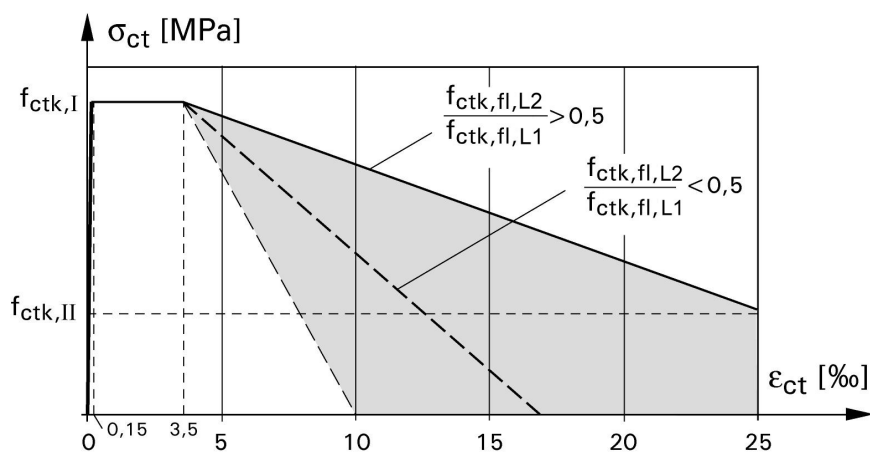


Bild 7.7: In Anlehnung an [7.14]) abgeleitete Spannungs-Dehnungs-Linie für die Beschreibung der Zugzone

Die Dehnung von 0,15 ‰ im Bild 7.7 wurde gegenüber DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [7.3] für UHFB angepasst. Sie stellt die Elastizitätsgrenze dar und ergibt sich beispielsweise für eine Zugfestigkeit von 8,25 MPa und einen E-Modul von 55 GPa.

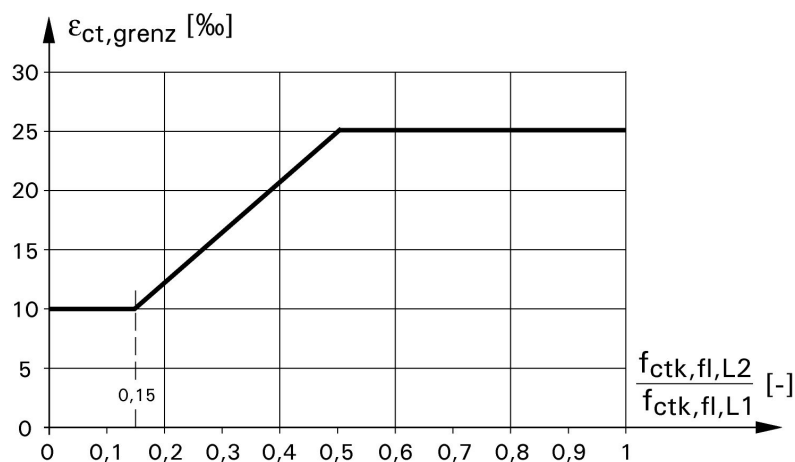


Bild 7.8: Werte für $\varepsilon_{ct,grenz}$

Im Allgemeinen kann bei der Bemessung von einer Grenzdehnung von $\varepsilon_{ct} = 25$ ‰ ausgegangen werden. Nachrechnungen von Versuchen bei faserbewehrtem Normalbeton zeigen jedoch, dass für

$f_{ctk,fl,L2}/f_{ctk,fl,L1} < 0,5$ die Bemessung auf der unsicheren Seite liegen könnte. Aus diesem Grund ist im Bild 7.8 eine Beziehung für die Grenzdehnung $\varepsilon_{ct,grenz}$ angegeben. In Bild 7.7 wird die verminderte Dehnung für das Verhältnis $f_{ctk,fl,L2} / f_{ctk,fl,L1} \leq 0,5$ mit der grau unterlegten Fläche dargestellt.

7.2.4.4 Diskussion der Vorschläge für das Zugtragverhalten

Die beiden Vorschläge zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung auf der Zugseite von Biegebauteilen gemäß DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [7.3] und AFGC/SETRA [7.4] weisen einen empirischen Charakter auf, wobei der Ansatz von AFGC/SETRA [7.4] den Maßstabseffekt (Einfluss der Prüfkörperhöhe) berücksichtigt.

Während die Vorgehensweise nach DAfStb [7.3] bzw. DBV [7.2] vor allem auf Bauteile mit gemischter Bewehrung abzielt, kann der Vorschlag von AFGC/SETRA [7.4] insbesondere bei Bauteilen ohne Zusatzbewehrung aus Betonstahl verwendet werden.

Die beiden Vorschläge unterscheiden sich auch in der Festlegung der Grenzzugdehnungen. Während DAfStb [7.3] eine feste Grenzdehnung vorschreibt, gibt AFGC/SETRA [7.4] variable Werte in Abhängigkeit von Faserlänge und Bauteilhöhe an, wobei die zugrunde gelegte Grenzzugbreite immer ein Viertel der Faserlänge beträgt, vgl. Gl. (7-15), was auf der sicheren Seite liegt. Im Versuch wird die letzte Faser erst bei einer Rissbreite in Größenordnung der halben Faserlänge ausgezogen, so dass der Knick im abfallenden Ast in Bild 7.3 nicht so deutlich hervortritt wie dort dargestellt.

Bei beiden Vorschlägen ist zu bedenken, dass die Spannungs-Dehnungslinie nicht ohne Rücksicht auf die Dicke des zu bemessenden Bauteils und die Faserausrichtung angewendet werden sollte, da in beiden Fällen die Bauteildicke den Zusammenhang zwischen der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung und der Spannungs-Dehnungs-Beziehung bestimmt. Hier besteht dringender Forschungsbedarf.

7.2.5 Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Querschnittsbemessung

7.2.5.1 Spannungs-Dehnungs-Beziehung für die Querschnittsbemessung nach AFGC/SETRA

Bei AFGC/SETRA [7.4] wird eine bilineare Druckspannungs-Dehnungs-Beziehung verwendet (Bild 7.9). Der lineare Ast wird durch den E-Modul E_{ij} (vgl. Abschn. 7.2.4.1) festgelegt. Die Druckfestigkeit wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf den Langzeitfestigkeitswert $f_{cd} = 0,85 f_{ck}/\gamma_c$ begrenzt, vgl. Gl.(7-1) für i. Allg. $\theta = 1,0$.

Die zugehörige Dehnung ε_{bc} ergibt sich als Quotient der Langzeitfestigkeit und des E-Moduls. Das Fließplateau wird auf eine Dehnung von 3 ‰ begrenzt, was ungefähr der Bruchdehnung in Kurzzeitversuchen entspricht (z. B. UHFB mit $f_{ck} = 150$ MPa und einem E-Modul von 50 GPa), wie im Bild 7.9 dargestellt.

Der abfallende Ast wird in der französischen Richtlinie auf der sicheren Seite liegend nicht berücksichtigt, da sein Verlauf großen Streuungen unterworfen sein kann.

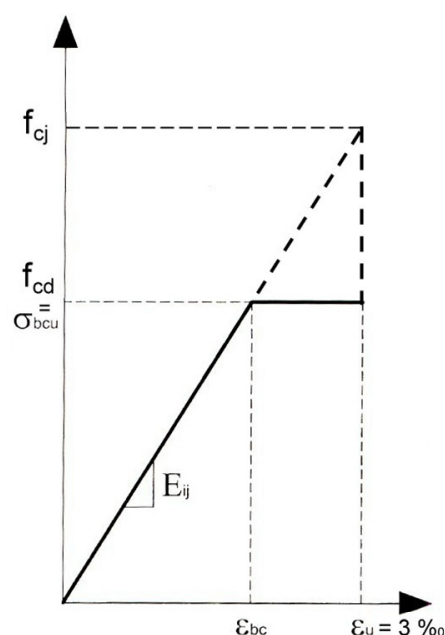


Bild 7.9: Druckspannungs-Dehnungs-Beziehung für die Bemessung nach AFGC/SETRA [7.4]

Für das Zugtragverhalten im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Bild 7.10) wird eine ähnliche Kurve wie für den Gebrauchszustand gemäß Abschn. 7.2.4.1 angesetzt. Lediglich die Zugfestigkeiten werden mit einem Sicherheitsbeiwert beaufschlagt.

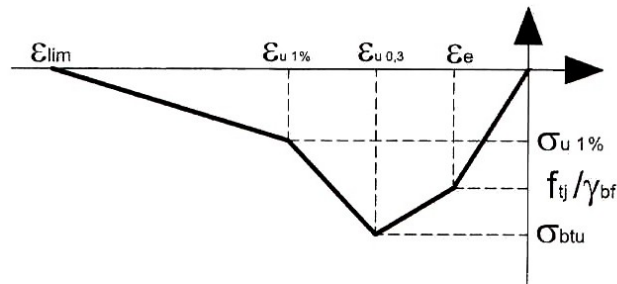


Bild 7.10: Zugspannungs-Dehnungsbeziehung im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

In den Bildern 7.9 und 7.10 gelten die folgenden Zusammenhänge:

$$\varepsilon_{u0,3} = \frac{w_{0,3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_{ij}}, \text{ mit: } w_{0,3} = 0,3 \text{ mm} \quad (7-22)$$

$$\varepsilon_{u1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_{ij}}, \text{ mit: } w_{1\%} = 0,01 \text{ H (H ... Höhe des Biegeversuchsprismas)} \quad (7-23)$$

$$\varepsilon_{lim} = \frac{l_f}{4 l_c}, \text{ mit: } l_f \text{ ... Faserlänge; } l_c \text{ ... charakteristische Länge} \quad (7-24)$$

$$\sigma_{bcu} = \frac{0,85}{\theta \gamma_b} f_{cj}, \text{ mit: } f_{cj} \text{ ... Betondruckfestigkeit; } j \text{ ... Alter in Tagen} \quad (7-25)$$

$$\sigma_{btu} = \frac{\sigma(w_{0,3})}{K \gamma_{bf}} \text{ und } \sigma_{u1\%} = \frac{\sigma(w_{1\%})}{K \gamma_{bf}} \quad (7-26)$$

7.2.5.2 USC-Richtlinie der JSCE (2004)

Die japanische USC-Richtlinie des JSCE [7.5] lehnt sich in vielen Punkten an die Empfehlungen der AFGC/SETRA [7.4] an. Dies ist verständlich, weil sie im Wesentlichen auf Erfahrungen mit der Sakata Mirai Bridge beruht, welche mit dem französischen Produkt Ductal® hergestellt wurde. Lediglich die Bruchdehnung liegt mit 3,5 ‰ geringfügig über der von AFGC/SETRA, und es wird von $E_c = 50 \text{ GPa}$ ausgegangen.

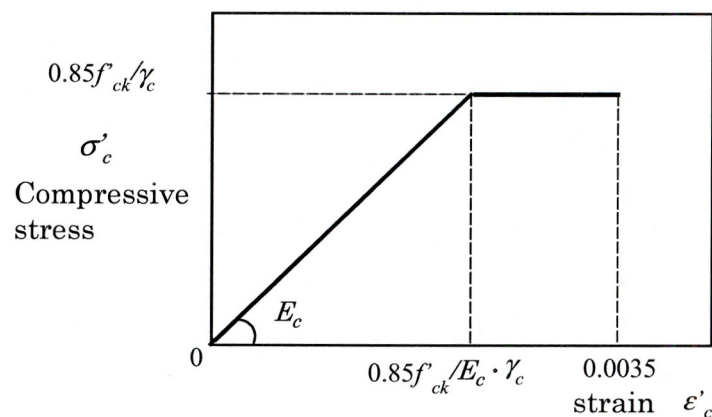


Bild 7.11: Druckspannungs-Dehnungs-Beziehung für die Bemessung nach JSCE-USC [7.5]

In der japanischen Richtlinie wird ein bilinearer Ansatz für das entfestigende Verhalten unter Zug angesetzt. Die Rissbreiten werden wie bei AFGC / SETRA [7.4] mittels einer äquivalenten Länge in Dehnungen umgerechnet (Bild 7.12). Allerdings wird die äquivalente Länge dort nicht konstant zu $2/3 h$ angesetzt, sondern sie

hängt von der Prismenhöhe ab (Bild 7.13). Im Gegensatz zur DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [7.3] wird die Zugdehnung nicht pauschal auf 25 ‰ begrenzt. Die Zugfestigkeit wird dort produktbezogen explizit zu $f_{tk} = 8,8$ MPa angegeben. Die im Bild 7.12 angegebenen Rissbreiten betragen $w_{1k} = 0,5$ mm bzw. $w_{2k} = 4,3$ mm.

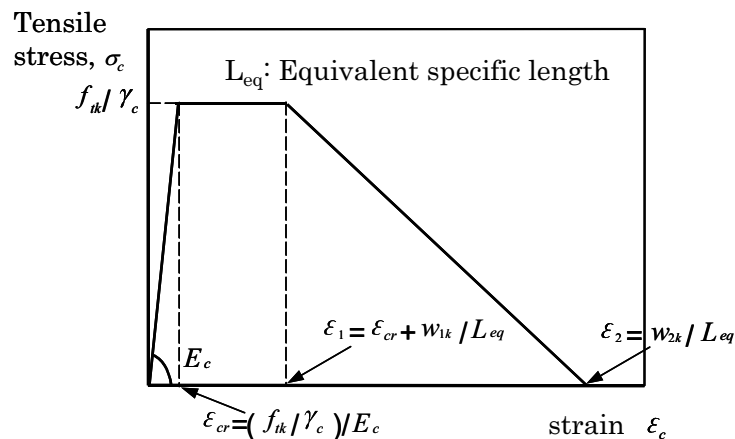


Bild 7.12: Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung nach JSCE-USC [7.5]

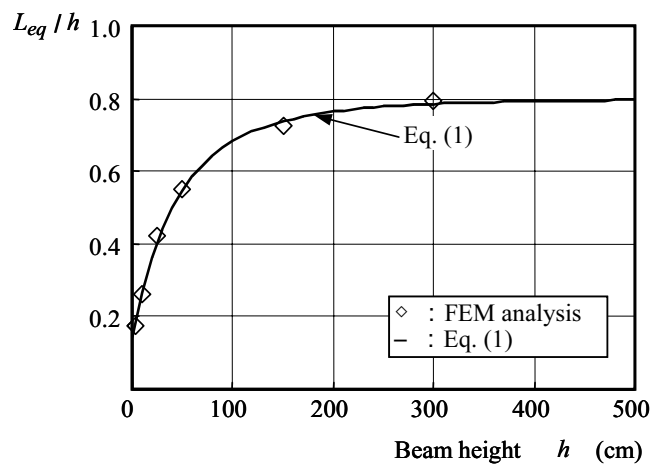


Bild 7.13: Ansatz für die äquivalente Länge nach JSCE-USC [7.5]

7.2.5.3 Spannungs-Dehnungs-Beziehung für UHFB auf Druck für die Querschnittsbemessung auf Grundlage der DIN 1045-1

Die Bilder 7.14 und 7.15 zeigen als Beispiel die Herleitung der Bemessungskurven für die Spannungsverteilung in Druckzonen für einen UHFB mit $f_{ck} = 180$ MPa (ähnlich Fig. 1 im Annex 1 der Richtlinie AGFC/SETRA [7.4]) nach den beiden in den Abschnitten 7.2.1.3 und 7.2.1.4 aufgezeigten Vorschlägen. Das Bild 7.14 verdeutlicht den Einfluss von γ_c' auf die Bemessungskurve. Im Bild ist der Fall eines Ortbetons mit Fasern in Kombination mit einem Sicherheitsbeiwert $\gamma_c' = 1,11$ in Anlehnung an DIN 1045-1 nach Abschnitt 7.2.1.3 dargestellt. Der abfallende Ast hängt vom Fasergehalt und von der Faserart ab, wie in den Bildern durch die schraffierten Bereiche angedeutet.

Bild 7.15 zeigt die Bemessungskurve für ein faserbewehrtes Betonfertigteile nach dem in Abschnitt 7.2.1.4 erläuterten Vorschlag, d. h. ohne Sicherheitsbeiwert γ_c' .

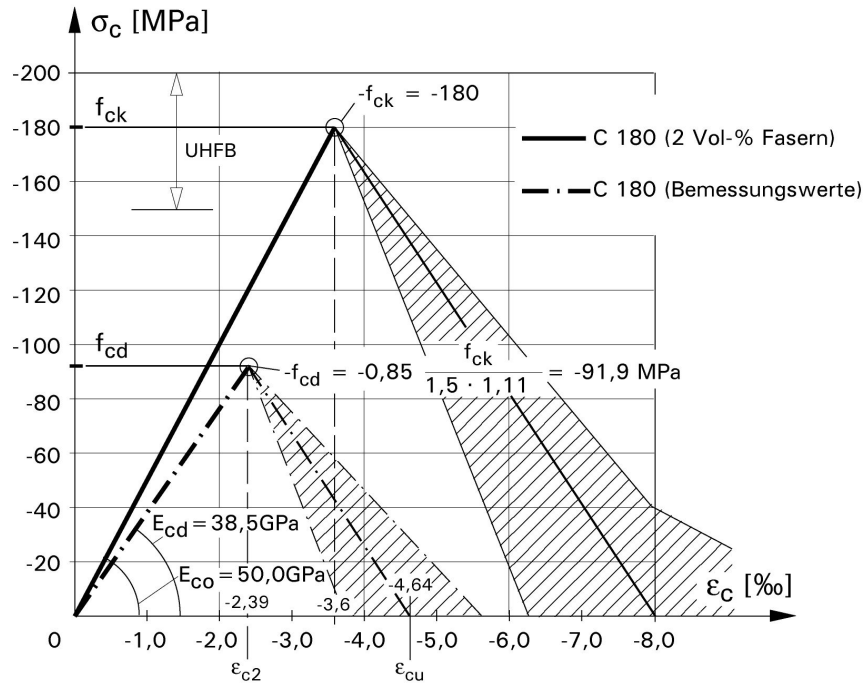


Bild 7.14: Herleitung der Bemessungskurve für Druck für UHFB als Ortbeton mit Fasern für einen Beton mit $f_{ck} = 180$ MPa für $\gamma_c = 1,5$ und $\gamma_c' = 1,11$ nach Abschn. 7.2.1.3

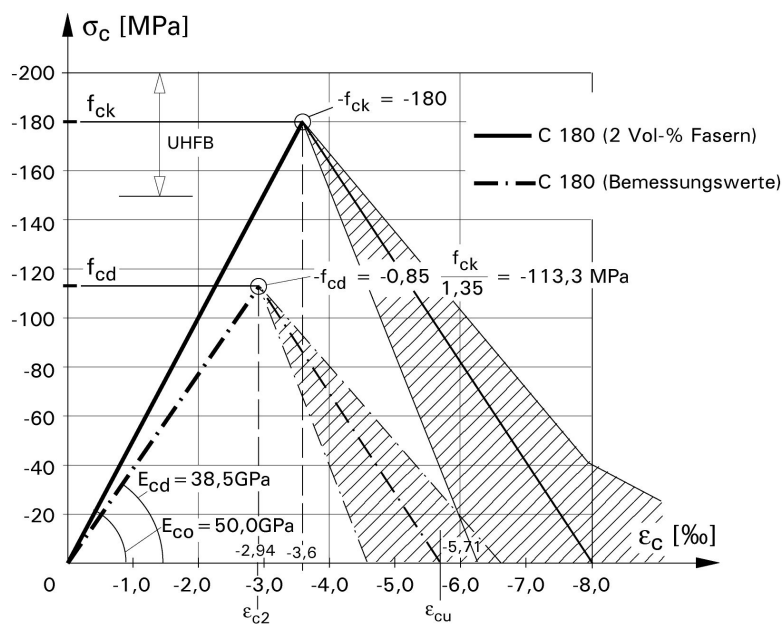


Bild 7.15: Herleitung der Bemessungskurve für Druck für faserbewehrte Fertigteile aus UHFB mit $f_{ck} = 180$ MPa für $\gamma_c = 1,35$ und $\gamma_c' = 1,0$ nach Abschn. 7.2.1.4

Wie bei Normalbeton wird bei diesem Ansatz die für Spannungsverteilung in Druckzonen aus UHFB auch der Einfluss der Dauerlast berücksichtigt: bei Normalbeton wird nach [7.17] und [7.18] die kritische Standzeit, also Dauerstandsfestigkeit bei ca. 3 Tagen Belastung als maßgebend angesetzt, wie im Bild 7.16 a dargestellt. Bei hochfestem Beton und insbesondere bei UHFB, wie im Bild 7.16 b dargestellt, liegen die Spannungs-Dehnungs-Linien für den Kurzzeit- und Langzeitversuch sehr viel enger zusammen als bei Normalbeton wegen der deutlich geringeren Kriechmaße. In dem Bild 7.16 b wurde für UHFB das für nicht wärmebehandelten Beton nach Abschnitt 7.2.3.4 angegebene Kriechmaß von $\varphi = 0,8$ angenommen, und die Bemessungskurve für das wie bei Normalbeton angenommene Belastungsalter von ca. 3 Tagen mit einer Kriechzahl von $\varphi = 0,3$ geschätzt (somit gilt also $E_{cd} = E_{c0}/1,3$), weil entsprechende Versuche noch ausstehen.

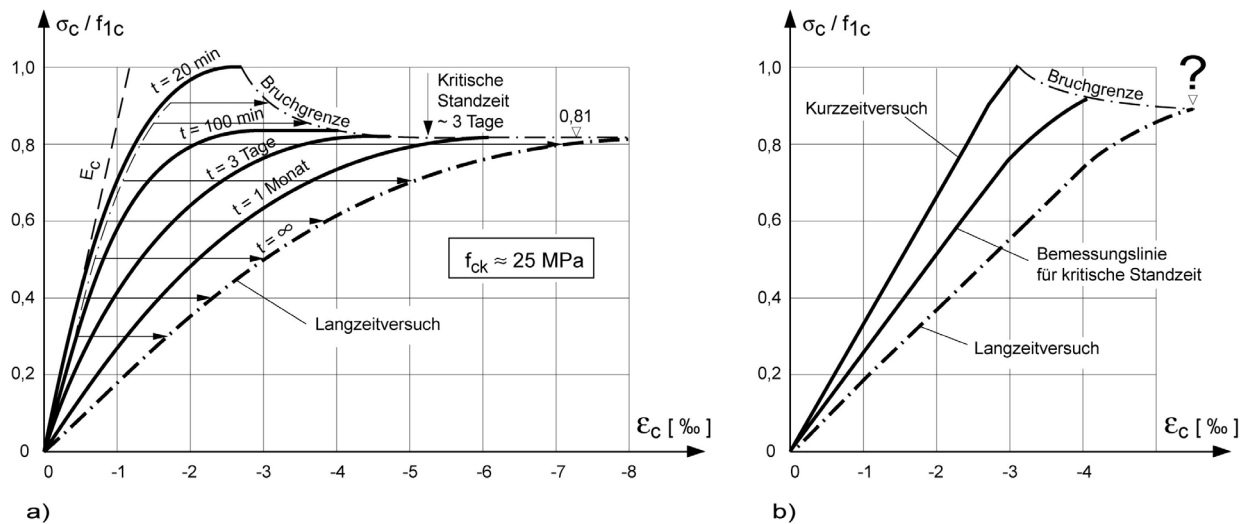


Bild 7.16: Kurzzeit- und Langzeitverhalten von Normalbeton und zu erwartendes Verhalten von UHFB, dargestellt in einem σ_c - ϵ_c -Diagramm
a) Normalbeton nach [7.17] und [7.18] b) Ansatz für UHFB

Im Vergleich zum hochfestem Beton nach DIN 1045-1 wird bei diesen linearen Ansätzen im aufsteigenden Ast für UHFB ab ca. C150 also der Exponent n in Gl. (65) der DIN 1045-1 zu $n = 1$ gesetzt. Um einen Übergang von UHFB zum hochfesten Beton zu schaffen, müsste dieser Wert n bis auf 1,55 für die Betonklasse $f_{ck} = 100 \text{ MPa}$ erhöht werden, aber hierzu fehlen noch systematische Untersuchungen und Versuche.

Wie in DIN 1045-1, 9.1.6 (3) angegeben, können auch andere idealisierte Spannungsverteilungen angenommen werden, wobei ein Spannungsblock nicht sinnvoll erscheint. Für faserbewehrten oder ausreichend umschnürten UHFB kann jedoch vergleichbar zu Bild 24 der DIN 1045-1 ein bilinearer Ansatz mit einem kurzen horizontalen Ast angegeben werden, wie im Bild 7.17 angegeben. Dabei ist die Dehnung $\epsilon_{c3} = \epsilon_{c2}$, und der Wert für ϵ_{c3u} wird dabei so bestimmt, dass dieser Ansatz die gleichen Werte für die Lage und Größe der Druckzonenkraft liefert wie der im Bild 7.14 bzw. 7.15. Für eine Vorbemessung kann die Länge des horizontalen Asts zu 0,3 ‰ gewählt werden. Im Bild 7.18 ist die Dehnung ϵ_{c3u} der bilinearen Spannungs-Dehnungs-Linie in Abhängigkeit von der maximalen Dehnung ϵ_{cu} dargestellt, die vom Fasergehalt abhängt.

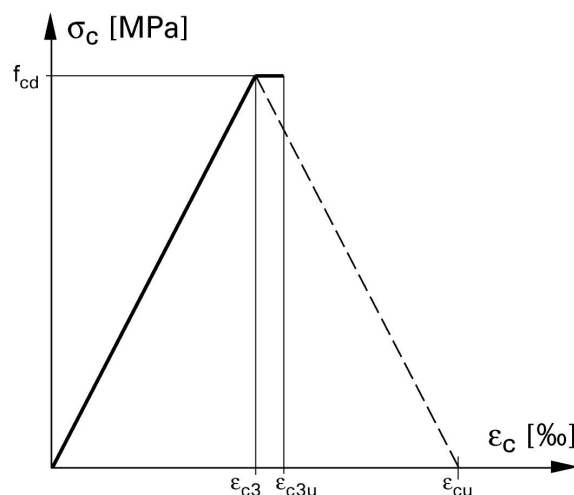


Bild 7.17: Vorschlag für eine bilineare Spannungs-Dehnungs-Linie für faserbewehrten bzw. ausreichend umschnürten UHFB

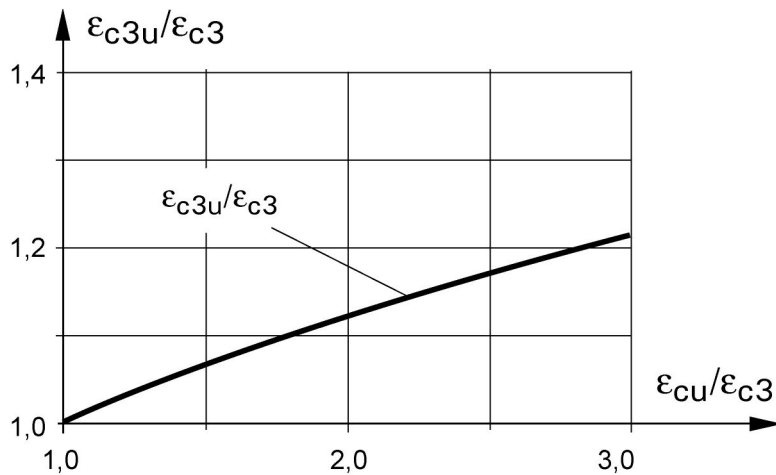


Bild 7.18: Abhängigkeit der Dehnung ε_{c3u} der vorgeschlagenen bilinearen Spannungs-Dehnungs-Linie nach Bild 7.17 von der vom Fasergehalt abhängigen maximalen Dehnung ε_{cu}

Für das Zugtragverhalten sei auf den Ansatz in Anlehnung an DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [7.3] bzw. DBV-Merkblatt „Stahlfaserbeton“ [7.2] verwiesen. Die Beziehung nach Bild 7.7 kann angewandt werden, aber die Zugfestigkeiten müssen mit einem Sicherheitsbeiwert beaufschlagt werden.

7.3 Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

7.3.1 Allgemeines

Grundlagen für die Querschnittbemessung sind die zuvor angegebenen Werkstoffgesetze. Die Werkstoffgesetze sind durch Versuche zu ermitteln. Die Bemessungswerte können dann nach den Vorschlägen in diesem Abschnitt aus den Versuchsergebnissen festgelegt werden.

Für UHFB wird im Allgemeinen ein lineares Materialverhalten bei der Ermittlung der Schnittgrößen angenommen. Eine nichtlineare Schnittgrößenermittlung ist insbesondere bei faserbewehrten UHFB möglich, aber dann ist ein Nachweis der ausreichenden Verformungsfähigkeit zu erbringen. Das Vorgehen zur nichtlinearen Schnittgrößenermittlung und Bemessung wird beispielsweise in [7.23] und [7.24] erläutert.

7.3.2 Biegung mit Längskraft

Es gelten folgende Annahmen:

- Ebenbleiben der Querschnitte;
- Berücksichtigung der Zugfestigkeit bei faserbewehrtem UHFB, nicht jedoch bei nicht faserbewehrtem UHFB;
- Starrer Verbund zwischen Beton und im Verbund liegender Bewehrung;
- Werkstoffgesetze für den Beton- und Spannstahl nach DIN 1045-1.

Dabei ist die Grenzdehnung von Betonstahl in der Zugzone auf 25 ‰ zu begrenzen. Analog zur DIN 1045-1 ist die Tragfähigkeit des Querschnitts erreicht, wenn entweder die Druckzone oder die Zugzone die Grenzdehnung erreicht.

7.3.3 Querkraft und Torsion

Bei der Ermittlung einer möglicherweise nötigen Bügelbewehrung infolge Querkraft werden bei AGFC/SETRA [7.4], 2.3 drei lastabtragende Anteile addiert, und zwar die Querkrafttragfähigkeit des Betons, die der Bügelbewehrung und die der Fasern. Die Bruchquerkraft V_u ist mit dieser Annahme:

$$V_u = V_{Rb} + V_a + V_f \quad (7-27)$$

mit: V_{Rb} = Betonanteil
 V_a = Bewehrungsanteil
 V_f = Faseranteil

Der Faseranteil setzt sich hierbei folgendermaßen zusammen:

$$V_f = \frac{S \cdot \sigma_p}{\gamma_{bf} \cdot \tan \beta_u} \quad (7-28)$$

mit: σ_p = Restzugfestigkeit: $\sigma_p = \frac{1}{K} \frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \sigma(w) dw$

K = Orientierungsbeiwert der Fasern (hier: $K = \gamma_f$)

w_{lim} = $\max(w_u; 0,3 \text{ mm})$, wobei $w_u = l_c \cdot \varepsilon_u$ und l_c ... charakteristische Länge

$\sigma(w)$ = charakteristische Nachrisszugfestigkeit für die Rissbreite w (im Versuch ermittelt)

S = Fläche mit Faserwirkung:

$S = 0,9 \cdot b_0 \cdot d$ bzw. $b_0 \cdot z$ für Rechtecks- oder T-Querschnitte

$S = 0,8 \cdot (0,9 \cdot d)^2$ bzw. $0,8 \cdot z^2$ für Kreisquerschnitte

γ_{bf} = Teilsicherheitsbeiwert für Faserbeton unter Zugbelastung (hier: $\gamma_{bf} = \gamma_{ct}$)

β_u = Druckstrebenneigung

Ähnliche Konzepte werden in dem Merkblatt für Stahlfaserbeton des DBV [7.2] und dem Richtlinienentwurf des DAfStb [7.3] vorgeschlagen. In Deutschland wurden für UHFB bisher nur wenige Versuche durchgeführt, die den günstigen Einfluss von Fasern bestätigen (Fehling und Bunje [7.19]), und es besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf, so sollte besonders die Rechtfertigung für die Addition der drei Traganteile ohne Berücksichtigung der Verträglichkeit überprüft werden.

Bei Torsion dürfen die Fasern bei der Ermittlung der notwendigen Bügelbewehrung infolge Torsion berücksichtigt werden. Die Längszugkräfte infolge Torsion können durch Druckspannungen infolge Biegung oder Längsvorspannung, durch zusätzliche Betonstahl- oder Vorspannbewehrung oder durch einen höheren Fasergehalt aufgenommen werden.

7.3.4 Durchstanzen

Für faserbewehrte UHFB-Bauteile kann der Einfluss von Fasern analog der DAfStb-Richtlinie angesetzt werden. Da sich die Beziehung zwischen Zug- und Druckfestigkeit von UHFB je nach Fasergehalt deutlich von der des Normalbetons unterscheidet, muss der Ansatz der DIN 1045-1 im Einzelfall auf seine Anwendbarkeit überprüft werden.

7.3.5 Stabwerkmodelle

Es gelten die Regelungen in DIN 1045-1, 10.6. Bei faserbewehrtem UHFB können Zugkräfte durch den UHFB aufgenommen werden, aber dann muss überprüft werden, ob die zugehörige Verformung eingehalten wird.

7.3.6 Teilflächenbelastung und Einleitung konzentrierter Lasten

Es gilt im Allgemeinen DIN 1045-1, 10.7. Tastversuche mit UHFB ohne Fasern nach [7.20] ergaben, dass Gl. (116) der DIN 1045-1 mit einem Faktor 0,75 für UHFB mit Splitt und etwa 2/3 für Feinkorn-UHFB versehen werden sollte. Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf, bevor endgültige Werte angegeben werden können.

Laut Abschnitt 2.4 von AFGC/SETRA [7.4] können bei faserbewehrtem UHFB die Fasern als Bewehrung auch im bereits gerissenen Querschnitt angesetzt werden. Die aufnehmbare Zugkraft und somit auch F_{Rdu} sind dann aber stark vom Fasergehalt, der Fasergeometrie etc. abhängig und können nicht mit der Gl. (116) der DIN 1045-1 erfasst werden. AFGC/SETRA [7.4] begrenzen die von faserbewehrtem UHFB aufnehmbare Zugspannung auf

$$\frac{\sigma_p}{1,3 \gamma_{bf}} \text{ mit } \sigma_p = \frac{1}{K} \frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \sigma(w) dw \quad (7-29)$$

mit: $\gamma_{bf} = \gamma_{ct}$

$K = \gamma_f$

7.3.7 Nachweis gegen Ermüdung

Bisher liegen noch keine Versuche für UHFB unter schwellender Zugbelastung oder wechselnder Zug- und Druckbelastung vor, die insbesondere auch die Mitwirkung von Fasern beschreiben. Erste Versuchsergebnisse zu UHFB unter Druck- und Biegezugbeanspruchung sind im Abschnitt 6.7 beschrieben. Für Bemessungsvorschläge sind noch weitere Untersuchungen nötig, und in einem konkreten Fall sind vorab Versuche mit realistischen Bauteilabmessungen durchzuführen.

7.4 Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

7.4.1 Begrenzung der Spannungen

Die Betondruckspannungen werden in AFGC/SETRA [7.4] für Brücken auf folgende Werte begrenzt:

- $0,50 f_{ck}$ unter quasi-ständigen Lasten;
- $0,60 f_{ck}$ bei seltenen und häufigen Lastkombinationen;
- $0,60 f_{cj}$ während des Bauzustandes, reduziert auf $0,55 f_{cj}$, falls j kleiner als 3 Tage ist; bei Fertigteilproduktion zusammen mit Überwachung ist $0,60 f_{cj}$ bis $2/3 f_{cj}$ zulässig.

Sind Bauteile der Ermüdungsgefahr ausgesetzt, so ist die Zugspannung auf folgende Werte zu begrenzen:

- $\min(\sigma_{bt}; f_{t28})$ für häufige Kombinationen;
- $\min(\sigma_{bt}; f_{ij})$ während des Bauzustands, in den Bereichen, die unter Gebrauchslast auf Zug beansprucht sind.

In DIN 1045-1 wird keine Begrenzung der Betonzugspannungen vorgenommen. Die Druckspannungen werden auf ähnliche Werte wie bei AFGC/SETRA [7.4] begrenzt:

- $0,6 f_{ck}$ für die seltene Einwirkungskombination bei Bauteilen, die ohne besonderen Schutz den Expositionsklassen XD1 bis XD3, XF1 bis XF4 und XS1 bis XS3 gemäß Tabelle 3 der DIN 1045-1 ausgesetzt sind;
- $0,45 f_{ck}$ falls Kriechen einen starken Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit, Tragfähigkeit oder Dauerhaftigkeit hat, um nichtlineares Kriechen zu vermeiden.

Diese Werte können bis zum Vorliegen weitere Erkenntnisse auch für UHFB übernommen werden, weil sie auf der sicheren Seite liegen. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Frage, ab welcher Druckspannung bei UHFB nichtlineares Kriechen auftritt, und ob die Fasern im UHFB in der Lage sind, auftretende Risse klein zu halten, so dass ein ausreichender Schutz vor Bewehrungskorrosion gegeben ist.

Die DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [7.3] verweist mit geringfügigen Ergänzungen ebenfalls auf die DIN 1045-1; das DBV-Merkblatt [7.2] Stahlfaserbeton regelt die Spannungsbegrenzung im Abschnitt 8.3.1. In Ergänzung zur DIN 1045-1 erlaubt das DBV-Merkblatt eine Berücksichtigung von 80 % der äquivalenten Zugfestigkeit für den Normalfall und 100 % bei Zwang und stimmt insofern mit AFGC/SETRA [7.4] überein.

Für die Begrenzung der Betonstahlspannungen und der Spannstahlspannungen gilt DIN 1045-1, Abs. 11.1.3 und 11.1.4.

7.4.2 Begrenzung der Rissbreiten und Nachweis der Dekompression

Es gelten allgemein DIN 1045-1 bzw. DIN-FB 102 [7.21]. In [7.22] wird ein auf dem Nachweiskonzept der DIN 1045-1 basierendes Rechenverfahren zur Begrenzung der Rissbreite von mit Fasern und Betonstahl bewehrtem UHFB abgeleitet. Es kann sowohl bei Last- als auch Zwangbeanspruchungen angewendet werden. Ferner sei auf das DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton [7.2] verwiesen.

Bei faserbewehrten, aber nicht vorgespannten UHFB-Bauteilen sollte die Zugspannung unter häufiger Einwirkungskombination auf $0,85 f_{ctk,0,05}$ begrenzt werden.

Bei der Anrechnung der Fasern im UHFB auf die Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite spielen die Faserart, der Fasergehalt sowie die Orientierung und die Verteilung der Fasern im Querschnitt eine wesentliche Rolle.

7.4.3 Begrenzung der Verformungen

Es kann wie in DIN 1045-1, Abschnitt 11.3, beschrieben, vorgegangen werden. Untersuchungen zur Steifigkeit von mit Fasern und Stabstahl bewehrtem UHFB wurden in [7.22] durchgeführt.

7.5 Literatur zum Abschnitt 7

- [7.1] DIN 1045-1: Deutsche Norm: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion. S. 1-148. (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 1: Design). Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag Berlin, Juli 2001
- [7.2] DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton. Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V., Berlin, Wiesbaden, Oktober 2001
- [7.3] DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton: Ergänzungen zu DIN 1045, Teile 1 bis 4 (07/2001). 21. Entwurf. DAfStb im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, April 2005

- [7.4] AFGC/SETRA: Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations provisoires. Documents scientifiques et techniques. Association Française de Génie Civil, Setra, Bagneux Cedex, janvier 2002, 1-152
- [7.5] JSCE-USC: Recommendations for Design and Construction of Ultra-High Strength Fiber-Reinforced Concrete Structures – Draft
- [7.6] BAEL 91 révisé 99: Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, Fasc. 62 (Titre premier, section 1 du CCTG), avril 1999, 226 pp
- [7.7] DIN 1045-2: Deutsche Norm: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. (Part 2: Concrete – Specification, properties, production and conformity). Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2001
- [7.8] Erläuterungen zu DIN 1045-1. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, 1. Auflage, Beuth Verlag, Berlin, Heft 525, September 2003
- [7.9] Tue, N. V.; Schenck, G.; Schwarz, J.: Absicherung der statistisch erhobenen Festbetonkennwerte für die neue Normengeneration. Forschungsbericht. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Leipzig. Januar 2005
- [7.10] fib-Recommendations: Practical Design of Structural Concrete. FIP-Commission 3 „Practical Design“, Sept. 1996. Publ.: SETO, London, Sept. 1999. (Distributed by: *fib*, Lausanne, email: fib@epfl.ch)
- [7.11] Rinder, T.: Hochfester Beton unter Dauerzuglast. H. 544 DAfStb. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [7.12] Behloul, M.: Les micro-bétons renforcés de fibres. De l'éprouvette aux structures. XIVèmes Journées de l'AUGC, Clermont-Ferrand. Prix Jeunes Chercheurs «René Houpert», 1996
- [7.13] Bernier, G.; Behloul, M.: Effet de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique des BPR. pp. 233-240. 2^e colloque international francophone sur les bétons renforcés de fibres métalliques. Toulouse. 4 et 5 juillet 1996
- [7.14] Teutsch, M.; Grunert, J.P. (2004): Biegebemessung von Bauteilen aus Ultrahochfestem Beton. BuStb 99 (2004), H. 8, 657-661
- [7.15] Pfyl, T.: Tragverhalten von Stahlfaserbeton. Dissertation. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Februar 2003
- [7.16] Rossi, P.; Renwez, S.; Guerrier, F. (1996): Les bétons fibrés à ultra-hautes performances. L'expérience actuelle du LCPC. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées – 204 – juillet/aout 1996, pp 87-95
- [7.17] Rüschi, H.: Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete. ACI-Journ. V. 32 (1960), No.1, July, 1-28
- [7.18] Grasser, E.: Darstellung und kritische Analyse der Grundlagen für eine wirklichkeitsnahe Bemessung von Stahlbetonquerschnitten bei einachsigen Spannungszuständen. Diss., TU München, 1968
- [7.19] Fehling, E.; Bunje, K.: Ultra-Hochleistungsbeton – Grundlagen der Konstruktion und Bemessung. S. 21-36. In: Ultra-Hochfester Beton: Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa. Tagungsbeiträge zu den 3. Kasseler Baustoff- und Massivbautagen am 10. Sept. 2003. Erschienen als Heft 2 der Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau. Universität Kassel. Hrsg. Schmidt, M.; Fehling, E.
- [7.20] Klotz, S.; Holschemacher, K.: Teilflächenpressung bei UHFB. S. 215-226 in: Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen. Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Herausgeber: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F., Bauwerk Verlag GmbH. Berlin, November 2003
- [7.21] DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken. 1. Aufl. Hrsg: DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin. 2001
- [7.22] Leutbecher, T.: Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC). Dissertation. Fachbereich Bauingenieurwesen, Universität Kassel, 2007.
- [7.23] Greiner, S.: Zum Tragverhalten von dünnen Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton. Dissertation. Universität Stuttgart. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2006
- [7.24] Greiner, S.: Tragverhalten von dünnen Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 3, S. 154-162

8 Zusammenfassung und Forschungsbedarf

8.1 Allgemeines

Ultrahochfester Beton (UHFB) ist ein sehr korrosionsbeständiger gefügedichter Werkstoff mit einer Druckfestigkeit von mehr als 150 N/mm^2 , in der Regel von 180 bis 220 N/mm^2 . Er ermöglicht es, hoch tragfähige und gleichzeitig sehr filigrane Bauteile und Bauwerke zu schaffen, die Energie- und Rohstoffe einsparen und zudem oft deutlich kostengünstiger sein können als Bauwerke aus Normalbeton. Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften ermöglicht es UHFB, die gewichts- oder verformungsbedingten Grenzen herkömmlicher Stahl- und Betonkonstruktionen deutlich zu erweitern. Die stofflichen Grundlagen für diesen neuen Werkstoff wurden bereits in den 1960er Jahren formuliert. Seine industrielle Anwendung für konstruktive Bauwerke wurde allerdings erst Ende der 1980er Jahre möglich, als es neue, besonders wirkungsvolle Fließmittel ermöglichten, den zement- und zusatzstoffreichen Beton in nahezu selbstverdichtender Konsistenz herzustellen und somit leicht und porenarm zu verarbeiten. Obwohl bereits erste Prototypen von Brücken zunächst in Kanada, später auch in anderen Ländern gebaut wurden, sind noch zahlreiche stoffliche, konstruktive und baubedingte Fragen zu klären, bis das Bauen mit UHFB zu einer genormten und allseits akzeptierten „Regelbauweise“ wird. Unabhängig von den noch offenen Fragen wurden in den letzten Jahren bereits mehrere Brücken aus UHFB auch in Deutschland hergestellt. Neben 4 Kleinbrücken mit einer Länge bis zu 12 m ist hier vor allem die rd. 140 m lange und 5 m breite Gärtnerplatzbrücke über die Fulda in Kassel zu nennen.

Die aus dem vorliegenden Sachstandsbericht ableitbaren forschungsrelevanten Themenbereiche lassen sich vereinfacht in 6 Themenbereiche einteilen:

- Technische und wirtschaftliche Optimierung des Einsatzes von Ausgangsstoffen im Hinblick auf deren Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von UHFB;
- Zielsichere Herstellung und Verarbeitung von UHFB;
- Zielsichere Ermittlung und Einstellung von Materialkennwerten für UHFB;
- Optimierung und Vereinheitlichung der Prüfung von UHFB;
- Untersuchung der Widerstandsfähigkeit von UHFB gegen äußere und innere Angriffe;
- Stoffgerechte Bemessung von Bauteilen aus UHFB.

Da zu den o. a. Themen z. T. grundlegende Kenntnisse fehlten, richtete die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Jahr 2005 das auf sechs Jahre ausgelegte Schwerpunktprogramm „Nachhaltig Bauen mit ultrahochfestem Beton“ (SPP 1182) ein, über dessen Inhalte in den folgenden Abschnitten berichtet wird.

8.2 Umfang und Inhalt des DFG-Schwerpunktprogrammes „Nachhaltig Bauen mit ultrahochfestem Beton“

Die für das Schwerpunktprogramm primär relevanten Themenbereiche wurden von einer vorbereitenden Arbeitsgruppe eingegrenzt und fanden sich in der bewusst breit gefassten Ausschreibung der DFG wieder. Grundlage bildeten u. a. die Ergebnisse eines zuvor in Kassel bearbeiteten DFG-Projektes, die ausführliche Zusammenfassung des technisch-wissenschaftlichen Standes für den Sachstandsbericht über UHFB des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton und ein internationales Symposium im Jahr 2004 in Kassel.

Für die erste von drei Ausschreibungsrunden wurden zu den in Abschnitt 8.1 aufgeführten Themengebieten insgesamt 31 Projektvorschläge bei der DFG eingereicht. Seitens der Gutachtergruppe wurden 21 Projekte – z. T. mit deutlich verringertem Umfang – befürwortet und von der DFG bewilligt. Hinzu kam später noch ein adaptiertes Einzelvorhaben. An dem Schwerpunktprogramm beteiligen sich 18 Forschungsinstitute, und zwar sowohl solche mit eher stofflichem als auch mit eher konstruktivem Tätigkeitsschwerpunkt.

Die Themen der ersten Ausschreibungsrunde sind – in Gruppen zusammengefasst – in Tabelle 1 zusammengestellt. Sie entsprechen den in der Ausschreibung hervorgehobenen Schwerpunkten und spiegeln den gewünschten ganzheitlichen Ansatz des SPP wider, ohne allerdings alle offenen Fragen und Themen abschließend beantworten zu können.

Tabelle 8.1: Projekte der ersten Bearbeitungsphase 2005–2007

Themenbereich	Projektthema	Bearbeiter
1	2	3
Zusammensetzung und deren Optimierung	Einfluss der Kornform von Feinststoffen auf die Packungsdichte und das rheologische Verhalten von UHFB	Prof. Schmidt, DI Geisenhanslücke Universität Kassel
	Schwindreduzierende Fließmittel für UHFB	Prof. Plank, DI Gruber, DI Schröfl, TU München
	Betone mit verminderten Gehalten an energieintensiven Bindemitteln	Prof. Heinz, DI Gerlicher TU München
	Erhöhung der Duktilität von UHFB durch Kombination von Fasern und nanoskalierten Partikeln	Prof. Grübl, Prof. Schneider, Dr. Rühl, TU Darmstadt
Herstellprozess	Optimierung des Mischprozesses ultrahochfester Betone	Prof. Schießl, DI Mazanec TU München
Junger Beton	Werkstoffverhalten von UHFB in jungem Alter	Prof. Budelmann, DI Ewert TU Braunschweig
Struktur u. mechanisches Verhalten des Festbetons	Charakterisierung der UHFB-Mikrostruktur in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung und deren Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und die Dauerhaftigkeit	Dr. Möser, DM Pfeifer Universität Weimar
	Materialgesetze für das Spannungs-Dehnungs-Zeitverhalten von UHFB	Prof. Müller, DI Burkart Universität Karlsruhe
	Ermüdungsverhalten von UHFB bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich	Dr. Niedermeier, DI Fitik TU München (IfM)
	Versuchstechnische Ermittlung und mathematische Beschreibung der mehraxialen Festigkeit von UHFB	Prof. Curbach, DI Speck TU Dresden
	Ermüdung von UHFB unter ein- und mehraxialer Beanspruchung	Prof. Grünberg, Prof. Lohaus DI Ertel, DI Wefer Leibniz-Universität Hannover
Dauerhaftigkeit	Untersuchungen zum Frost-/Frost-Taumittel-Widerstand, dem autogenen Schwinden und der Gefügestruktur von UHFB	Prof. Setzer, Dr. Palecki Universität Duisburg-Essen
	Beständigkeit von UHFB gegenüber chemischem Angriff	Prof. Franke, Dr. Deckelmann, DI Schmidt TU Hamburg-Harburg
	Gefährdungspotenzial für UHFB durch Rissbildung im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit	Dr. Siebel, DI Eppers Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf

Tabelle 8.1: Projekte der ersten Bearbeitungsphase 2005–2007 – Fortsetzung und Schluss

Themenbereich	Projektthema	Bearbeiter
1	2	3
Bemessung und Konstruktion	Selbstverdichtender ultrahochfester Beton mit neuartiger Mikrobewehrung	Prof. Schnellenbach-Held, Prof. Buschmeyer, DI Loosmann Universität Duisburg-Essen
	Tragverhalten von UHFB mit Kombination aus Faser- und Stabstahlbewehrung unter Zugbeanspruchung	Prof. Fehling, DI Stürwald Universität Kassel
	Vorgespannte Träger mit und ohne Stegöffnungen aus ultrahochfestem Beton	Prof. Hegger, DI Bertram RWTH Aachen
	Zur Wirkungsweise von Verbundmitteln in Verbundkonstruktionen aus UHFB	Prof. Tue, Prof. Hegger, DI Rauscher, Universität Leipzig, RWTH Aachen
	Maßstabseinfluss bei kombinierter Beanspruchung aus Biegung und Längskraft von dünnen Bauteilen aus UHFB	Prof. Reineck, DI Frettlöhr Universität Stuttgart (assoziiert)
	Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von hoch beanspruchten Druckgliedern aus UHFB mit hochfester Längsbewehrung	Dr. Teutsch, Prof. Falkner, DI Steven TU Braunschweig
	Fügen von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton (UHFB) durch Verkleben	Prof. Zilch, DI Mühlbauer TU München (IfM)
Nachhaltigkeit	Nachhaltigkeitsanalyse von UHFB mit Hilfe von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung	Prof. Schießl, DI Stengel TU München (cbm)

Die 2. Förderperiode begann im Oktober 2007, wobei sich die Projektthemen teilweise etwas geändert haben. Das Berichtskolloquium im Jahr 2006 hatte gezeigt, dass in allen Bereichen bereits nach nur einem Jahr wesentliche neue Erkenntnisse und Erfahrungen gewonnen werden konnten. Es hat sich zudem eine enge Vernetzung zwischen zahlreichen Arbeitsgruppen ergeben, was die Arbeit zusätzlich befördert. Während der Bearbeitung sind auch neue Fragen aufgetreten, die in der 2. Projektphase gelöst werden müssen, um das Gesamtprojekt erfolgreich weiterzuführen. Bezogen z. B. auf die Betoneigenschaften geht es dabei im Detail insbesondere darum,

- die festgestellte Empfindlichkeit des Betons gegen Schwankungen und Veränderungen in den Ausgangsstoffen zu verringern,
- die Wirkung der derzeit verfügbaren Fließmittel weiter zu erhöhen und ihre z. T. rheologisch nachteiligen Eigenschaften zu vermeiden,
- die Rheologie des feinstoffreichen Betons im Nano- und Mikrobereich weiter zu optimieren,
- den Einfluss einer (üblichen) Wärmebehandlung weiter aufzuklären,
- die Prüfung weiter zu vereinheitlichen sowie
- die Verteilung und Orientierung der Stahlfasern im Beton festzustellen, ihre Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften zu ermitteln und sie bei der Herstellung gezielt zu beeinflussen.

Nachfolgend sind die Kurzfassungen der von allen Forschungsnehmern erstellen Arbeitsberichte über die Projekte der 1. Förderperiode mit den wesentlichen Ergebnissen zusammenfassend wiedergegeben. Die vollständigen Arbeitsberichte können bei den in Tabelle 8.1 angegebenen Forschungsstellen eingesehen werden.

8.3 Zusammenfassungen der Arbeitsberichte über die Projekte der ersten Förderperiode 2005–2007

8.3.1 Werkstoffverhalten von ultrahochfestem Beton im frühen Alter

(Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann, Dr.-Ing. M. Krauß, TU Braunschweig)

Ziel des Projektes ist die Schaffung von Stoffgesetzen zur Entwicklung der mechanischen Eigenschaften und des Verformungsverhaltens von jungem Beton in den ersten Stunden und Tagen der Erhärtung. Damit sollen die stoffgesetzlichen Grundlagen hergestellt werden, um z. B. Spannungen in erhärtenden Bauteilen berechnen zu können, eine Prognose der Rissbildung durch Zwängungen oder Eigenspannungen vorzunehmen, die dauerhaftigkeitsrelevant sein können, oder um z. B. die anfänglichen Spannkraftverluste in vorgespannten UHFB-Bauteilen bzw. den Vorspannzeitpunkt berechnen zu können.

Die Hauptziele der ersten Förderperiode waren die Gewinnung von experimentellen Daten zur Eigenschaftsentwicklung von UHFB, zunächst vor allem an der Referenzmischung M2Q, sowie die Überprüfung der Anwendbarkeit von Werkstoffgesetzen, die für normal- und hochfesten Beton entwickelt wurden. Die bislang durchgeführten Untersuchungen zur Anwendbarkeit bekannter Werkstoffmodelle für die hydratationsgradabhängige Beschreibung der Druck- und Zugfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls sowie des Aktivierungsenergie-Konzeptes nach Freiesleben/Hansen/Pedersen lassen deren Eignung auch für UHFB erwarten.

Die Messung der zeitabhängigen Verformungen wird mit einem am iBMB entwickelten Messsystem durchgeführt, mit dem unmittelbar nach Überschreiten des Zeitpunkts t_0 , dem Beginn von Festkörpereigenschaften, bereits erste Verformungswerte gemessen werden können. So werden die innerhalb weniger Stunden sich entwickelnden autogenen Verformungen von bis zu 0,5 mm/m zuverlässig messbar. Klärungsbedarf besteht noch hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit der zeitabhängigen Verformungen. Nach den bisherigen Ergebnissen wirkt sich eine erhöhte Temperatur günstig auf das autogene Schwinden der untersuchten UHFB-Mischung aus. Die altersabhängige Wärmedehnzahl α_t wird durch Überlagerung eines isothermen Referenzversuchs mit einem sägezahnartigen Temperaturprofil (isotherme Basistemperatur $\pm 5^\circ\text{C}$) ermittelt. Die Versuche orientieren sich an den Versuchen nach Bjøntegaard und Hedlund. Die genaue Kenntnis der zeitabhängigen Wärmedehnzahl ist unabdingbar für jede Berechnung eines Spannungsaufbaus in Bauteilen infolge des Lastfalls Temperatur.

Für die experimentelle Bestimmung des Hydratationsgrades wurden adiabatische Kalorimeterversuche und eine modifizierte Berechnung nach DAfStb-Heft 520 verwendet. Der Hydratationsgrad α von UHFB zeigt verglichen mit dem normalfester Betone einige Unterschiede. Aufgrund des niedrigen Wasser-Zement-Werts ist bei der untersuchten M2Q-Mischung ein maximaler Hydratationsgrad α_U von 0,55 erreichbar. Dieser aus den Versuchen gewonnene Wert deckt sich sehr gut mit Ergebnissen aus der Literatur (z. B. von Waller und van Breughel) für hochfesten Beton. Die Berechnung der Aktivierungsenergie erfolgte nach dem Ansatz von Freiesleben, Hansen und Pedersen. Hierfür wurden adiabatische Kalorimeterversuche mit Frischbetontemperaturen von 10°C , 20°C , 30°C und 35°C durchgeführt. Erste Auswertungen zeigen, dass der Ansatz von Freiesleben, Hansen und Pedersen gute Ergebnisse zur Abschätzung der Aktivierungsenergie liefert.

In der zweiten Förderperiode werden entsprechende Versuche an der Referenzmischung B4Q, UHFB mit reduziertem Bindemittelgehalt (Projekt He 3217/6-2), sowie an UHFB mit schwindreduzierenden Polymeren SAP (Projekt Me 2938/4-1) durchgeführt. Damit liegt dann ein ausreichender Datenfundus zur zeitlichen Entwicklung der Kurzzeiteigenschaften und des zeitabhängigen Verformungsverhaltens für jungen UHFB für diejenigen Mischungen vor, die aus dem SPP 1182 für Anwendungen hervorgehen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in konstitutive Stoffmodelle zur Beschreibung der mechanischen Kurzzeiteigenschaften (Druck- und Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul), des Kriechens und autogenen Schwindens im jungen Alter integriert.

8.3.2 Versuchstechnische Ermittlung und mathematische Beschreibung der mehraxialen Festigkeit von ultrahochfestem Beton (UHFB)

(Prof. Dr.-Ing. M. Curbach, TU Dresden)

In der ersten Förderperiode wurde das Verhalten von UHFB unter zweiachsender Druckbeanspruchung untersucht. Die Versuche wurden in einem einteiligen Prüfrahmen mit je einem Hydraulikzylinder je Belastungsachse durchgeführt. Die proportionale Belastung der Würfel mit einer Kantenlänge von 10 cm wurde mit einer kombinierten Weg- und Kraftsteuerung gewährleistet. Für die Lasteinleitung wurden Belastungsbürsten verwendet, um die Behinderung der Querdehnung und ein Mittragen der Belastungseinrichtung in Querrichtung zu minimieren. Die Dehnung wurde direkt über Dehnmessstreifen auf der freien Oberfläche und indirekt über die Bürstenverformungen gemessen. Bisher wurden ein Feinkornbeton und vier Grobkornbetone mit unterschiedlichen Faserzusätzen untersucht. Die Zylinderdruckfestigkeiten nach 28 Tagen lagen zwischen 150 und 170 N/mm^2 . Die Probekörper wurden 14 Tage im Wasser gelagert und anschließend bis zur Prüfung bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte. Besonders bei dem Feinkornbeton wurde eine überwiegend horizontale Aus-

richtung der Stahlfasern festgestellt, die zu einer Anisotropie im Materialverhalten führte. Aus diesem Grund wurde der gesamte Druckquadrant im zweiaxialen Spannungsraum untersucht. Neben den einaxialen Druckfestigkeiten wurden bei großen Serien neun und bei kleinen Serien fünf zweiaxiale Spannungsverhältnisse mit in der Regel drei Einzelversuchen geprüft. Der Schwerpunkt lag auf dem Spannungsverhältnis $\sigma_2/\sigma_1 = 1$, für das sechs Einzelversuche durchgeführt wurden.

Beim UHFB mit 2,5 Vol.-% Fasern überstieg die zweiaxiale Festigkeit die einaxiale um 7 bzw. 10 %. Bei den Betonen mit 1,25 Vol.-% und weniger Fasern lag sie sogar geringfügig unter der einaxialen. Bei der Bemessung von UHFB müssen somit die vom Normalbeton bekannten Berechnungsansätze, die eine Festigkeitssteigerung unter mehraxialer Druckbelastung voraussetzen, überprüft werden. Für die Beschreibung der Bruchkurve kann nach jetzigem Erkenntnisstand eine Modifikation des Bruchkriteriums nach Ottosen als eine gute Näherung empfohlen werden.

UHFB verhält sich unter zweiaxialer Druckbeanspruchung ähnlich spröde wie unter einaxialer, nur im Bereich des Spannungsverhältnisses $\sigma_2/\sigma_1 = 1$ zeigt er ein etwas weniger sprödes Verhalten als bei unterschiedlich großen Druckkomponenten. Der Verlauf der Dehnungen ist grundsätzlich etwas duktiler als der Verlauf der Stauchungen. Bei gleichem Fasergehalt verhält sich der Feinkornbeton spröder als der Grobkornbeton. Der Grobkornbeton zeigt mit abnehmendem Fasergehalt ein zunehmend spröderes Verhalten. Beim faserfreien Beton verlaufen die Dehnungskurven nahezu linear bis zum schlagartig auftretenden Bruch. Zur Abbildung der Schädigung bis hin zum Bruch wird vorgeschlagen, die Abnahme der E-Moduli bzw. die Zunahme der Querdehnzahlen mit Ansätzen von SARGIN und Ottosen zu beschreiben. Die herstellungsbedingte Anisotropie wird über den Ansatz von zwei verschiedenen E-Moduli und zwei verschiedenen Querdehnzahlen berücksichtigt. Diese können aus der Verteilung der Fasern abgeleitet werden. Die Beschreibung der Schädigung berücksichtigt die lastinduzierte Anisotropie, indem der Steifigkeitsabfall getrennt für die Belastungsrichtung und die Richtung quer dazu beschrieben wird.

Die Versuche haben gezeigt, dass sich UHFB in vielen, zum Teil sicherheitsrelevanten Bereichen anders verhält als Normalbeton. Für eine umfassende Beschreibung des Tragverhaltens sind weitere Versuche unter dreiaxialer Druckbelastung und kombinierter Druck-Zug-Belastung notwendig. Der aktuelle Stand der Forschungen und Veröffentlichungen zu diesem Projekt kann unter www.tu-dresden.de/biwi/b/mbau/forschung/uhpc.html eingesehen werden.

8.3.3 Zum Tragverhalten von UHFB mit Kombination aus Faser- und Stabstahlbewehrung unter Zugbeanspruchung

(Prof. Dr.-Ing. E. Fehling, Universität Kassel)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte das Tragverhalten von UHFB-Zugkörpern, die mit einer Kombination aus Stabstahl und Stahlfasern bewehrt sind, experimentell und theoretisch untersucht werden. Im Mittelpunkt stand neben dem Last-Verformungs-Verhalten (Steifigkeit) besonders die Entwicklung der Rissabstände und der Rissbreiten im elastischen Verformungsbereich der Stabbewehrung (Gebrauchszustand). Grundlage für das Zusammenwirken von Betonmatrix und Bewehrung bildet der Verbund. Pull-Out-Versuche zum Verbundverhalten von UHFB lieferten eine gute Übereinstimmung mit Untersuchungen von Weiße und Jungwirth. Hohe Verbundspannungen von bis zu 60 N/mm² konnten bestätigt werden. Ein sprödes Verbundversagen durch Längsrisse konnte bei geringer Betondeckung festgestellt werden. Sonst war das Ausziehverhalten auch bei faserfreien Proben duktil. Abhängig von der Rippengeometrie des Stabstahls stellte sich ein steifes (erhabene Rippung) oder weiches (tiefe Rippung) Verbundverhalten ein.

Zur wirklichkeitsnahen Beschreibung des Last-Verformungs-Verhaltens und der Rissbildung wurde der durch autogenes Schwinden bewirkte hohe innere Zwang zwischen Beton und Bewehrung berücksichtigt. Auch wurde die Spannungs-Dehnungs-Beziehung eines Stahlbetonstabes für diesen Fall erweitert.

Die mechanischen Eigenschaften des Faserbetons hängen ganz wesentlich von der Verteilung und Orientierung der Fasern ab. Eigene Zugversuche haben gezeigt, dass ihre Wirksamkeit mit steigendem Fasergehalt nur unterproportional wächst. Bei der Modellierung wurde an der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung zur Beschreibung des Last-Verformungs-Verhaltens festgehalten. Aufbauend auf der Arbeit von Pfyl wurde ein eigenes mechanisches Modell entwickelt, das die Rissmechanik des Stahlbetons und das Spannungs-Rissöffnungs-Verhalten des Faserbetons unter Beachtung des Gleichgewichts der Kräfte und der Verträglichkeit der Verformungen verknüpft. Sie erlauben auch die Berücksichtigung des Schwindeinflusses auf den Rissprozess.

Berechnungen mit dem Modell zeigten, dass die Lastaufteilung zwischen Stabstahl und Fasern maßgeblich von der Bewehrungskonfiguration bestimmt wird. Weiterhin konnte entgegen den Ansätzen in den derzeitigen Regelwerken (DBV, DAfStb) gezeigt werden, dass die Faserwirksamkeit zur Begründung einer konstitutiven Spannungs-Dehnungs-Linie allein nicht ausreicht, da isoliert ermittelte Arbeitslinien mit starren Verformungsgesetzen gegen die Verträglichkeit der Verformungen verstoßen. Das entwickelte mechanische

Modell wurde dann durch Versuche an UHFB-Zugkörpern validiert. Anschließend wurden ein praxisgerechtes Verfahren zur Begrenzung der Rissbreite von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem UHFB abgeleitet und Anhaltspunkte für die Faserauswahl erarbeitet.

Die Auswirkungen einer biaxialen Druck-Zug-Beanspruchung auf die Druckfestigkeit des gerissenen UHFB wurden in Bauteilversuchen an faserfreien und faserbewehrten Stahlbetonscheiben untersucht. Generell konnte an Scheiben mit Faserbewehrung ein feineres Rissbild und duktileres Versagen beobachtet werden. Die bisherigen Auswertungen haben gezeigt, dass Störwirkungen der Stabbewehrung durch Fasern weitgehend unterdrückt werden. Zusammen mit einer wegen der kleinen Rissbreiten selbst bei großen Zugdehnungen wirksamen Rissverzahnung nahm bei faserbewehrten Scheiben die Druckfestigkeit weniger stark ab. Die Ergebnisse stimmen mit denjenigen von normalfesten faserbewehrten Stahlbetonscheiben qualitativ nahezu überein.

Erste Ansätze für die Abminderung der UHFB-Matrixdruckfestigkeit in Abhängigkeit einer quer zur Druckbeanspruchung aufgetragenen Zugbeanspruchung wurden erarbeitet. Eine abschließende Empfehlung eines Abminderungsfaktors kann erst nach der vollständigen Auswertung aller Versuchsergebnisse gegeben werden.

8.3.4 Beständigkeit von UHFB gegenüber chemischem Angriff

(Prof. Dr.-Ing. L. Franke, Dr.-Ing. G. Deckelmann, TU Hamburg-Harburg)

Ziele des Forschungsvorhabens sind die Untersuchung und Charakterisierung des Verhaltens von ultrahochfesten Betonen gegenüber chemischen Angriffen. Dazu wurden unter anderem vergleichende experimentelle Untersuchungen mit einem Normalmörtel (CEM I HS-NA, w/z = 0,45, B:G = 1:3) und wärmebehandelten UHFB ohne Stahlfasern durchgeführt.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten UHFB-Mischungen M2Q und B4Q gegenüber chemischen Angriffen eine erhöhte Beständigkeit im Vergleich zu normal- und hochfestem Beton aufweisen. Untersucht wurden lösende Angriffe durch Schwefel- und Milchsäure sowie ammoniumhaltige Wässer und treibende Angriffe durch sulfathaltige Wässer.

Ferner wurden die maßgebenden Stoff-Transportkoeffizienten in der Baustoffmatrix durch experimentelle Untersuchungen und theoretische Betrachtungen mit Hilfe von Diffusionsversuchen im elektrischen Feld bestimmt.

Auf der Basis der experimentellen Ergebnisse entsteht eine Datenbasis für die genauere numerische Simulation des Verhaltens von UHFB gegenüber aggressiven Medien, mit deren Hilfe das Baustoffverhalten vorhergesagt und dadurch weiter optimiert werden kann.

Offen bleibt unter anderem die Frage der Übertragbarkeit auf andere UHFB-Mischungen, insbesondere auf solche mit hohem Hüttensand- und Flugascheanteilen. Möglicherweise ergibt sich auch eine veränderte Beurteilung der Beständigkeit bei nicht konstanten Medien- und Feuchteeinwirkungen mit zwischengeschalteten Trocknungsabschnitten auf den Baustoff, was somit noch zu klären ist.

8.3.5 Erhöhung der Duktilität von UHFB durch die Kombination von Fasern und nanoskalierten Partikeln

(Prof. Dr.-Ing. P. Grübl, Dr. rer. nat. O. Kroggel, Prof. Dr. rer. nat. J. J. Schneider, TU Darmstadt)

Ziel des Forschungsvorhabens war es, durch den Einbau verschiedener Fasern und gezielt hergestellter Nanomaterialien die Duktilität des sonst sehr spröden UHFB zu erhöhen. Hergestellt wurden nanostrukturisiertes Molybdänoxid (MoO_3), Zinkoxid (ZnO), verwendet wurden zudem Kohlenstoffnanoröhren mit einem Durchmesser von 10–100 nm und Polymerfasern aus PVA mit einem Durchmesser von rd. 100 μm . Mit diesen Zusätzen wurden UHFB-Mörtel hergestellt. Bei der Dotierung mit Zink steifte der Beton schneller an und es bildete sich Ettringit, teilweise traten bei Wasserlagerung Risse auf. Eine wirksame Menge an 10 mm langen PVA Fasern ließ sich mit einem Intensivmischer ausreichend gleichmäßig in den Beton einmischen. Die Herstellung ausreichend homogener und leicht verarbeitbarer Betone war mit einem Wellenmischer nicht möglich. Die Druck- und Biegezugfestigkeit gesondert hergestellter dotierter Probekörper war insgesamt geringer als ohne Zusätze. Messungen an zugbeanspruchten Prüfkörpern, die aus Zylindern herausgearbeitet wurden, ergaben bei UHFB mit Gemischen aus Stahl- und PVA-Fasern eine deutliche Verbesserung der Duktilität im Nachbruchbereich. Bei PVA-Fasern allein war der Effekt gering. Bei Druckbeanspruchung wurde eine rissbedingte Krümmung der ansteigenden Spannungs-Verformungs-Kurve bei Stahlfasern bei etwa 98 % der Höchstspannung, bei PVA-Fasern bei etwa 96 % festgestellt. Bei einem Fasermix Stahl/PVA wurden entsprechende Effekte bei rd. 85 % und bei 99 % der Höchstlast gemessen.

8.3.6 Ermüdung von UHFB unter ein- und mehraxialer Beanspruchung

(Prof. Dr.-Ing. J. Grünberg, Prof. Dr.-Ing. L. Lohaus, Leibniz-Universität Hannover)

Die besonderen Eigenschaften von ultrahochfestem Beton (UHFB) gegenüber normalfestem Beton erfordern für numerische Analysen die Entwicklung eines mehraxialen mechanischen Modells. Für ultrahochfesten Beton sind die traditionellen Versagensmodelle nur bedingt anwendbar. Aus diesem Grund wurde das Dreiphasenmodell herangezogen und für UHFB weiterentwickelt. In diesem Modell für UHFB werden sowohl sprödes als auch duktiler Baustoffverhalten durch charakteristische Verläufe der Hauptmeridiane, insbesondere des Druckmeridians der Bruchumhüllenden beschrieben. Die anisotrope Ermüdungsschädigung wird im Hauptspannungsraum durch unterschiedliche Schädigungsraten für den Zug- bzw. Druckmeridian berücksichtigt.

Zur Bestimmung der notwendigen Parameter für das Dreiphasenmodell werden die im Folgenden beschriebenen umfangreichen ein- und mehraxialen experimentellen Untersuchungen durchgeführt.

Die im Forschungsvorhaben durchgeführten einaxialen Kolbenweg-geregelten Versuche zeigten, dass eine Faserverstärkung mit glatten, hochfesten Mikrostahlfasern keinen wesentlichen Einfluss auf die statische Druckfestigkeit hat. Ebenfalls konnte eine ausreichende Duktilitätssteigerung im Nachbruchbereich durch Zugabe der genannten Stahlfasern bei einem Fasergehalt von 2,5 Vol.-% nicht zuverlässig festgestellt werden.

Die einaxialen Ermüdungsuntersuchungen des Druckschwellbereiches ergaben, dass für ultrahochfesten Beton eine lineare Regression möglich ist.

Der bei Normalbeton bekannte Schädigungsverlauf kann für UHFB im einaxialen Fall anhand der Zunahme der irreversiblen Stauchungen und der Abnahme der Steifigkeit bestätigt werden. Aufgrund des spröden Materialverhaltens konnte eine Verkürzung der Phasen I und III bei UHFB jeweils auf ca. 3 %–5 % der Bruchlastspielzahl beobachtet werden.

Werden die rotationssymmetrischen Beanspruchungszustände in der Hauptmeridianspannungsebene betrachtet, so ergibt sich nach dem Dreiphasenmodell für höhere hydrostatische Drücke (oberhalb der einaxialen Festigkeit) ein Übergangsbereich, in dem sich der Druckmeridian zur hydrostatischen Achse krümmt. Daran schließt nach dem Dreiphasenmodell ein linearer Verlauf des Druckmeridians für hohe hydrostatische Drücke an. Aktuelle Versuchsergebnisse für mehraxiale Beanspruchungen (Längsdruck mit rotationssymmetrischem Querdruck) bestätigen den dreiphasigen Druckmeridianverlauf.

Mit zunehmender Querdruckbeanspruchung wird das Nachbruchverhalten des UHFB maßgeblich verändert. Im Vergleich zum spröden Versagen unter einaxialer Beanspruchung zeigt sich infolge Querdruckbeanspruchung ein signifikant duktiler Materialverhalten mit deutlich größeren Bruchdehnungen. In einem ausgeprägten Übergangsbereich, der etwa bei der einaxialen Festigkeit beginnt, treten Mischbrüche auf.

8.3.7 Vorgespannte Träger mit und ohne Stegöffnungen aus ultra-hochfestem Beton

(Prof. Dr.-Ing. J. Hegger, RWTH Aachen)

Im Rahmen der ersten Antragsphase wurden experimentelle Untersuchungen wie Pull-Out-, Spannkrafteinleitungs- und Querkraftversuche durchgeführt. Die Versuche wurden hinsichtlich des Verbundverhaltens, der Mindestabmessungen und der Querkrafttragfähigkeit ausgewertet. In der restlichen Laufzeit der ersten Phase werden noch vier Querkraftversuche, weitere Versuchsauswertungen und die Entwicklung von konstitutiven Modellen durchgeführt. Erste Finite-Elemente-Modelle wurden entwickelt, konnten allerdings nicht in der ersten Phase vertieft bearbeitet werden. Die Erstellung einer Datenbank in der zweiten Phase ist erforderlich, um die abgeleiteten Modelle zu verifizieren. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen erfordern weitere Untersuchungen zum Einfluss des Auflagerüberstandes und zur Spannkrafteinleitung. Träger mit Öffnungen wurden entsprechend den Hinweisen der Gutachter in der ersten Phase noch nicht durchgeführt.

8.3.8 Zur Wirkungsweise von Verbundmitteln in Verbundkonstruktionen aus ultrahochfestem Beton

(Prof. Dr.-Ing. habil. N. V. Tue, Prof. Dr.-Ing. J. Hegger, Universität Leipzig, RWTH Aachen)

Mit der Verwendung von ultrahochfestem Beton in Kombination mit normal- und hochfestem Stahl können im Verbundbau die Querschnittsabmessungen und somit das Eigengewicht reduziert werden. Hierdurch können ansprechende filigrane und tragfähige Konstruktionen entworfen werden. Um die hohe Tragfähigkeit dieser Konstruktionen zu nutzen, sind Verbundmittel mit hoher Tragfähigkeit und ausreichender Duktilität erforderlich.

In der ersten Antragsphase stand bei den Untersuchungen beider Forschungsstellen das Trag- und Verformungsverhalten von Verbundmitteln in ultrahochfestem Beton im Vordergrund. Ziel war es, die wesent-

lichen Einflussfaktoren zu beschreiben und zu quantifizieren. Ein weiterer Schwerpunkt war die Überprüfung der plastischen Momententragfähigkeit von verschiedenen Verbundträgerquerschnitten. Das Trag- und Verformungsverhalten von Verbundmitteln in einem UHFB-gefüllten Stahlrohr wurde anhand von Push-Out-Versuchen ermittelt.

Zum Last-Schlupf-Verhalten unterschiedlicher Verbundmittel wurden bisher 44 Push-Out-Versuche und 21 Rohr-Push-Out-Versuche durchgeführt. In Leipzig wurden als Verbundmittel Lochleisten und Betonstahldübel, in Aachen Puzzleleisten und Sägezahnprofile eingesetzt. Den Ergebnissen zufolge sind kontinuierliche Verbundmittel aufgrund ihrer hohen Anfangssteifigkeit und Traglast gut geeignet, um den Verbund zwischen Stahl und UHFB sicherzustellen. Hohe Fasergehalte lieferten hierbei allerdings nicht den erwarteten Beitrag zur Steigerung der Duktilität und Tragfähigkeit. Wesentlich effektiver ist die Anordnung von Betonstahl in Verbindung mit einem Mindestfasergehalt.

Zur Untersuchung des globalen Trag- und Verformungsverhaltens waren 8 Trägerversuche im positiven und negativen Momentenbereich geplant. Bei den Trägerversuchen wurden die favorisierten Verbundmittel der Push-Out-Versuche (Leipzig: Lochleiste, Aachen: Puzzleleiste) eingesetzt. Im positiven Momentenbereich versagte bei allen Trägern die Betondruckzone, das plastische Moment wurde bei fast allen Versuchen erreicht. Ein Versagen der Verbundmittel wurde nicht festgestellt.

Der Einfluss eines mehraxialen Spannungszustandes auf das Trag- und Verformungsverhalten von Verbundmitteln wurde in Push-Out-Versuchen an UHFB-gefüllten Stahlrohren untersucht. Zur Entwicklung eines Anschlussdetails zwischen Fachwerkstäben und Untergurt eines Fachwerkträgers wurden erste Push- bzw. Pull-Out-Versuche unter einem Winkel von 45° und 90° durchgeführt. Die umschnürten Betondübel erreichten hohe Tragfähigkeiten und eine ausreichende Duktilität. Die wesentlichen Einflussgrößen sind Anzahl und Größe der Öffnungen im einbetonierten Stahlblech. Bei den Rohrknoten-Versuchen war die Tragfähigkeit der Dübel größer als die des verwendeten Stahlblechs und es kam daher zum Stahlversagen.

Die wesentlichen Aspekte der zweiten Förderphase sind ergänzende Versuche und numerische Parameterstudien mit nichtlinearen FE-Modellen sowie daraus abgeleitete Ingenieurmodelle zur Beschreibung des lokalen Tragverhaltens der Verbundmittel in UHFB und des globalen Last-Verformungs-Verhaltens von Verbundträgern. Darüber hinaus sollen die Grundlagen für die Entwicklung von filigranen Hybridkonstruktionen geschaffen werden.

8.3.9 Betone mit verminderten Gehalten an energieintensiven Bindemitteln

(Prof. Dr.-Ing. D. Heinz, TU München)

Das Projekt „Bindemitteloptimierung“ verfolgt das Ziel, den hohen Anteil der energieintensiv hergestellten Komponente Portlandzementklinker im ultrahochfesten Beton zu reduzieren. Dabei sollen die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und das hohe Niveau der 28d-Festigkeiten des Festbetons von über 200 N/mm² nach einer Wärmebehandlung aufrechterhalten werden.

Ein Schwerpunkt war der Austausch eines Teils des Zementgehaltes durch Hüttensandmehl (HüS). Es konnte gezeigt werden, dass der Zementaustausch durch Hüttensandmehl den Wasser- und Fließmittelan-spruch der Mischungen verringert. Bei der Anwendung verschiedener Fließmittel wurde festgestellt, dass Fließmitteldosierung und -typ einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung haben. So konnten bei geeigneter Stoffauswahl mit nur noch 25 % Zement und 75 % HüS nach der Wärmebehandlung Festigkeiten von über 200 N/mm² erzielt werden. Die Erhöhung der Feinheit des eingesetzten HüS führte zu einer Festigkeitssteigerung gegenüber den Mischungen mit HüS-Zementähnlicher Feinheit.

In einem weiteren Untersuchungsabschnitt wurde ermittelt, wie sich der vollständige Ersatz des Quarzmehles als weitgehend inerte Komponente durch reaktives Hüttensandmehl auf die Druckfestigkeit auswirkt. Das Hüttensandmehl ergab einen Festigkeitsbeitrag bei 20 °C, allerdings erst nach 28 Tagen Hydratationsdauer. Es wurde eine deutliche Nacherhärtung auch der wärmebehandelten Proben vom 28. bis zum 56. Tag beobachtet.

Der Einfluss des teilweisen Austausches von Zement durch Feinstzement bei gleichzeitiger Reduzierung der Gesamtzementmenge wurde ebenfalls untersucht. Durch den Einsatz des Feinstzementes ($d_{50} = 2,3 \mu\text{m}$) nach dem bisherigen Konzept nahmen die 28d-Festigkeiten stark ab. Auch konnte durch den hohen Eintrag sehr feiner Stoffe in die Mischungen die gewünschte Verarbeitbarkeit nicht gewährleistet werden.

Als zielführende Vorgehensweise hat sich der Einsatz von Kalkhydrat als Bindemittelkomponente herausgestellt. Dabei wird der Zementgehalt reduziert und die dadurch geminderte Menge an CSH-Phasen durch die Reaktion von Kalkhydrat mit Mikrosilica kompensiert. Erste Untersuchungen zeigen in Bezug auf Verarbeitbarkeit und Festigkeit nach Wärmebehandlung sehr viel versprechende Ergebnisse mit Potenzial zur weiteren Optimierung.

Grundlage für die Entwicklung optimierter Rezepturen war zunächst die Charakterisierung des Hydratationsverlaufes der Ausgangsmischung, die der UHFB-Referenzmischung des Schwerpunktprogrammes entspricht. Es wurde festgestellt, dass sich das Quarzmehl auch bei der 90 °C Wärmebehandlung nicht signifikant an den Hydratationsreaktionen beteiligte. Auch konnte nachgewiesen werden, dass trotz der Verfügbarkeit von unreaktiertem Mikrosilica in den wärmebehandelten Proben noch Portlandit vorlag. Mikrosilica lag nach 28 Tagen bei wärmebehandelten noch zu 34 % und bei nicht wärmebehandelten Proben zu 72 % unreaktiert vor. Es kommt nicht nur während der Wärmebehandlung, sondern auch danach noch bis zum 7. Tag zu erhöhten Neubildungen an Hydratphasen. Nach 28 Tagen liegen immer noch ca. 70 % der Silikatphasen des Klinkers unreaktiert im ultrahochfesten Beton vor.

Bei den Untersuchungen wurde bei der Ausgangsmischung und bei den hüttensandhaltigen Mischungen (Austausch eines Teil des Zementes durch Hüttensandmehl) eine Abnahme der zunächst nach der Wärmebehandlung erreichten Festigkeiten bei weiterer Lagerung festgestellt. Die Untersuchungen zeigten, dass die Abnahme der Festigkeit vom H₂S/Zement-Verhältnis und vom Zementgehalt abhängt. Eine Klärung der Mechanismen des Festigkeitsverlustes steht noch aus.

8.3.10 Charakterisierung der UHFB-Mikrostruktur in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung und deren Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und Dauerhaftigkeit (Dr. rer. nat. B. Möser, Bauhaus-Universität Weimar)

Im Rahmen der ersten Förderperiode des Forschungsvorhabens wurden zwei Schwerpunkte bearbeitet. Mittels Elektronenmikroskopie sollte ein grundlegendes Verständnis für die Hydratationsprozesse bei der Erhärtung von UHFB gewonnen werden. Weiterhin wurde mit einem in Weimar entwickelten Klimawechsel-lagerungsprogramm die Dauerhaftigkeit evaluiert.

Die Voruntersuchungen der Ausgangsstoffe haben gezeigt, dass schon geringfügige Schwankungen des Zementes im Alit-, Aluminat- und Sulfatträgergehalt einen signifikanten Einfluss auf die Fließmitteldosierung und die Verarbeitungseigenschaften haben. Eine zielsichere Herstellung von UHFB ist nur bei konstanter Rohstoffqualität gewährleistet. Die mikrostrukturellen Untersuchungen der UHFB-Referenzmischung M2Q zeigten, dass nach einer Reaktionszeit von 18 Stunden C-S-H-Phasen mit einer Länge von 100–200 nm sichtbar sind. Außerdem konnte eine vollständige Auflösung von Alitklinkerkörnern mit einer Größe von bis 2 µm festgestellt werden. Die in der Bindemittelmatrix entstandenen Hohlräume werden im weiteren Hydratationsprozess nicht mehr durch Hydratneubildungen bzw. Kristallwachstum geschlossen. Aufgrund der sehr dichten Kornpackung kommt es zu einer extrem starken Verzahnung und Rekristallisation der C-S-H-Phasen. Dies führt dazu, dass sich das Gefüge elektronenmikroskopisch nur durch eine Kontrastoptimierung bei niedrigen Anregungsenergien und hoher Auflösung noch detailliert darstellen lässt (Anwendung Nova NanoSEM). Als weiterer Forschungsschwerpunkt galt es zu untersuchen, welche Gefügeunterschiede sich zwischen der wärmebehandelten und wassergelagerten Proben ergeben. Es konnte beobachtet werden, dass die Wärmebehandlung im Vergleich zur Wasserlagerung im frühen Hydratationsstadium zu einer deutlich dichteren Bindemittelmatrix führt. Neuste Ergebnisse der quantitativen Röntgenphasenanalyse belegen, dass die Hydratation bereits nach der Wärmebehandlung weitgehend abgeschlossen ist, bei den wassergelagerten Proben ist dies nach einer Reaktionszeit von ca. 7 Tagen der Fall. Trotz Wärmebehandlung erfolgt jedoch keine vollständige Umwandlung des Calciumhydroxids mit Silicastaub zu Calciumsilikatphasen. Auch nach einer Hydratationszeit von einem Jahr sind im Gefüge noch einzelne 15–20 µm große Portlanditaggregate und nicht vollständig umgesetzter Silicastaub zu sehen. Weiterhin führt die Temperaturbeaufschlagung durch die Wärmebehandlung zu einer verstärkten Reaktion der Ferritphase. Dies äußert sich in der massiven Bildung von Hydrogranaten, die besonders da deutlich zu sehen sind, wo sich die umliegenden Calciumsilikatphasen aufgelöst haben. Die Untersuchungen der isothermen Wärmeleitungs-kalorimetrie an Bindemittel-Fließmittel-Systemen zeigen, dass die zur Verflüssigung von UHFB notwendigen hohen Fließmitteldosierungen zu einer starken Verzögerung der Hydratation führen. Durch die Zugabe von Feinstoffen (Silicastaub, Quarzmehl) kann diese zeitliche Verzögerung teilweise reduziert werden.

Durch eine unzureichende Homogenisierung des Silicastaubes, der nicht als Slurry, sondern als Trockenkomponente dem UHFB zugegeben werden muss, kam es sowohl in wärme- als auch wassergelagerten Proben zur Ausbildung einer AKR, die allerdings aufgrund des geringen w/z-Wertes nur partiell abläuft. Die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen in der Klimasimulationskammer lassen erkennen, dass alle untersuchten ultrahochfesten Betone bisher keine als schädigend eingestuft Dehnungswerte von 0,4 mm/m aufweisen. Dies trifft auch auf die vorgeschädigten Probekörper mit vorausgegangener Wärmebehandlung zu, an denen eine sekundäre Ettringitbildung in den Mikrorissen mit einer Rissweite unterhalb 10 µm nachgewiesen wurde. Mit dem für die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen angewandten Klimasimulationsprogramm kann somit bis zum jetzigen Zeitpunkt (max. 428 Tage) an Proben mit nachgewiesener sekundärer Ettringitbildung und AKR kein negativer Einfluss auf die Dauerhaftigkeit festgestellt werden.

Seit kurzem ist durch Einsatz eines hochauflösenden Rückstreuelektronendetektors am ESEM-FEG die Möglichkeit gegeben, auch an angeschliffenen UHFB-Proben eine Phasendifferenzierung bezüglich der mittleren Ordnungszahl einzelner Gefügebestandteile durchzuführen. Es konnten somit erstmals nanometer-große Mikrosilikakugeln am Anschluss im hochdichten Bindemittelgefüge von UHFB hochaufgelöst abgebildet werden. Die in diesen Abbildungen selektiv bzgl. ihrer unterschiedlichen mittleren Ordnungszahl detektierten Gefügebestandteile können jetzt in Verbindung mit der Elementanalyse als Grundlage für die quantitative Phasenanalyse dienen.

8.3.11 Materialgesetze für das Spannungs-Dehnungs-Zeitverhalten von ultrahochfestem Beton

(Prof. Dr.-Ing. H. Müller, Universität Karlsruhe)

Im vorliegenden Arbeitsbericht wurde der derzeitige Bearbeitungsstand des Forschungsprojekts „Materialgesetze für das Spannungs-Dehnungs-Zeitverhalten von ultrahochfestem Beton“ aufgezeigt.

Neben der Auswertung und Diskussion der bisher erzielten Ergebnisse wurde hierbei auch auf die für die Durchführung des umfangreichen Versuchsprogramms notwendigen Vorarbeiten eingegangen. Hierzu gehörten zahlreiche Tastversuche zur Einstellung der Rezeptur und des bei der Herstellung zu verwendenden Mischregimes sowie diverse Modifikationen bzw. Erweiterungen des in unserem Hause seit Jahren erfolgreich zur Erfassung von Kriech- und Schwindverformungen eingesetzten Messsystems.

Die eigenen Versuchsergebnisse bestätigen, wie auch erste Tastversuche anderer Forschergruppen, ein ausgeprägtes Kriech- und Schwindvermögen ultrahochfester Betone, das durch die entsprechenden Modelle in der derzeit gültigen Ausgabe der DIN 1045 nicht realitätskonform abgebildet werden kann. Eine Anpassung der bisher nur für normal- und hochfeste Betone gültigen Bemessungsnorm ist daher unverzichtbar.

Hauptziel dieses Forschungsprojekts ist jedoch nicht nur die einfache Modifikation der bestehenden linearen Bemessungsansätze durch die Einführung geeigneter Parameter, sondern primär die Entwicklung eines nichtlinearen Materialgesetzes, das das zeit- und lastabhängige Verformungsvermögen ultrahochfester Betone umfassend zu beschreiben vermag. Die damit verbundenen Tätigkeiten bilden einen Schwerpunkt in der 2. Förderperiode.

Die Entwicklung des neuen Materialgesetzes erfolgt auf Basis der eigenen Messdaten sowie ausgewählter Versuchsdaten weiterer Forschungsnehmer im Rahmen dieses Schwerpunktprogramms, die sich mit dem Kriechen von Beton unter Zugbeanspruchung bzw. dem Schrumpfen im sehr frühen Betonalter befassen. Des Weiteren wird das wissenschaftliche Schrifttum fortlaufend recherchiert, so dass die bereits im Hause vorhandene Datenbank während der gesamten Laufzeit des Schwerpunktprogramms beständig erweitert wird.

8.3.12 Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich

(Dr.-Ing. R. Niedermeier, TU München)

Es wurden experimentelle Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von UHFB bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich durchgeführt. Sie konzentrierten sich zunächst auf den baupraktisch relevanten Bereich, der durch die vermuteten Dauerfestigkeiten und Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit begrenzt wird. Insgesamt wurden 120 spannungsgeregelte, einstufige Wöhlerversuche durchgeführt. Die bisher erfolgte Auswertung erbrachte die folgenden wesentlichen Ergebnisse: UHFB zeigt im Zug-Druck-Wechselbereich ein günstigeres Ermüdungsverhalten als normalfester Beton (NSC); die Bruchlastspielzahlen liegen etwa um den Faktor 100 über den Werten für NSC, allerdings zeigen die Bruchlastspielzahlen von UHFB große Streuungen. Die Bruchlastspielzahl von UHFB kann durch die Zugabe von Stahlfasern etwa um den Faktor 10 verbessert werden und bewirken ferner einen Rückgang der Streuungen. Die für Beton bekannte Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit von der Unterlast und der Schwingbreite konnte bestätigt werden. In den einstufigen Wöhlerversuchen wurden teilweise sehr hohe Bruchlastspielzahlen erreicht bzw. die Versuche wurden nach 10^7 Lastwechseln ohne Ermüdungsversagen beendet. Für den Einsatz von UHFB in wechselbeanspruchten Bauteilen, z. B. vorgespannten Zugstäben, kann damit ein hinreichendes Ermüdungsverhalten festgestellt werden.

Im baupraktisch relevanten Bereich wurde unter den geprüften Wechselbeanspruchungen ein Bruchartwechsel vom Zugversagen zum Druckversagen beobachtet. In ersten Untersuchungen zum Schädigungsfortschritt wurde die Gültigkeit des bekannten Dreiphasenmodells für zyklisch im Zug-Druck-Wechselbereich beanspruchten UHFB grundsätzlich bestätigt; jedoch konnte eine relative Verkürzung der Phasen I und III der Rissentstehung und des instabilen Rissfortschritts beobachtet werden; die Phase II des stabilen Risswachstums ist deutlich ausgeprägt. Im Hinblick auf die Formulierung von Bemessungsmodellen für zyklisch im Zug-Druck-Wechselbereich beanspruchte Bauteile sollen im nächsten Schritt durch experimentelle Untersuchungen geklärt werden, wo die Grenzlinie im Goodman-Diagramm, die den Wechsel vom Zugver-

sagen zum Druckversagen beschreibt, verläuft und welchen Einfluss die Betonzusammensetzung auf das Ermüdungsverhalten von zyklisch im Zug-Druck-Wechselbereich beanspruchten UHFB hat, wie die Wöhlerlinien im Bereich der in der ersten Förderperiode als Durchläufer abgebrochenen Versuche ($N > 10^7$) verlaufen und welchen Einfluss die Belastungsgeschichte auf das Ermüdungsverhalten von Bauteilen aus UHFB hat bzw. wie die Schadensakkumulation bei mehrstufigen Belastungskollektiven beschrieben werden kann.

8.3.13 Schwindreduzierende Fließmittel für ultrahochfesten Beton

(Prof. Dr. J. Plank, TU München)

In der ersten Förderperiode wurden Polycarboxylat-Fließmittel der 1. und 2. Generation untersucht. Durch gezielte Variation der molekularen Struktur wurden eigenständig Fließmittel synthetisiert, die UHFB-Leime hervorragend verflüssigen. Die effektivsten Fließmittel werden derzeit für UHFB (Gesamtrezeptur) getestet. In der zweiten Förderperiode steht die Aufklärung des Wirkmechanismus der Fließmittel in diesen wasserarmen Betonen im Vordergrund. Die bisherigen Ergebnisse zeigen erhebliches Optimierungspotenzial, sowohl im Hinblick auf die notwendige Dosierung (Wirtschaftlichkeit), als auch auf eine Reduktion der verzögernden Wirkung. Da die Möglichkeiten der molekularen Verbesserung der 1. und 2. Generationen angereizt erscheinen, werden in der zweiten Förderperiode mit Amidoamino-Funktionalitäten modifizierte Polycarboxylat-Fließmittel sowie verschiedene „small molecule“-Fließmittel synthetisiert und getestet. Auf Basis des Wirkmechanismus können Molekülstrukturen entwickelt werden, die in UHFB-Leimen effektiv verflüssigen. Ziel dabei ist es, Dosierungen unter 1,0 M.-% bezogen auf Zement bei w/z-Wert 0,22 zu benötigen. Eine Abschätzung der Tauglichkeit von Fließmittelstrukturen, im Zusammenspiel mit anderen Zementen, soll bei genauer Kenntnis der ionischen Zusammensetzung des UHFB-Leimes in Zukunft möglich werden. Auch ist die Rolle des Mikrosilica sowie anderer Komponenten des UHFB in Bezug auf die Wirksamkeit der Fließmittel bislang nicht hinreichend aufgeklärt.

8.3.14 Untersuchungen zum Frost-/Frost-TaumittelWiderstand, dem autogenen Schwinden und der Gefügestruktur von UHFB

(Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. J. Setzer, Universität Duisburg-Essen)

Übergeordnetes Ziel des Forschungsvorhabens ist die Modellierung submikroskopischer Vorgänge zur Erklärung des makroskopischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Frost- und Frost-Taumittel-Belastung sowie die Erarbeitung einer soliden analytischen Methodik zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit für die praktische Anwendung von UHFB.

Im Rahmen der ersten Förderperiode sollte zunächst anhand der vom Koordinator vorgegebenen Basismischungen M2Q und B4Q und darauf aufbauender Variationen der Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand bestimmt und erste Aussagen zum Schädigungs- und Transportverhalten sowie Einflüssen aus autogenem Schwinden und der Gefügeentwicklung abgeleitet werden. Zusätzlich wurden verschiedene Zemente (Variation C3A-Gehalt, chem. Zusammensetzung) und unterschiedliche Fließmittel einbezogen. Die untersuchten Betone wiesen im Festbeton Luftgehalte zwischen 3 und 5 % auf. Untersucht wurden die zeitliche Entwicklung der Gefügestruktur mittels Hg-Druck und Helium-Pyknometer sowie die mittels CDF/CIF-Prüfung bestimmte Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit mit Variation der Nach- und Wärmebehandlung, sowie des Prüfalters. Darüber hinaus wurden Betonproben an 2 Teststationen in Ost- und Süddeutschland ausgelagert.

Die Gefügeentwicklung war bei wassergelagerten Proben bereits nach 14 Tagen weitgehend abgeschlossen, bei wärmebehandelten Proben, mit teilweise Porositätswerten unter 3 %, schon nach wenigen Tagen. Hinsichtlich der Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit zeigten die untersuchten Betone eine extrem hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber XF3-, XF4-Angriff. Trotz der im Vergleich zu Normalbeton niedrigeren Abwitterungsmenge von im Mittel 500 g/m² nach 56 bzw. 112 FTW traten stärkere lokale Abplatzungen der obersten Zementleimschicht um die Fasern herum auf. Hier bleibt zu klären, ob es sich eventuell um einen sekundären Effekt handelt. Bei den Mischungen M2Q, B4Q ließ sich bislang selbst nach 112 FTW keine innere Schädigung feststellen; die Feuchteaufnahme stagniert nach wenigen Frost-Tau-Wechseln, was dem Transportverhalten von LP-Betonen gleicht. Hier überlagern sich scheinbar sowohl Einflüsse aus der geringen gefrierbaren Wassermenge im Innern des Betons, als auch aus der Unterbrechung der Frostpumpe, bedingt durch den hohen LP-Gehalt der Mischungen. Lediglich bei Vorschädigung der Betone z. B. durch schärfere Wärmebehandlungsregime veränderte sich das Sättigungs- und Schadensverhalten signifikant, was zukünftig weiter untersucht werden soll. Bei den ausgelagerten Probekörpern wurden trotz anfänglich erkennbarer leichter Oberflächenrisse bislang keine Schädigungen nach 1 bzw. 2 Wintern festgestellt.

Mit den gewonnenen Daten lässt sich für die untersuchten UHFB-Mischungen ein äußerst hoher Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand nachweisen. Es ist damit möglich, erste Ansatzpunkte für die Lebensdauerbetrachtung von UHFB hinsichtlich Frost- und Frost-Tausalz-Angriff zu treffen. Das Transport- und Schädigungsverhalten kann damit allerdings noch nicht eindeutig beschrieben werden. Weitere Parameter, die bei der Abschätzung der Dauerhaftigkeit eine Rolle spielen können, wurden ebenfalls umrissen, konnten aber noch nicht vollständig geklärt werden.

Abgesicherte Aussagen zur Ausbildung der Gefügestruktur und der Frost-/Frost-Taumittel-Beständigkeit sind für die Modellierung der Transport- und Schadensmechanismen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen von elementarer Bedeutung. Nur mit dem Wissen, welches Risikopotenzial sich aus Veränderungen der Mischungszusammensetzung z. B. durch Bindemittelersatz, weitere Optimierung der Packungsdichte oder höhere Wärmebehandlungstemperaturen etc. auf die Dauerhaftigkeit ergibt, kann UHFB sicher unter einer XF3-, XF4-Exposition angewendet werden.

8.3.15 Optimierung des Mischprozesses ultrahochfester Betone

(Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. P. Schießl, TU München)

Ziel des Forschungsvorhabens war, ultrahochfesten Beton (UHFB) in kurzen Mischzeiten mit verbesserten Werkstoffeigenschaften zielsicher und vor allem reproduzierbar herzustellen. Zu diesem Zweck wurde der Einfluss von Mischzeit, Werkzeuggeschwindigkeit und Betonzusammensetzung auf den Mischprozess untersucht. Neben der Erfassung der Einflussgrößen wurde der Mischprozess ultrahochfester Betone optimiert. Für die Untersuchungen wurde ein 75 l-Intensivmischer mit variabel steuerbarer Werkzeuggeschwindigkeit (1 bis 20 m/s) eingesetzt. Zudem war es möglich, während des Mischvorgangs die elektrische Leistung am Mischwerkzeug zu erfassen und aufzuzeichnen.

Der Mischprozess von grobkörnigen ultrahochfesten Betonen ($d_{\max} = 8,0 \text{ mm}$) kann in drei Phasen eingeteilt werden. In der ersten Mischphase werden Wasser und Fließmittel gleichmäßig verteilt. Die Fließfähigkeit steigt kontinuierlich an. Dem schließt sich eine Phase mit optimalen Fließeigenschaften an. Durch weiteres Mischen nimmt die Fließfähigkeit wieder ab, was auf eine kontinuierliche Auflösung von Agglomeraten und einer daraus resultierenden Vergrößerung der Oberfläche zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu wurde bei feinkörnigen ultrahochfesten Betonen ($d_{\max} = 0,5 \text{ mm}$) auch bei Mischzeiten über 720 s kein Rückgang der Fließfähigkeit festgestellt. Durch die Erhöhung der Werkzeuggeschwindigkeit von 1,4 auf 2,9 m/s konnte die Mischzeit zum Erreichen optimaler Fließ- und Festigkeitseigenschaften inklusive Wasser- und Fließmittelzugabe von 240 s auf 120 s reduziert werden. Damit liegt die Mischzeit von faserfreien ultrahochfesten Betonen im Bereich üblicher Rüttelbetone. Eine Steigerung der Werkzeuggeschwindigkeit über 2,9 m/s führte zu keiner weiteren Verkürzung der Mischzeit.

Durch die systematische Variation der Betonzusammensetzung wurde ein Modellparameter zur Berechnung der minimal notwendigen Mischzeit bestimmt. Dieser wird als relative Feststoffkonzentration bezeichnet und berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen dem aktuellen Feststoffgehalt ϕ im Beton und dem maximal möglichen Feststoffgehalt $\phi_{\max}$ bei maximaler Packungsdichte des Feststoffgemischs. Der Modellansatz ermöglicht es zudem, gezielt einfach herstellbare ultrahochfeste Betone mit optimalen Frisch- und Festbetoneigenschaften zu entwickeln. Die Mischzeit von UHFB kann danach verringert werden wenn z. B.:

- der Wassergehalt erhöht und der aktuelle Feststoffgehalt ϕ verringert wird,
- der maximale Feststoffgehalt $\phi_{\max}$ durch optimale Kornzusammensetzung erhöht wird,
- ein Teil des Zements bzw. Quarzmehls durch feinere Stoffe wie z. B. Silicastaub ersetzt wird (Erhöhung des maximalen Feststoffgehalts).

Nach Kenntnis der Einflussgrößen wurde der Mischablauf optimiert. Die Mischzeit von UHFB konnte bei gleichzeitiger Fließmitteleinsparung weiter verkürzt werden, indem in der Anfangsmischphase bis zum Erreichen der maximalen Antriebsleistung des Mischwerkzeugs mit hoher Werkzeuggeschwindigkeit gemischt wurde, um Wasser und Fließmittel schnell zu verteilen. Die abschließende Homogenisierung erfolgte mit niedriger Werkzeuggeschwindigkeit. Durch das Anlegen eines Teilvakuums (50–100 mbar) in der letzten Mischphase (rd. 30 s) konnte der Frischbeton fast vollständig entlüftet werden und dadurch sowohl die Fließfähigkeit als auch die Druckfestigkeit signifikant erhöht werden. Mit dem fundierten Wissen über die Einflussgrößen auf das Mischen von UHFB konnte die Mischzeit bei verbesserten Werkstoffeigenschaften erheblich reduziert werden. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die wirtschaftliche Anwendung ultrahochfester Betone unter baupraktischen Bedingungen.

8.3.16 Nachhaltigkeitsanalyse von UHFB mit Hilfe von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

(Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. P. Schießl, TU München)

Ziel des vorliegenden Projekts ist es, die Abschätzung der herstellbedingten Umweltauswirkungen von mikrofaserverstärktem UHFB zu ermöglichen. Es müssen daher fehlende Rohdaten der Herstellprozesse ausgewählter Mischungsbestandteile von UHFB, wie z. B. Mikrostahlfasern und Fließmittel auf Basis von Polycarboxylat, ermittelt werden.

Ausgangspunkt war die Darstellung der durchschnittlichen Zusammensetzung von derzeit in der Forschung zum Einsatz kommenden ultrahochfesten Betonen auf Basis von 75 aus der Literatur entnommenen UHFB-Rezepturen. Die Auswertung dieser Rezepturen ergab, dass zur Herstellung von 1 m^3 UHFB im Durchschnitt 887 kg Quarzsand, 752 kg Zement, 242 kg Mikrostahlfasern, 184 kg Wasser, 173 kg Mikrosilika, 169 kg

Quarzmehl, 31 kg Hochleistungsfließmittel und 2 kg Polypropylen-Fasern benötigt werden. Durch die Darstellung der Ergebnisse konnte hervorgehoben werden, dass der Anteil energieintensiver Ausgangsstoffe wie Zement, Stahlfasern und Fließmittel bei UHFB im Gegensatz zu konventionellem Beton deutlich erhöht ist. Hieraus folgt die grundsätzliche Fragestellung, inwieweit das Potenzial des UHFB hinsichtlich einer nachhaltigen Umweltentlastung, resultierend aus den hervorragenden mechanischen Eigenschaften und dem dauerhaften Materialverhaltens durch den Verbrauch an energieintensiven Ausgangsstoffen gemindert wird.

Zur Abschätzung der herstellbedingten Umweltauswirkungen sind detaillierte Informationen zu den Herstellprozessen der Ausgangsstoffe notwendig. Diese liegen im Falle der mineralischen Ausgangsstoffe in verschiedenen Ökoinventaren vor. Für die Mikrostahtfaserherstellung und die Herstellung von Polycarboxylaten fehlen solche Informationen. Daher wurden die Herstellverfahren der beiden Stoffe hinsichtlich ihres Stoff- und Energiebedarfs detailliert charakterisiert. Im Anschluss an den jeweiligen Herstellprozess wurden entsprechende Rohdaten, die als Grundlage für die Ökobilanzierung von UHFB dienen, ausgearbeitet. Die Rohdaten wurden so aufbereitet, dass eine Modellierung der Herstellverfahren mit Hilfe der ecoinvent-Datenbank möglich ist.

Mit der Herstellung von 1 kg Mikrostahtfasern sind 2,67 kg CO₂-Äquivalent, $1,39 \cdot 10^{-7}$ kg R11-Äquivalent, $6,80 \cdot 10^{-4}$ kg C₂H₂-Äquivalent, 0,0140 kg SO₂-Äquivalent und 0,0010 kg PO₄³⁻-Äquivalent verbunden. Die Ergebnisse der Dominanzanalyse für die Herstellung der Mikrostahtfasern zeigen, dass die Teilprozesse der Elektrostahtherstellung und des Nassziehens mit rd. 15–52 % die größten Beiträge zu den Umweltauswirkungen leisten. Das Verseilen und das Warmwalzen tragen jeweils nur rd. 6–18 % bei. Die Beiträge der restlichen Teilprozesse liegen unter 5 %.

Mit der Herstellung von 1 kg Fließmittel auf Basis von PCE sind 1,11 kg CO₂-Äquivalent, $6,09 \cdot 10^{-8}$ kg R11-Äquivalent, $1,97 \cdot 10^{-2}$ kg C₂H₂-Äquivalent, 0,00481 kg SO₂-Äquivalent und 0,00175 kg PO₄³⁻-Äquivalent verbunden. Die Ergebnisse der Dominanzanalyse für die Herstellung des Fließmittels auf Basis von PCE zeigen, dass die Teilprozesse der Maleinsäureherstellung, der Acrylsäureherstellung und der Polyethylenglykolherstellung die größten Beiträge zu den Umweltauswirkungen leisten. Die Anlagentechnik sowie die Prozessenergie tragen jeweils unter 5 % bei.

Mit Hilfe dieser Ergebnisse können nun erstmals gesamte UHFB-Rezepturen mit und ohne Mikrostahtfasern bilanziert werden. In weiteren Analysen sollen nun auf Bauteil- und Bauwerksebene die Umweltauswirkungen von UHFB-Konstruktionen ermittelt werden.

8.3.17 Einfluss der Kornform von Feinststoffen auf die Packungsdichte und das rheologische Verhalten von UHFB

(Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt, Universität Kassel)

Untersucht wurden der Einfluss der Kornform auf die Packungsdichte des Feinststoffanteils und auf die Viskosität von Bindemittel- und Feinststoffleimen für UHFB. Die Kornform wurde fotooptisch mit einem Kornformanalysator gemessen, der Partikel bis herab zu einer Größe von rd. 2 µm erfasst. Zudem wurde die Oberflächentopografie einzelner Partikel im nm-Bereich mit dem AFM gemessen. Die Ergebnisse wurden u. a. dazu genutzt, die „wahre“ Oberfläche unterschiedlicher Feinpartikel zu berechnen und mit dem Wasseranspruch entsprechender Feinststoffe und Feinststoffgemische zu korrelieren. Die Viskosität wurde in einem schubspannungsgesteuerten Rheometer gemessen. Es konnte ein wesentlich engerer Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Oberfläche, der erreichten Packungsdichte, der Viskosität und dem Fließverhalten festgestellt werden, als dies mit den bis dahin bekannten Algorithmen möglich war. Mit Hilfe entsprechender Berechnungsalgorithmen ist es nun eher möglich, das rheologische Verhalten frischer UHFB wesentlich besser und einfacher vorherzusagen und damit die bisher weitgehend experimentelle Mischungsberechnung zu vereinfachen und zu beschleunigen. Jedoch stellte sich heraus, dass vor allem bei sehr feinen Partikeln die interpartikulären Kräfte mit zu berücksichtigen sind. Hierzu sind weitere, umfassende Untersuchungen u. a. durch direkte Messung der interpartikulären Kräfte zwischen Einzelpartikeln im Rasterkraftmikroskop vorgesehen.

8.3.18 Selbstverdichtender ultrahochfester Beton mit neuartiger Mikrobewehrung

(Prof. Dr.-Ing. M. Schnellenbach-Held, Prof. Dr.-Ing. W. Buschmeyer, Universität Duisburg-Essen)

Um die Duktilität des spröden UHFB zu erhöhen, werden üblicherweise Fasern hinzugefügt. Die Nachteile von ultrahochfestem Faserbeton liegen in der zufälligen Ausrichtung und Verteilung der Fasern sowie in der erforderlichen Begrenzung des Fasergehaltes, um eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. Es wurde daher eine neuartige Mikrobewehrung mit zielsicherer Einstellung von Lage und Ausrichtung der Fasern sowie des Stahlgeltes entwickelt, die darüber hinaus eine gute Verarbeitbarkeit ermöglicht. Aufgrund der engen Maschenweite dieser Bewehrung ist ein selbstverdichtender UHFB mit Begrenzung des Größtkorns auf höchstens 2 mm erforderlich (SC-UHPC), der in der ersten Forschungsphase zu entwerfen war. Hierzu wurde in umfangreichen Testserien zunächst eine die Bedingungen eines SC-UHPC erfüllende Mischung mit

optimierter Sieblinie und Abstimmung des Fließmittels (Glenium 51; $23,5 \text{ kg/m}^3$) auf die Zementart/-menge (CEM I 52,5R HS-NA; 832 kg/m^3) entwickelt. Auf Nachbehandlungsmaßnahmen wie Wärme- oder Druckbehandlung wurde bewusst verzichtet, um eine spätere wirtschaftliche und ökologische Anwendung dieses neuen Verbundbaustoffs zu gewährleisten. Die Festigkeitsprüfungen ergaben bei variierter Temperatur und relativer Luftfeuchte 28-Tage-Zylinderdruckfestigkeiten zwischen 153 und 167 N/mm^2 bei Biegezugfestigkeiten zwischen $17,8$ und $20,4 \text{ N/mm}^2$ und E-Moduln von $48\,700$ bis $50\,300 \text{ N/mm}^2$. Für die Beschreibung des zeitabhängigen viskoelastischen Materialverhaltens wurden unter quasi-adiabatischen Temperaturrandbedingungen (diese spiegeln näherungsweise adiabatische Verhältnisse wider) Experimente durchgeführt, wobei sich etwa 8 Stunden nach Herstellung der Prüfkörper eine rasch ansteigende Betontemperatur einstellte; der Höchstwert von 110°C trat in einem Betonalter von 28 Stunden ein. Biegeversuche an Prüfkörpern mit den Abmessungen $15/15/70 \text{ cm}$ (entsprechend der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“) ergaben für die Versuchskörper mit Mikrobewehrung im Vergleich zu solchen mit Stahlfasern eine signifikant verbesserte Duktilität im Nachbruchbereich. In einer weiteren Versuchsserie wurde der Maßstabeffekt (Gradientenwirkung) untersucht: Gegenüber einem Versuchskörper mit Stahlfasern konnte bei dem mit Mikrobewehrung eine erheblich größere plastische Verformbarkeit festgestellt werden, d. h. ein deutlich völligerer Zugspannungsverlauf über die Belastungsgeschichte. Zur Definition einer rechnerisch möglichst wirklichkeitsnahen Abbildung von SC-UHPC mit Mikrobewehrung wurden, ausgehend von den gewonnenen Versuchsergebnissen, erste nichtlineare Finite-Element-Berechnungen mit dem Programmsystem DIANA durchgeführt. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse (Spannungs-Dehnungs- bzw. Spannungs-Durchbiegungs-Beziehungen) zeigten eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung.

8.3.19 Gefährdungspotenzial für ultrahochfesten Beton durch Rissbildung im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit

(Dr.-Ing. Ch. Müller, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf)

Zentrale Aufgabenstellung der ersten Förderperiode war es, die Bedingungen zu untersuchen, unter denen in ultrahochfestem Beton Risse auftreten. Es wurden insgesamt 28 Betonzusammensetzungen für eine Parameterstudie zum Schwinden festgelegt. Berücksichtigt wurden der Einfluss des C_3A -Gehalts auf das autogene Schwinden, ferner der Einfluss des Wasser- und Zementgehalts, des Silikastaubgehalts und der Fließmitteldosierung. Tendenziell verstärkend auf das autogene Schwinden wirkten sich ein hoher Zement- und ein hoher Silikastaubgehalt sowie ein niedriger Wasserzementwert aus. Ein höherer C_3A -Gehalt führte zu deutlich höheren autogenen Schwinddehnungen. Eine höhere Fließmitteldosierung bewirkte bei einem Zement ein tendenziell höheres Schwindmaß nach 28 Tagen, aber ein geringeres nach 6 bis 12 Stunden.

Aus den autogenen Schwinddehnungen ab dem Messbeginn im Alter von sechs Stunden wurde ein bezogenes autogenes Schwinden errechnet. Für einige Betonzusammensetzungen wurde ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Anteil an nicht hydratisiertem Zement und dem autogenen Schwinden gefunden.

Das autogene Schwinden wurde zusätzlich berührungslos gemessen (Schwindkegel). Er ermöglicht die kontinuierliche Messung des chemischen Schwindens sowohl am fließfähigen wie am erhärteten System. Das Trocknungsschwinden und sein Beitrag zum Gesamtschwinden waren deutlich höher als zunächst angenommen. Seitliche verformungsbehindernde Stahleinlagen in Prismen, die unter verschiedenen Bedingungen austrockneten, führten sowohl infolge des autogenen als auch des Trocknungsschwindens zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu Rissen. Für genauere Untersuchungen der Rissbildung wurden Versuche mit einem modifizierten Restrained-Ring-Test (RRT) durchgeführt. Ein Vergleich mit dem errechneten Gesamtschwinden ab sechs Stunden zeigte den Zusammenhang zwischen der späten Austrocknung und der Rissbildung. Solche Betonzusammensetzungen erwiesen sich anfällig für Risse, deren Prismen im Zeitraum zwischen sechs und 12 Stunden relativ geringe Schwinddehnungen aufwiesen. Dies deutet daraufhin, dass die unterschiedliche Festigkeitsentwicklung für die Rissbildung von großer Bedeutung ist. Die ermittelten Zusammenhänge zwischen der Betonzusammensetzung, dem Schwinden und der Rissbildung sollen mit dem RRT quantitativ und qualitativ erweitert werden.

Versuche zum Einfluss einer intensiven Wärmebehandlung und zur Möglichkeit einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion wurden begonnen. Bei ungerissenen Probekörpern hat sich trotz der Verwendung alkalireaktiver Gesteinskörnung und der Beaufschlagung mit Natronlauge keine schädliche Dehnung ergeben. Dagegen führte eine Wärmebehandlung zu einer Beeinträchtigung des Gefüges.

8.3.20 Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von hochbeanspruchten Druckgliedern aus ultrahochfestem Faserbeton (UHPFRC) mit hochfester Längsbewehrung (Dr.-Ing. M. Teutsch, Prof. Dr.-Ing. H. Falkner, TU Braunschweig)

Zentrales Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die Grundlagen zur Anwendbarkeit von Druckgliedern aus UHPFRC mit hochfester Längsbewehrung und konventioneller Bügelbewehrung zu erarbeiten. Die Verfügbarkeit eines Bemessungsverfahrens für hochbelastete Stahlbetondruckglieder aus UHPFRC ermöglicht deren breite Anwendung.

Ultrahochfester Beton eignet sich wegen seiner hohen Druckfestigkeit besonders gut für Druckglieder. Diese hohe Druckfestigkeit ist allerdings mit einem unerwünscht spröden Verhalten verbunden. So fällt die Spannungs-Stauchungs-Linie von ultrahochfestem Beton ohne weitere Maßnahmen nach dem Erreichen der Druckfestigkeit fast senkrecht ab, und die Probekörper versagen ohne Vorankündigung explosionsartig.

Mit der Zugabe von Stahlfasern, und insbesondere mit der Stahlfaserart und -zugabemenge, kann die Neigung des abfallenden Astes der Spannungs-Stauchungs-Linie bei Erreichen der Druckfestigkeit beeinflusst werden. Weiter wird das bei gedrückten Querschnitten auftretende Phänomen des Abplatzens der Betondeckung, und der damit verbundenen Querschnittsminderung, durch „Vernähen“ des Anschlussbereiches Betondeckung/Kernbereich reduziert und der im Nachbruchbereich verbleibende effektiv wirkende Kernbereich vergrößert. Ein robustes Bauteilverhalten zentrisch gedrückter UHPFRC-Druckglieder ausschließlich durch Stahlfasern sicherzustellen, gelingt aber bei sinnvollen Zugabemengen nicht.

In der 1. Förderperiode dieses Teilprojektes wurde das Trag- und Verformungsverhalten von nicht knickgefährdeten Druckgliedern aus ultrahochfestem Stahlfaserbeton bei zentrischem Druck unter Kurzzeitbelastung bei Variation der Stahlfasermenge und -art experimentell und numerisch untersucht. Neben Ansätzen zur Bestimmung der Traglast stand das Nachbruchverhalten, und hier die Erhöhung der Robustheit, im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Die experimentellen und rechnerischen Untersuchungen ergaben, dass das spröde Bruchverhalten von Druckgliedern aus UHFB zum einen über die Faserzugabe und zum anderen über die Schaffung einer Umlagerungsmöglichkeit im Querschnitts- oder Systembereich signifikant verbessert werden kann. Durch Optimierung der Stahl- und PP-Mikrofaserzugabe, umschnürende Querbewehrung zur Aktivierung eines günstigen mehraxialen Spannungszustandes und durch Umlagerungsmöglichkeiten vom Beton zur hochfesten Längsbewehrung lassen sich hochtragfähige UHPFRC-Druckglieder mit hoher Robustheit und Duktilität realisieren.

Die Stahlfaserzugabemenge des SPP 1182-Referenzbetons B4Q für Druckglieder konnte bei vergleichbarem Tragverhalten durch Einsatz längerer Fasern von 17 bzw. 30 mm Länge, statt 9 mm, von 2,47 Vol.-% (194 kg/m^3) auf 1,25 bis 1,5 Vol.-% reduziert werden.

Durch eine umschnürende Querbewehrung kann im Kernbereich ein günstiger mehraxialer Spannungszustand auftreten. Die Untersuchungen ergaben, dass hierdurch im Wesentlichen die Verformungsfähigkeit im Nachbruchbereich signifikant erhöht werden kann. Die Traglaststeigerung ist mit den realisierbaren Querbewehrungsgraden von bis zu ca. 3,0 Vol.-% bezogen auf den Kernbeton und daraus resultierenden Querdrukken von ca. 5 % der Längsspannung nur gering. Die Robustheit zentrisch gedrückter Druckglieder aus ultrahochfestem Beton ausschließlich durch Verbügelung sicherzustellen, ist aber nicht zielführend, da die hierfür erforderliche Querbewehrung einen sehr engen Bügelabstand erfordert. Der für das Abplatzverhalten wichtige Anschlussbereich Betondeckung/Kernbereich wird durch ein enges Bewehrungsnetz „vorgeschädigt“ und der Nachbruchbereich kann durch frühzeitiges Abplatzen der Betondeckung negativ beeinflusst werden.

Der im Nachbruchbereich abfallende Betontraganteil kann durch Verwendung von hochfestem Stahl für die Längsbewehrung mit einer Stauchgrenze oberhalb der Betondruckstauchung entlastet werden. Aufbauend auf diesen Untersuchungen konnten Traglastansätze entwickelt werden. Zugleich konnten Mindestanforderungen an Quer- und Längsbewehrung, Faserleistungsfähigkeit und konstruktive Durchbildung definiert werden, die eine sichere Herstellung robuster und duktiler Druckglieder (ohne Knickgefährdung) aus UHPFRC gewährleisten. Die im Vergleich zu normal- und hochfesten Stützen nachgewiesene Tragfähigkeitssteigerung der Druckglieder kann entweder zur Reduktion der Längsbewehrung oder zur Verringerung der Querschnittsabmessungen verwendet werden. Das Leistungsspektrum des Massivbaues im Stützenbereich wird deutlich erweitert. Damit wird es ermöglicht, den UHFB in Bereichen zu platzieren, die bis dahin dem kosten- und energieintensiven Stahl- bzw. Stahlverbundbau vorbehalten waren.

Um nun das breite Spektrum der in der Baupraxis vorkommenden Anwendungsfälle für exzentrisch beanspruchte Stützen erschließen zu können, ist die Erweiterung des im Teilprojekt UHPFRC-Druckglieder in der 1. Förderperiode für zentrischen Druck entwickelten Ansatzes auf einachsige außermittigen Längsdruck im Kurz- und Langzeitbereich erforderlich. Ziel der 2. Förderperiode ist es, einen Bemessungsansatz für

einachsrig außermittigen Längsdruck mit Ausmitten bis zu ca. $e/d = 1,0$ im Kurz- und Langzeitbereich zu erarbeiten und zugleich konstruktive Regeln aufzustellen, die bei exzentrisch wirkendem Längsdruck ein robustes und duktiles Bauteilverhalten sicherstellen.

8.3.21 Fügen von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton (UHFB) durch Verkleben

(Prof. Dr.-Ing. K. Zilch, TU München)

Ziel der ersten Förderperiode war es, die grundsätzliche Eignung des Fügens von Bauteilen aus UHFB durch Verkleben mit verschiedenen Klebstoffen nachzuweisen. Als Klebstoffe kamen dabei ein kalthärtender Epoxidharzklebstoff, der allgemein bauaufsichtlich zugelassen ist, und ein hochfester mineralischer Mörtel, ein so genannter RPC-Klebstoff, der im Rahmen des Forschungsprojektes und auf Basis der im DFG-Schwerpunktprogramm verwendeten feinkörnigen UHFB-Mischung M2Q am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München entwickelt wurde, zum Einsatz. Für die überwiegende Anzahl der Versuche wurde ein Teilflächen-Schub-Druckkörper mit einer Fugenneigung von 60° verwendet. Es wurde feinkörniger UHFB (M2Q) mit und ohne Fasern sowie mit und ohne Wärmebehandlung verklebt. Untersucht wurden mit beiden Klebstoffen der Einfluss der Vorbehandlung der Klebfuge, der Fasern im UHFB und der Aushärtedauer auf den Versagensmechanismus der Klebfuge und die übertragbaren Schub-Druckspannungen in der Klebfuge. Dabei stellte sich heraus, dass eine Vorbereitung der Oberfläche der Fügeteile durch Strahlen mit festem Strahlgut die optimalen Ergebnisse lieferte. Ein Einfluss der Fasern und der Wärmebehandlung auf die Schub-Druckfestigkeit konnte nicht festgestellt werden. Die Festigkeitsentwicklung des Epoxidharzklebstoffs im Normalklima schreitet zwar schneller voran als die des RPC-Klebstoffs, jedoch konnten mit dem RPC-Klebstoff höhere Schub-Druckfestigkeiten erreicht werden als mit dem kalthärtenden Epoxidharzklebstoff. Ergänzend wurde das Langzeitverhalten von Verklebungen mit beiden Klebstoffen mit Hilfe der Teilflächen-Schub-Druckkörper untersucht. Eine Zeitstandfestigkeit konnte bei beiden Klebstoffen im Normalklima bei einem Lastniveau von 40 % der Kurzzeit-Schub-Druckfestigkeit erreicht werden. Bei einer Temperatur knapp unterhalb der Glasübergangstemperatur des Epoxidharzklebstoffs, d. h. bei 50°C , wurde eine Kurzzeit-Schub-Druckfestigkeit von 70 % der Kurzzeit-Schub-Druckfestigkeit ermittelt. Eine Zeitstandfestigkeit bei Lagerung bei 50°C konnte bei 28 % der Kurzzeit-Schub-Druckfestigkeit im Normalklima erreicht werden. Ein Einfluss einer Dauerlast von 25 % der Kurzzeit-Schub-Druckfestigkeit im Normalklima konnte für Verklebungen mit beiden Klebstoffen nicht festgestellt werden. Allerdings zeigte ein ständiges Wasserangebot nach dem Verkleben und Aushärten des Epoxidharzklebstoffs eine Verminderung der Schub-Druckfestigkeit nach längerer Auslagerungszeit. Als Datenbasis für ein Modell für eine zweiaxiale Bruchhypothese für Klebefugen wurden Schub-Druck- bzw. Schub-Zug-Probekörper mit verschiedenen Fugenneigungen geprüft. Des Weiteren wurden rein druckbeanspruchte Verklebungen untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass eine Klebfuge senkrecht zur Belastungsrichtung keinen Einfluss auf die Festigkeit des Probekörpers hatte. Abschließend wurden rein schubbeanspruchte Verklebungen von UHFB von mit Epoxidharzklebstoffen aufgeklebten Stahlflaschen untersucht, um Aussagen zur Verbundtragfähigkeit von UHFB zu erhalten. Dabei konnte festgestellt werden, dass Probekörper mit nicht vorbehandelten Klebeflächen sowie Probekörper mit UHFB ohne Fasern geringere Verbundbruchenergien aktivieren als Probekörper mit Fasern und optimal vorbehandelter Klebefläche.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in der ersten Antragsphase Versagensmechanismen bei Klebefugen ermittelt und Versagensmodelle erarbeitet wurden, das Langzeitverhalten von Verklebungen untersucht und damit die Grundlagen des Klebens von Bauteilen aus UHFB erarbeitet wurden. Als Klebstoffe wurden dabei ein Epoxidharzklebstoff und ein RPC-Klebstoff betrachtet. In der zweiten Förderperiode soll in Zusammenarbeit mit Bauchemikern der Technischen Universität München der RPC-Klebstoff auf seine Eigenschaften hin optimiert werden und ergänzende Versuche mit einer grobkörnigen UHFB-Mischung durchgeführt werden. Darüber hinaus werden das Ermüdungsverhalten von Klebefugen sowie der Einfluss der Faserverteilung und Faserkonzentration an den Grenzflächen von (Schub-)Zug-Klebefugen untersucht werden. Abschließend sollen Bauteilversuche durchgeführt werden. Die Versuche der zwei Förderperioden sollen Grundlage für ein später noch zu erarbeitendes Bemessungskonzept und für eine Ausarbeitung sinnvoller Detailausbildungen von UHFB-Klebeverbindungen bilden.

Verzeichnis der in der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton – DAfStb – seit 1945 erschienenen Hefte

Heft	Heft	Heft
100: Versuche an Stahlbetonbalken zur Bestimmung der Bewehrungsgrenze. Von <i>W. Gehler</i> , <i>H. Amos</i> und <i>E. Friedrich</i> . Die Ergebnisse der Versuche und das Dresdener Rechenverfahren für den plastischen Betonbereich (1949). Von <i>W. Gehler</i> . 9,20 EUR	114: Schüttdeton aus verschiedenen Zuschlagstoffen. Von <i>A. Hummel</i> und <i>K. Wesche</i> . Die Ermittlung der Kornfestigkeit von Ziegelsplitt und anderen Leichtbeton-Zuschlagstoffen (1954). Von <i>A. Hummel</i> . vergriffen	127: Witterungsbeständigkeit von Beton (1957). Von <i>K. Walz</i> . 4,60 EUR
101: Versuche zur Ermittlung der Rissbildung und der Widerstandsfähigkeit von Stahlbetonplatten mit verschiedenen Bewehrungsstählen bei stufenweise gesteigerter Last. Von <i>O. Graf</i> und <i>K. Walz</i> . Versuche über die Schwellzugfestigkeit von verdillten Bewehrungsstählen. Von <i>O. Graf</i> und <i>G. Weil</i> . Versuche über das Verhalten von kalt verformten Baustählen beim Zurückbiegen nach verschiedener Behandlung der Proben. Von <i>O. Graf</i> und <i>G. Weil</i> . Versuche zur Ermittlung des Zusammenwirkens von Fertigbauteilen aus Stahlbeton für Decken (1948). Von <i>H. Amos</i> und <i>W. Bochmann</i> . vergriffen	115: Die Versuche der Bundesbahn an Spannbetonträgern in Kornwestheim (1954). Von <i>U. Giehrach</i> und <i>C. Sättele</i> . 5,10 EUR	128: Kugelschlagprüfung von Beton (Einfluss des Betonalters) (1957). Von <i>K. Gaede</i> . vergriffen
102: Beton und Zement im Seewasser (1950). Von <i>A. Eckhardt</i> und <i>W. Kronsbein</i> . vergriffen	116: Verdichten von Beton mit Innenrüttlern und Rütteltischen, Güteprüfung von Deckensteinen (1954). Von <i>K. Walz</i> . vergriffen	129: Stahlbetonsäulen unter Kurz- und Langzeitbelastung (1958). Von <i>K. Gaede</i> . 12,30 EUR
103: Die <i>n</i> -freien Berechnungsweisen des einfach bewehrten, rechteckigen Stahlbetonbalkens (1951). Von <i>K. B. Haberstock</i> . vergriffen	117: Gas- und Schaumbeton: Tragfähigkeit von Wänden und Schwinden. Von <i>O. Graf</i> und <i>H. Schäffler</i> . Kugelschlagprüfung von Porenbeton (1954). Von <i>K. Gaede</i> . vergriffen	130: Bruchsicherheit bei Vorspannung ohne Verbund (1959). Von <i>H. Rüschi</i> , <i>K. Kordina</i> und <i>C. Zelger</i> . 5,10 EUR
104: Bindemittel für Massenbeton, Untersuchungen über hydraulische Bindemittel aus Zement, Kalk und Trass (1951). Von <i>K. Walz</i> . vergriffen	118: Schwefelverbindung in Schlackenbeton (1954). Von <i>A. Stois</i> , <i>F. Rost</i> , <i>H. Zinnert</i> und <i>F. Henkel</i> . 6,60 EUR	131: Das Kriechen unbewehrten Betons (1958). Von <i>O. Wagner</i> . vergriffen
105: Die Versuchsberichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1951). Von <i>O. Graf</i> . vergriffen	119: Versuche über den Verbund zwischen Stahlbeton-Fertigbalken und Ortbeton. Von <i>O. Graf</i> und <i>G. Weil</i> . Versuche mit Stahlleichtträgern für Massivdecken (1955). Von <i>G. Weil</i> . vergriffen	132: Brandversuche mit starkbewehrten Stahlbetonsäulen. Von <i>H. Seekamp</i> . Widerstandsfähigkeit von Stahlbetonbauteilen und Stahlsteindecken bei Bränden (1959). Von <i>M. Hannemann</i> und <i>H. Thoms</i> . vergriffen
106: Berechnungstabellen für rechtwinklige Fahrbahnplatten von Straßenbrücken (1952). 7. neubearbeitete Auflage (1981). Von <i>H. Rüschi</i> . vergriffen	120: Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone (1955). Von <i>H. Rüschi</i> . vergriffen	133: Gas- und Schaumbeton: Druckfestigkeit von dampfgehärtetem Gasbeton nach verschiedener Lagerung. Von <i>H. Schäffler</i> . Über die Tragfähigkeit von bewehrten Platten aus dampfgehärtetem Gas- und Schaumbeton. Von <i>H. Schäffler</i> . Untersuchung des Zusammenwirkens von Porenbeton mit Schwerbeton bei bewehrten Schwerbetonbalken mit seitlich angeordneten Porenbeton-schalen (1959). Von <i>H. Rüschi</i> und <i>E. Lassas</i> . 4,60 EUR
107: Die Kugelschlagprüfung von Beton Von <i>K. Gaede</i> . vergriffen	121: Gas- und Schaumbeton: Versuche zur Schub-sicherung bei Balken aus bewehrtem Gas- und Schaumbeton. Von <i>H. Rüschi</i> . Ausgleichsfeuchtigkeit von dampfgehärtetem Gas- und Schaumbeton. Von <i>H. Schäffler</i> . Versuche zur Prüfung der Größe des Schwindens und Quellens von Gas und Schaumbeton (1956). Von <i>O. Graf</i> und <i>H. Schäffler</i> . vergriffen	134: Über das Verhalten von Beton in chemisch angreifenden Wässern (1959). Von <i>K. Seidel</i> . vergriffen
108: Verdichten von Leichtbeton durch Rütteln (1952). Von <i>K. Walz</i> . vergriffen	122: Gestaltfestigkeit von Betonkörpern. Von <i>K. Walz</i> . Warmzerreißversuche mit Spannstählen. Von <i>Dannenber</i> , <i>H. Deutschmann</i> und <i>Melchior</i> . Konzentrierte Lasteintragung in Beton (1957). Von <i>W. Pohle</i> . 7,20 EUR	135: Versuche über die beim Betonieren an den Schalungen entstehenden Belastungen. Von <i>O. Graf</i> und <i>K. Kaufmann</i> . Druckfestigkeit von Beton in der oberen Zone nach dem Verdichten durch Innenrüttler. Von <i>K. Walz</i> und <i>H. Schäffler</i> . Versuche über die Verdichtung von Beton auf einem Rütteltisch in lose aufgesetzter und in aufgespannter Form (1960). Von <i>J. Strey</i> . vergriffen
109: SO ₃ -Gehalt der Zuschlagstoffe (1952). Von <i>K. Gaede</i> . 3,10 EUR	123: Luftporenbildende Betonzusatzmittel (1956). Von <i>K. Walz</i> . vergriffen	136: Gas- und Schaumbeton: Versuche über die Verankerung der Bewehrung in Gasbeton. Über das Kriechen von bewehrten Platten aus dampfgehärtetem Gas- und Schaumbeton (1960). Von <i>H. Schäffler</i> . 10,70 EUR
110: Ziegelsplittbeton (1952). Von <i>K. Charisius</i> , <i>W. Drechsel</i> und <i>A. Hummel</i> . vergriffen	124: Beton im Seewasser (Ergänzung zu Heft 102) (1956). Von <i>A. Hummel</i> und <i>K. Wesche</i> . 2,60 EUR	137: Schubversuche an Spannbetonbalken ohne Schubbewehrung. Von <i>H. Rüschi</i> und <i>G. Vigerust</i> . Die Schubfestigkeit von Spannbetonbalken ohne Schubbewehrung (1960). Von <i>G. Vigerust</i> . vergriffen
111: Modellversuche über den Einfluss der Torsionssteifigkeit bei einer Plattenbalkenbrücke (1952). Von <i>G. Marten</i> . vergriffen	125: Untersuchungen über Federgelenke (1957). Von <i>K. Kammüller</i> und <i>O. Jeske</i> . vergriffen	138: Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton (1961). Von <i>G. Rehm</i> . vergriffen
112: Eisenbahnbrücken aus Spannbeton (1953). 2. erweiterte Auflage (1961). Von <i>R. Bühner</i> . 7,40 EUR	126: SO ₃ -Gehalt der Zuschlagstoffe – Langzeitversuche (Ergänzung zu Heft 109). Eindringtiefe von Beton in Holzwohle-Leichtbauplatten (1957). Von <i>K. Gaede</i> . 5,10 EUR	139: Theoretische Auswertung von Heft 120 – Festigkeit der Biegedruckzone (1961). Von <i>G. Scholz</i> . 5,50 EUR
113: Knickversuche mit Stahlbetonsäulen. Von <i>W. Gehler</i> und <i>A. Hütter</i> . Festigkeit und Elastizität von Beton mit hoher Festigkeit (1954). Von <i>O. Graf</i> . 8,70 EUR		

Heft

- 140: Versuche mit Betonformstählen (1963).
Von *H. Rüschi* und *G. Rehm*.
15,20 EUR
- 141: Das spiegeloptische Verfahren (1962).
Von *H. Weidemann* und *W. Koepcke*.
9,40 EUR
- 142: Einpressmörtel für Spannbeton (1960).
Von *W. Albrecht* und *H. Schmidt*.
6,90 EUR
- 143: Gas- und Schaumbeton: Rostschutz der Bewehrung.
Von *W. Albrecht* und *H. Schäffler*.
Festigkeit der Biegedruckzone (1961).
Von *H. Rüschi* und *R. Sell*.
14,30 EUR
- 144: Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck-Schwellbeanspruchung.
Über den Einfluss der Größe der Proben auf die Würfeldruckfestigkeit von Beton (1962).
Von *K. Gaede*.
13,80 EUR
- 145: Schubversuche an Stahlbeton-Rechteckbalken mit gleichmäßig verteilter Belastung.
Von *H. Rüschi*, *F. R. Haugli* und *H. Mayer*.
Stahlbetonbalken bei gleichzeitiger Einwirkung von Querkraft und Moment (1962).
Von *F. R. Haugli*.
14,80 EUR
- 146: Der Einfluss der Zementart, des Wasser-Zement-Verhältnisses und des Belastungsalters auf das Kriechen von Beton.
Von *A. Hummel*, *K. Wesche* und *W. Brand*.
Der Einfluss des mineralogischen Charakters der Zuschläge auf das Kriechen von Beton (1962).
Von *H. Rüschi*, *K. Kordina* und *H. Hilsdorf*.
29,70 EUR
- 147: Versuche zur Bestimmung der Übertragungslänge von Spannstählen.
Von *H. Rüschi* und *G. Rehm*.
Ermittlung der Eigenspannungen und der Eintragungslänge bei Spannbetonfertigteilen (1963).
Von *K. Gaede*.
11,60 EUR
- 148: Der Einfluss von Bügeln und Druckstäben auf das Verhalten der Biegedruckzone von Stahlbetonbalken (1963).
Von *H. Rüschi* und *S. Stöckl*.
14,10 EUR
- 149: Über den Zusammenhang zwischen Qualität und Sicherheit im Betonbau (1962).
Von *H. Blaut*.
9,50 EUR
- 150: Das Verhalten von Betongelenken bei oftmals wiederholter Druck- und Biegebeanspruchung (1962).
Von *J. Dix*.
8,00 EUR
- 151: Versuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung (1962).
Von *F. Leonhardt* und *R. Walther*.
10,20 EUR
- 152: Versuche an Plattenbalken mit hoher Schubbeanspruchung (1962).
Von *F. Leonhardt* und *R. Walther*.
14,10 EUR
- 153: Elastische und plastische Stauchungen von Beton infolge Druckschwell- und Standbelastung (1962).
Von *A. Mehmehl* und *E. Kern*.
12,80 EUR

Heft

- 154: Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons und Spannungsverteilung in der Biegedruckzone bei konstanter Dehngeschwindigkeit (1962).
Von *C. Rasch*.
13,40 EUR
- 155: Einfluss des Zementleimgehaltes und der Versuchsmethode auf die Kenngrößen der Biegedruckzone von Stahlbetonbalken.
Von *H. Rüschi* und *S. Stöckl*.
Einfluss der Zwischenlagen auf Streuung und Größe der Spaltzugfestigkeit von Beton (1963).
Von *R. Sell*.
10,10 EUR
- 156: Schubversuche an Plattenbalken mit unterschiedlicher Schubbewehrung (1963).
Von *F. Leonhardt* und *R. Walther*.
Verformungsverhalten von Beton bei zweiachsiger Beanspruchung (1963).
Von *H. Weigler* und *G. Becker*.
10,60 EUR
- 158: Rückprallprüfung von Beton mit dichtem Gefüge.
Von *K. Gaede* und *E. Schmidt*.
Konsistenzmessung von Beton (1964).
Von *W. Albrecht* und *H. Schäffler*.
10,50 EUR
- 159: Die Beanspruchung des Verbundes zwischen Spannglied und Beton (1964).
Von *H. Kupfer*.
6,30 EUR
- 160: Versuche mit Betonformstählen; Teil II. (1963).
Von *H. Rüschi* und *G. Rehm*.
11,10 EUR
- 161: Modellstatische Untersuchung punktförmig gestützter schiefwinkliger Platten unter besonderer Berücksichtigung der elastischen Auflagernachgiebigkeit (1964).
Von *A. Mehmehl* und *H. Weise*.
vergriffen
- 162: Verhalten von Stahlbeton und Spannbeton beim Brand (1964).
Von *H. Seekamp*, *W. Becker*, *W. Struck*, *K. Kordina* und *H.-J. Wierig*.
vergriffen
- 163: Schubversuche an Durchlaufträgern (1964).
Von *F. Leonhardt* und *R. Walther*.
19,70 EUR
- 164: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen (1964).
Von *H. Weigler*, *R. Fischer* und *H. Dettling*.
12,60 EUR
- 165: Versuche mit Betonformstählen Teil III. (1964).
Von *H. Rüschi* und *G. Rehm*.
11,60 EUR
- 166: Berechnungstabellen für schiefwinkliger Fahrbahnplatten von Straßenbrücken (1967).
Von *H. Rüschi*, *A. Hergenröder* und *I. Mungan*.
vergriffen
- 167: Frostwiderstand und Porengefüge des Betons, Beziehungen und Prüfverfahren.
Von *A. Schäfer*.
Der Einfluss von mehlfinen Zuschlagstoffen auf die Eigenschaften von Einpressmörteln für Spannbalken, Einpressversuche an langen Spannbalken (1965).
Von *W. Albrecht*.
14,10 EUR

Heft

- 168: Versuche mit Ausfallkörnungen.
Von *W. Albrecht* und *H. Schäffler*.
Der Einfluss der Zementsteinporen auf die Widerstandsfähigkeit von Beton im Seewasser.
Von *K. Wesche*.
Das Verhalten von jungem Beton gegen Frost.
Von *F. Henkel*.
Zur Frage der Verwendung von Bolzensetzgeräten zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Beton (1965).
Von *K. Gaede*.
12,50 EUR
- 169: Versuche zum Studium des Einflusses der Rissbreite auf die Rostbildung an der Bewehrung von Stahlbetonbauteilen.
Von *G. Rehm* und *H. Moll*.
Über die Korrosion von Stahl im Beton (1965).
Von *H. L. Moll*.
vergriffen
- 170: Beobachtungen an alten Stahlbetonbauteilen hinsichtlich Carbonatisierung des Betons und Rostbildung an der Bewehrung.
Von *G. Rehm* und *H. L. Moll*.
Untersuchung über das Fortschreiten der Carbonatisierung an Betonbauwerken, durchgeführt im Auftrage der Abteilung Wasserstraßen des Bundesverkehrsministeriums, zusammengestellt von *H.-J. Kleinschmidt*.
Tiefe der carbonatisierten Schicht alter Betonbauten, Untersuchungen an Betonproben, durchgeführt vom Forschungsinstitut für Hochofenschlacke, Rheinhausen, und vom Laboratorium der westfälischen Zementindustrie, Beckum, zusammengestellt im Forschungsinstitut der Zementindustrie des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf (1965).
14,90 EUR
- 171: Knickversuche mit Zweigelenkrahmen aus Stahlbeton (1965).
Von *W. Hochmann* und *S. Röbert*.
9,80 EUR
- 172: Untersuchungen über den Stoßverlauf beim Aufprall von Kraftfahrzeugen auf Stützen und Rahmenstiele aus Stahlbeton (1965).
Von *C. Popp*.
10,20 EUR
- 173: Die Bestimmung der zweiachsigen Festigkeit des Betons (1965).
Zusammenfassung und Kritik früherer Versuche und Vorschlag für eine neue Prüfmethode.
Von *H. Hilsdorf*.
8,00 EUR
- 174: Untersuchungen über die Tragfähigkeit netzbewehrter Betonsäulen (1965).
Von *H. Weigler* und *J. Henzel*.
8,00 EUR
- 175: Betongelenke. Versuchsbericht, Vorschläge zur Bemessung und konstruktiven Ausbildung.
Von *F. Leonhardt* und *H. Reimann*.
Kritische Spannungszustände des Betons bei mehrachsiger ruhender Kurzzeitbelastung (1965).
Von *H. Reimann*.
vergriffen
- 176: Zur Frage der Dauerfestigkeit von Spannbetonbauteilen (1966).
Von *M. Mayer*.
9,10 EUR
- 177: Umlagerung der Schnittkräfte in Stahlbetonkonstruktionen. Grundlagen der Berechnung bei statisch unbestimmten Tragwerken unter Berücksichtigung der plastischen Verformungen (1966).
Von *P. S. Rao*.
11,40 EUR

Heft

- 178: Wandartige Träger (1966).
Von *F. Leonhardt* und *R. Walther*.
vergriffen
- 179: Veränderlichkeit der Biege- und Schubsteifigkeit bei Stahlbetontragwerken und ihr Einfluss auf Schnittkraftverteilung und Traglast bei statisch unbestimmter Lagerung (1966).
Von *W. Dilger*. 12,50 EUR
- 180: Knicken von Stahlbetonstäben mit Rechteckquerschnitt unter Kurzzeitbelastung – Berechnung mit Hilfe von automatischen Digitalrechenanlagen (1966).
Von *A. Blaser*. 8,00 EUR
- 181: Brandverhalten von Stahlbetonplatten – Einflüsse von Schutzschichten. Grundlagen für die Bemessung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonplatten (1966).
Von *P. Bornemann*. 10,20 EUR
- 182: Karbonatisierung von Schwerbeton. Von *A. Meyer*, *H.-J. Wierig* und *K. Husmann*. Einfluss von Luftkohlenensäure und Feuchtigkeit auf die Beschaffenheit des Betons als Korrosionsschutz für Stahleinlagen (1967).
Von *F. Schröder*, *H.-G. Smolczyk*, *K. Grade*, *R. Vinkeloe* und *R. Roth*. 12,30 EUR
- 183: Das Kriechen des Zementsteins im Beton und seine Beeinflussung durch gleichzeitiges Schwinden (1966).
Von *W. Ruetz*. 8,00 EUR
- 184: Untersuchungen über den Einfluss einer Nachverdichtung und eines Anstriches auf Festigkeit, Kriechen und Schwinden von Beton (1966).
Von *H. Hilsdorf* und *K. Finsterwalder*. 8,00 EUR
- 185: Das unterschiedliche Verformungsverhalten der Rand- und Kernzonen von Beton (1966).
Von *S. Stöckl*. 9,10 EUR
- 186: Betone aus Sulfathüttenzement in höherem Alter (1966).
Von *K. Wesche* und *W. Manns*. 8,00 EUR
- 187: Zur Frage des Einflusses der Ausbildung der Auflager auf die Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonbalken. Von *K. Gaede*. Schwingungsmessungen an Massivbrücken (1966).
Von *B. Brückmann*. 9,10 EUR
- 188: Verformungsversuche an Stahlbetonbalken mit hochfestem Bewehrungsstahl (1967).
Von *G. Franz* und *H. Brenker*. 11,40 EUR
- 189: Die Tragfähigkeit von Decken aus Glasstahlbeton (1967).
Von *C. Zelger*. 10,20 EUR
- 190: Festigkeit der Biegedruckzone – Vergleich von Prismen- und Balkenversuchen (1967).
Von *H. Rüschi*, *K. Kordina* und *S. Stöckl*. 8,00 EUR
- 191: Experimentelle Bestimmung der Spannungsverteilung in der Biegedruckzone. Stützmomente kreuzweise bewehrter durchlaufender Rechteckbetonplatten (1967).
Von *H. Schwarz*. 9,10 EUR

Heft

- 192: Die mitwirkende Breite der Gurte von Plattenbalken (1967).
Von *W. Koepcke* und *G. Denecke*.
vergriffen
- 193: Bauschäden als Folge der Durchbiegung von Stahlbeton-Bauteilen (1967).
Von *H. Mayer* und *H. Rüschi*. 12,50 EUR
- 194: Die Berechnung der Durchbiegung von Stahlbeton-Bauteilen (1967).
Von *H. Mayer*. vergriffen
- 195: 5 Versuche zum Studium der Verformungen im Querkraftbereich eines Stahlbetonbalkens (1967).
Von *H. Rüschi* und *H. Mayer*. 11,40 EUR
- 196: Tastversuche über den Einfluss von vorangegangenen Dauerlasten auf die Kurzzeitfestigkeit des Betons. Kennzahlen für das Verhalten einer rechteckigen Biegedruckzone von Stahlbetonbalken unter kurzzeitiger Belastung (1967).
Von *H. Rüschi* und *S. Stöckl*. 12,90 EUR
- 197: Brandverhalten durchlaufender Stahlbetonrippendecken. Von *H. Seekamp* und *W. Becker*. Brandverhalten kreuzweise bewehrter Stahlbetonrippendecken.
Von *J. Stanke*. Vergrößerung der Betondeckung als Feuerschutz von Stahlbetonplatten, 1. und 2. Teil (1967).
Von *H. Seekamp* und *W. Becker*. 13,40 EUR
- 198: Festigkeit und Verformung von unbewehrtem Beton unter konstanter Dauerlast (1968).
Von *H. Rüschi*, *R. Sell*, *C. Rasch*, *E. Grasser*, *A. Hummel*, *K. Wesche* und *H. Flatten*. 12,70 EUR
- 199: Die Berechnung ebener Kontinua mittels der Stabwerkmethodik – Anwendung auf Balken mit einer rechteckigen Öffnung (1968).
Von *A. Krebs* und *F. Haas*. 10,20 EUR
- 200: Dauerschwingfestigkeit von Betonstählen im einbetonierten Zustand. Von *H. Wascheidt*. Betongelenke unter wiederholten Gelenkverdrehungen (1968).
Von *G. Franz* und *H.-D. Fein*. 11,10 EUR
- 201: Schubversuche an indirekt gelagerten, einfeldrigen und durchlaufenden Stahlbetonbalken (1968).
Von *F. Leonhardt*, *R. Walther* und *W. Dilger*. 9,10 EUR
- 202: Torsions- und Schubversuche an vorgespannten Hohlkastenträgern. Von *F. Leonhardt*, *R. Walther* und *O. Vogler*. Torsionsversuche an einem Kunstharzmodell eines Hohlkastenträgers (1968).
Von *D. Feder*. 11,40 EUR
- 203: Festigkeit und Verformung von Beton unter Zugspannungen (1969).
Von *H. G. Heilmann*, *H. Hilsdorf* und *K. Finsterwalder*. 13,70 EUR
- 204: Tragverhalten ausmittig beanspruchter Stahlbetondruckglieder (1969).
Von *A. Mehmehl*, *H. Schwarz*, *K. H. Kasperek* und *J. Makovi*. 11,40 EUR

Heft

- 205: Versuche an wendelbewehrten Stahlbetonsäulen unter kurz- und langfristig wirkenden zentrischen Lasten (1969).
Von *H. Rüschi* und *S. Stöckl*. 11,40 EUR
- 206: Statistische Analyse der Betonfestigkeit (1969).
Von *H. Rüschi*, *R. Sell* und *R. Rackwitz*. 8,00 EUR
- 207: Versuche zur Dauerfestigkeit von Leichtbeton. Von *R. Sell* und *C. Zelger*. Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone. Einflüsse der Querschnittsform (1969).
Von *S. Stöckl* und *H. Rüschi*. 12,50 EUR
- 208: Zur Frage der Rissbildung durch Eigen- und Zwängspannungen infolge Temperatur in Stahlbetonbauteilen (1969).
Von *H. Falkner*. vergriffen
- 209: Festigkeit und Verformung von Gasbeton unter zweiachsigem Druck-Zugbeanspruchung. Von *R. Sell*. Versuche über den Verbund bei bewehrtem Gasbeton (1970).
Von *R. Sell* und *C. Zelger*. 11,40 EUR
- 210: Schubversuche mit indirekter Krafteinleitung. Versuche zum Studium der Verdübelungswirkung der Biegezugbewehrung eines Stahlbetonbalkens (1970).
Von *T. Baumann* und *H. Rüschi*. 13,70 EUR
- 211: Elektronische Berechnung des in einem Stahlbetonbalken im gerissenen Zustand auftretenden Kräftezustandes unter besonderer Berücksichtigung des Querkraftbereiches (1970).
Von *D. Jungwirth*. 15,00 EUR
- 212: Einfluss der Krümmung von Spannriegeln auf den Spannweg. Von *C. Zelger* und *H. Rüschi*. Über den Erhaltungszustand 20 Jahre alter Spannbetonträger (1970).
Von *K. Kordina* und *N. V. Waubke*. 9,10 EUR
- 213: Vierseitig gelagerte Stahlbetonhohlplatten. Versuche, Berechnung und Bemessung (1970).
Von *H. Aster*. vergriffen
- 214: Verlängerung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonstützen durch Anwendung von Bekleidungen oder Ummantelungen. Von *W. Becker* und *J. Stanke*. Über das Verhalten von Zementmörtel und Beton bei höheren Temperaturen (1970).
Von *R. Fischer*. 14,60 EUR
- 215: Brandversuche an Stahlbetonfertigungsstützen, 2. und 3. Teil (1970).
Von *W. Becker* und *J. Stanke*. 14,60 EUR
- 216: Schnittkrafttafeln für den Entwurf kreiszylindrischer Tonnenkettendächer (1971).
Von *A. Mehmehl*, *W. Kruse*, *S. Samaan* und *H. Schwarz*. 19,90 EUR
- 217: Tragwirkung orthogonaler Bewehrungsnetze beliebiger Richtung in Flächentragwerken aus Stahlbeton (1972).
Von *T. Baumann*. vergriffen

- | Heft | Heft | Heft |
|---|---|---|
| 218: Versuche zur Schubsicherung und Momentendeckung von profilierten Stahlbetonbalken (1972).
Von <i>H. Kupfer</i> und <i>T. Baumann</i> .
10,50 EUR | 228: Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstäben unter Kurzzeitbelastung (1973).
Von <i>H. Martin</i> .
12,00 EUR | 239: Torsionsversuche an Stahlbetonbalken (1974).
Von <i>F. Leonhardt</i> und <i>G. Schelling</i> .
19,30 EUR |
| 219: Die Tragfähigkeit von Stahlsteindecken.
Von <i>C. Zelger</i> und <i>F. Daschner</i> .
Bewehrte Ziegelstürze (1972).
Von <i>C. Zelger</i> .
9,70 EUR | 229: Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung.
Von <i>H. Kupfer</i> .
Bau und Erprobung einer Versuchseinrichtung für zweiachsige Belastung (1973).
Von <i>H. Kupfer</i> und <i>C. Zelger</i> .
18,40 EUR | 240: Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken nach DIN 1045 Ausgabe Juli 1988 [3. überarbeitete Auflage (1991)].
Von <i>E. Grasser</i> und <i>G. Thielen</i> .
vergriffen |
| 220: Bemessung von Beton- und Stahlbetonbauteilen nach DIN 1045, Ausgabe Januar 1972. [2. überarbeitete Auflage (1979)] – Biegung mit Längskraft, Schub, Torsion.
Von <i>E. Grasser</i> .
Nachweis der Knicksicherheit.
Von <i>K. Kordina</i> und <i>U. Quast</i> .
25,60 EUR | 230: Erwärmungsvorgänge in balkenartigen Stahlbetonteilen unter Brandbeanspruchung (1975).
Von <i>H. Ehm</i> , <i>K. Kordina</i> und <i>R. v. Postel</i> .
19,30 EUR | 241: Abplatzversuche an Prüfkörpern aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton bei verschiedenen Temperaturbeanspruchungen (1974).
Von <i>C. Meyer-Ottens</i> .
9,20 EUR |
| 220 (En): Design of Concrete and Reinforced Concrete Members in Accordance with DIN 1045 December 1978 Edition – Bending with Axial Force, Shear, Torsion.
By <i>E. Grasser</i> .
Analysis of Safety against Buckling.
By <i>K. Kordina</i> and <i>U. Quast</i>
2nd revised edition. 25,60 EUR | 231: Die Versuchsberichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Inhaltsübersicht der Hefte 1 bis 230 (1973).
Von <i>O. Graf</i> und <i>H. Deutschmann</i> .
9,60 EUR | 242: Verhalten von verzinkten Spannstählen und Bewehrungsstäben.
Von <i>G. Rehm</i> , <i>A. Lämmke</i> , <i>U. Nürnberg</i> , <i>G. Rieche</i> sowie <i>H. Martin</i> und <i>A. Rauen</i> .
Lösen von Betonstahl (1974).
Von <i>D. Russwurm</i> .
19,30 EUR |
| 221: Festigkeit und Verformung von Innenwandknoten in der Tafelbauweise.
Von <i>H. Kupfer</i> .
Die Druckfestigkeit von Mörtelfugen zwischen Betonfertigteilen.
Von <i>E. Grasser</i> und <i>F. Daschner</i> .
Tragfähigkeit (Schubfestigkeit) von Deckenauflagen im Fertigteilbau (1972).
Von <i>R. v. Halász</i> und <i>G. Tantom</i> .
13,60 EUR | 232: Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Zementsteins.
Von <i>F. Wittmann</i> .
Verformung und Bruchvorgang poröser Baustoffe bei kurzzeitiger Belastung und unter Dauerlast (1974).
Von <i>F. Wittmann</i> und <i>J. Zaitsev</i> .
13,60 EUR | 243: Ultraschall-Impulstechnik bei Fertigteilen.
Von <i>G. Rehm</i> , <i>N. V. Waubke</i> und <i>J. Neisecke</i> .
Untersuchungen an ausgebauten Spanngliedern (1975).
Von <i>A. Röhnisch</i> .
14,80 EUR |
| 222: Druck-Stöße von Bewehrungsstäben – Stahlbetonstützen mit hochfestem Stahl St 90 (1972).
Von <i>F. Leonhardt</i> und <i>K.-T. Teichen</i> .
9,20 EUR | 233: Stichprobenprüfpläne und Annahmekennlinien für Beton (1973).
Von <i>H. Blaut</i> .
7,50 EUR | 244: Elektronische Berechnung der Auswirkungen von Kriechen und Schwinden bei abschnittsweise hergestellten Verbundstabwerken (1975).
Von <i>D. Schade</i> und <i>W. Haas</i> .
6,80 EUR |
| 223: Spanngliedverankerungen im Inneren von Bauteilen.
Von <i>J. Eibl</i> und <i>G. Iványi</i> .
Teilweise Vorspannung (1973).
Von <i>R. Walther</i> und <i>N. S. Bhal</i> .
11,70 EUR | 234: Finite Elemente zur Berechnung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern (1973).
Von <i>J. H. Argyris</i> , <i>G. Faust</i> , <i>J. R. Roy</i> , <i>J. Szimmat</i> , <i>E. P. Wamke</i> und <i>K. J. Willam</i> .
12,50 EUR | 245: Die Kornfestigkeit künstlicher Zuschlagstoffe und ihr Einfluss auf die Betonfestigkeit.
Von <i>R. Sell</i> .
Druckfestigkeit von Leichtbeton (1974).
Von <i>K. D. Schmidt-Hurtienne</i> .
16,60 EUR |
| 224: Zusammenwirken von einzelnen Fertigteilen als großflächige Scheibe (1973).
Von <i>G. Mehlhorn</i> .
vergriffen | 235: Untersuchungen zum heißen Liner als Innenwand für Spannbetondruckbehälter für Leichtwasserreaktoren (1973).
Von <i>J. Meyer</i> und <i>W. Spandick</i> .
vergriffen | 246: Untersuchungen über den Querstoß beim Aufprall von Kraftfahrzeugen auf Gründungspfähle aus Stahlbeton und Stahl (1974).
Von <i>C. Popp</i> .
16,40 EUR |
| 225: Mikrobeton für modellstatische Untersuchungen (1972).
Von <i>A.-H. Burggrabe</i> .
12,60 EUR | 236: Tragfähigkeit und Sicherheit von Stahlbetonstützen unter ein- und zweiaxsig exzentrischer Kurzzeit- und Dauerbelastung (1974).
Von <i>R. F. Warner</i> .
7,90 EUR | 247: Temperatur und Zwangsspannung im Konstruktions-Leichtbeton infolge Hydratation.
Von <i>H. Weigler</i> und <i>J. Nicolay</i> .
Dauerschwell- und Betriebsfestigkeit von Konstruktions-Leichtbeton (1975).
Von <i>H. Weigler</i> und <i>W. Freitag</i> .
13,00 EUR |
| 226: Tragfähigkeit von Zugschlaufenstößen.
Von <i>F. Leonhardt</i> , <i>R. Walther</i> und <i>H. Dieterle</i> .
Haken- und Schlaufenverbindungen in biegebeanspruchten Platten.
Von <i>G. Franz</i> und <i>G. Timm</i> .
Übergreifungsvollstöße mit hakenförmig gebogenen Rippenstählen (1973).
Von <i>K. Kordina</i> und <i>G. Fuchs</i> .
13,40 EUR | 237: Spannbeton-Reaktordruckbehälter: Studie zur Erfassung spezieller Beton-eigenschaften im Reaktordruckbehälterbau.
Von <i>J. Eibl</i> , <i>N. V. Waubke</i> , <i>W. Klingsch</i> , <i>U. Schneider</i> und <i>G. Rieche</i> .
Parameterberechnungen an einem Referenzbehälter.
Von <i>J. Szimmat</i> und <i>K. Willam</i> .
Einfluss von Werkstoffeigenschaften auf Spannungs- und Verformungszustände eines Spannbetonbehälters (1974).
Von <i>V. Hansson</i> und <i>F. Stangenberg</i> .
12,50 EUR | 248: Zur Frage der Abplatzungen an Bauteilen aus Beton bei Brandbeanspruchungen (1975).
Von <i>C. Meyer-Ottens</i> .
8,00 EUR |
| 227: Schubversuche an Spannbetonträgern (1973).
Von <i>F. Leonhardt</i> , <i>R. Koch</i> und <i>F.-S. Rostásy</i> .
25,50 EUR | 238: Einfluss wirklichkeitsnahen Werkstoffverhaltens auf die kritischen Kipplasten schlanker Stahlbeton- und Spannbetonträger.
Von <i>G. Mehlhorn</i> .
Berechnung von Stahlbetonscheiben im Zustand II bei Annahme eines wirklichkeitsnahen Werkstoffverhaltens (1974).
Von <i>K. Dörr</i> , <i>G. Mehlhorn</i> , <i>W. Stauder</i> und <i>D. Uhlisch</i> .
15,90 EUR | 249: Schlag-Biegeversuch mit unterschiedlich bewehrten Stahlbetonbalken (1975).
Von <i>C. Popp</i> .
9,50 EUR |
| | | 250: Langzeitversuche an Stahlbetonstützen.
Von <i>K. Kordina</i> .
Einfluss des Kriechens auf die Ausbiegung schlanker Stahlbetonstützen (1975).
Von <i>K. Kordina</i> und <i>R. F. Warner</i> .
10,60 EUR |
| | | 251: Versuche an wendelbewehrten Stahlbetonsäulen unter exzentrischer Belastung (1975).
Von <i>S. Stöckl</i> und <i>B. Menne</i> .
10,20 EUR |

Heft

- 252: Beständigkeit verschiedener Betonarten in Meerwasser und in sulfathaltigem Wasser (1975).
Von *H. T. Schröder, O. Hallauer* und *W. Scholz*. 14,80 EUR
- 253: Spannbeton-Reaktordruckbehälter-Instrumentierung.
Von *J. Német* und *R. Angeli*. Versuch zur Weiterentwicklung eines Setzdehnungsmessers (1975).
Von *C. Zelger*. 9,70 EUR
- 254: Festigkeit und Verformungsverhalten von Beton unter hohen zweiachsigen Dauerbelastungen und Dauerschwellbelastungen. Festigkeit und Verformungsverhalten von Leichtbeton, Gasbeton, Zementstein und Gips unter zweiachsiger Kurzzeitbeanspruchung (1976).
Von *D. Linse* und *A. Stegbauer*. 12,50 EUR
- 255: Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierungstiefe des Betons (1976).
Von *P. Schiessl*. vergriffen
- 256: Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles (1975).
Von *J. Hundt*. 15,00 EUR
- 257: Bruchsicherheitsberechnung von Spannbeton-Druckbehältern (1976).
Von *K. Schimmelpfennig*. 12,70 EUR
- 258: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen (1976).
Von *K. Gertis, K. Kiesl, H. Werner* und *V. Wolfseher*. 12,50 EUR
- 259: Entwicklung eines integrierten Spannbetondruckbehälters (SBB Typ „Stern“ mit Stützkessel) (1976).
Von *G. Jüptner, H. Kumpf, G. Molz, B. Neunert* und *O. Seidl*. 10,90 EUR
- 260: Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton (1976).
Von *J. Eibl* und *G. Iványi*. 25,50 EUR
- 261: Der Einfluss radioaktiver Strahlung auf die mechanischen Eigenschaften von Beton (1976).
Von *H. Hilsdorf, J. Kropp* und *H.-J. Koch*. 8,00 EUR
- 262: Experimentelle Bestimmung des räumlichen Spannungszustandes eines Reaktordruckbehältermodells (1976).
Von *R. Stöver*. 12,50 EUR
- 263: Bruchfestigkeit und Bruchverformung von Beton unter mehraxialer Belastung bei Raumtemperatur (1976).
Von *F. Bremer* und *F. Steinsdörfer*. 7,20 EUR
- 264: Spannbeton-Reaktordruckbehälter mit heißer Dichthaut für Druckwasserreaktoren (1976).
Von *A. Jungmann, H. Kopp, M. Gangl, J. Német, A. Nesitka, W. Walluschek-Wallfeld* und *J. Mutzl*. 10,20 EUR
- 265: Traglast von Stahlbetondruckgliedern unter schiefer Biegung (1976).
Von *K. Kordina, K. Rafla* und *O. Hjorth*. 11,20 EUR
- 266: Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbrückenpfeilern mit Rollenlagern (1976).
Von *K. Liermann*. 12,30 EUR

Heft

- 267: Zur Mindestbewehrung für Zwang von Außenwänden aus Stahlleichtbeton.
Von *F. S. Rostásy, R. Koch* und *F. Leonhardt*. Versuche zum Tragverhalten von Druckübergreifungsstößen in Stahlbetonwänden (1976).
Von *F. Leonhardt, F. S. Rostásy* und *M. Patzak*. 14,30 EUR
- 268: Einfluss der Belastungsdauer auf das Verbundverhalten von Stahl in Beton (Verbundkriechen) (1976).
Von *L. Franke*. 8,20 EUR
- 269: Zugspannung und Dehnung in unbewehrten Betonquerschnitten bei exzentrischer Belastung (1976).
Von *H. G. Heilmann*. 14,80 EUR
- 270: Eine Formulierung des zweiachsialen Verformungs- und Bruchverhaltens von Beton und deren Anwendung auf die wirklichkeitsnahe Berechnung von Stahlbetonplatten (1976).
Von *J. Link*. 13,70 EUR
- 271: Untersuchungen an 20 Jahre alten Spannbetonträgern (1976).
Von *R. Bühner, K.-F. Müller, H. Martin* und *J. Ruhnu*. 12,50 EUR
- 272: Die Dynamische Relaxation und ihre Anwendung auf Spannbeton-Reaktordruckbehälter (1976).
Von *W. Zerna*. 13,00 EUR
- 273: Schubversuche an Balken mit veränderlicher Trägerhöhe (1977).
Von *F. S. Rostásy, K. Roeder* und *F. Leonhardt*. 9,20 EUR
- 274: Witterungsbeständigkeit von Beton, 2. Bericht (1977).
Von *K. Walz* und *E. Hartmann*. 8,00 EUR
- 275: Schubversuche an Balken und Platten bei gleichzeitigem Längszug (1977).
Von *F. Leonhardt, F. S. Rostásy, J. MacGregor* und *M. Patzak*. 10,50 EUR
- 276: Versuche an zugbeanspruchten Übergreifungsstößen von Rippenstählen (1977).
Von *S. Stöckl, B. Menne* und *H. Kupfer*. 14,80 EUR
- 277: Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung – Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses (1977).
Von *G. Schickert* und *H. Winkler*. 16,40 EUR
- 278: Berechnungen von Temperatur- und Feuchtefeldern in Massivbauten nach der Methode der Finiten Elemente (1977).
Von *J. H. Argyris, E. P. Warnke* und *K. J. Willam*. 9,60 EUR
- 279: Finite Elementberechnung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern.
Von *J. H. Argyris, G. Faust, J. Szimmat, E. P. Warnke* und *K. J. Willam*. Zur Konvertierung von SMART I (1977).
Von *J. H. Argyris, J. Szimmat* und *K. J. Willam*. 10,90 EUR

Heft

- 280: Nichtisothermer Feuchtetransport in dickwandigen Betonteilen von Reaktordruckbehältern.
Von *K. Kiessl* und *K. Gertis*. Zur Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton.
Von *J. Hundt*. Einfluss des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons (1977).
Von *M. J. Setzer*. 13,70 EUR
- 281: Untersuchungen über das Verhalten von Beton bei schlagartiger Beanspruchung (1977).
Von *C. Popp*. 7,50 EUR
- 282: Vorausbestimmung der Spannkraftverluste infolge Dehnungsbehinderung (1977).
Von *R. Walther, U. Utescher* und *D. Schreck*. 8,50 EUR
- 283: Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugfestigkeit von Beton (1977).
Von *G. Rehm, P. Diem* und *R. Zimbelmann*. 12,50 EUR
- 284: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Lasteintragung in die Bewehrung von Stahlbetondruckgliedern (1977).
Von *F. P. Müller* und *W. Eisenbiegler*. 7,80 EUR
- 285: Zur Traglast der ausmittig gedrückten Stahlbetonstütze mit Umschnürungsbewehrung (1977).
Von *B. Menne*. 8,20 EUR
- 286: Versuche über Teilflächenbelastung von Normalbeton (1977).
Von *P. Wurm* und *F. Daschner*. 10,20 EUR
- 287: Spannbetonbehälter für Siedewasserreaktoren mit einer Leistung von 1600 MWe (1977).
Von *F. Bremer* und *W. Spandick*. 6,50 EUR
- 288: Tragverhalten von aus Fertigteilen zusammengesetzten Scheiben.
Von *G. Mehlhorn* und *H. Schwing*. Versuche zur Schubtragfähigkeit verzahnter Fugen (1977).
Von *G. Mehlhorn, H. Schwing* und *K.-R. Berg*. vergriffen
- 289: Prüfverfahren zur Beurteilung von Rostschutzmitteln für die Bewehrung von Gasbeton.
Von *W. Manns, H. Schneider, R. Schönfelder*. Frostwiderstand von Beton.
Von *W. Manns* und *E. Hartmann*. Zum Einfluss von Mineralölen auf die Festigkeit von Beton (1977).
Von *W. Manns* und *E. Hartmann*. 8,20 EUR
- 290: Studie über den Abbruch von Spannbeton-Reaktordruckbehältern.
Von *K. Kleiser, K. Essig, K. Cerff* und *H. K. Hilsdorf*. Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons (1977).
Von *F. H. Wittmann*. 13,70 EUR
- 291: Übergreifungsstöße von Rippenstäben unter schwellender Belastung.
Von *G. Rehm* und *R. Eligehausen*. Übergreifungsstöße geschweißter Betonstahlmatten (1977).
Von *G. Rehm, R. Tewes* und *R. Eligehausen*. 10,20 EUR

Heft

- 292: Lösung versuchstechnischer Fragen bei der Ermittlung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Beton unter dreiachsiger Belastung (1978).
Von *D. Linse*. 8,00 EUR
- 293: Zur Messtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern (1978).
Von *N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andreae* und *W. Markowski*. 10,90 EUR
- 294: Studien zur Auslegung von Spannbetondruckbehältern für wassergekühlte Reaktoren (1978).
Von *K. Schimmelpfennig, G. Bäätjer, U. Eckstein, U. Ick* und *S. Wrage*. 10,20 EUR
- 295: Kriech- und Relaxationsversuche an sehr altem Beton.
Von *H. Trost, H. Cordes* und *G. Abele*.
Kriechen und Rückkriechen von Beton nach langer Lasteinwirkung.
Von *P. Probst* und *S. Stöckl*.
Versuche zum Einfluss des Belastungsalters auf das Kriechen von Beton (1978).
Von *K. Wesche, I. Schrage* und *W. vom Berg*. 13,70 EUR
- 296: Die Bewehrung von Stahlbetonbauteilen bei Zwangsbeanspruchung infolge Temperatur (1978).
Von *P. Noakowski*. vergriffen
- 297: Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes und des Reifegrades auf die Wärmeleitfähigkeit von Beton.
Von *J. Hundt* und *A. Wagner*.
Sorptionsuntersuchungen am Zementstein, Zementmörtel und Beton (1978).
Von *J. Hundt* und *H. Kantelberg*. 8,20 EUR
- 298: Erfahrungen bei der Prüfung von temporären Korrosionsschutzmitteln für Spannstähle.
Von *G. Rieche* und *J. Delille*.
Untersuchungen über den Korrosionsschutz von Spannstählen unter Spritzbeton (1978).
Von *G. Rehm, U. Nürnberger* und *R. Zimbelmann*. 7,70 EUR
- 299: Versuche an dickwandigen, unbewehrten Betonringen mit Innendruckbeanspruchung (1978).
Von *J. Neuner, S. Stöckl* und *E. Grasser*. 8,20 EUR
- 300: Hinweise zu DIN 1045, Ausgabe Dezember 1978. Bearbeitet von *D. Bertram* und *H. Deutschmann*.
Erläuterung der Bewehrungsrichtlinien (1979).
Von *G. Rehm, R. Eligehausen* und *B. Neubert*. vergriffen
- 301: Übergreifungsstöße zugbeanspruchter Rippenstäbe mit geraden Stabenden (1979).
Von *R. Eligehausen*. 12,30 EUR
- 302: Einfluss von Zusatzmitteln auf den Widerstand von jungem Beton gegen Rissbildung bei scharfem Austrocknen.
Von *W. Manns* und *K. Zeus*.
Spannungsoptische Untersuchungen zum Tragverhalten von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen (1979).
Von *M. Betzle*. 8,20 EUR
- 303: Querkraftschlüssige Verbindung von Stahlbetondeckenplatten (1979).
Von *H. Paschen* und *V. C. Zillich*. 10,20 EUR

Heft

- 304: Kunstharzgebundene Glasfaserstäbe als Bewehrung im Betonbau.
Von *G. Rehm* und *L. Franke*.
Zur Frage der Krafteinleitung in kunstharzgebundene Glasfaserstäbe (1979).
Von *G. Rehm, L. Franke* und *M. Patzak*. 8,90 EUR
- 305: Vorherbestimmung und Kontrolle des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Beton (1979).
Von *S. Ziegeldorf, K. Kleiser* und *H. K. Hilsdorf*. 6,90 EUR
- 306: Dreidimensionale Berechnung eines Spannbetonbehälters mit heißer Dichthaut für einen 1500 MWe Druckwasserreaktor (1979).
Von *E. Ettl, H. Hinterleitner, J. Németh, A. Jungmann* und *H. Kopp*. 7,70 EUR
- 307: Zur Bemessung der Schubbewehrung von Stahlbetonbalken mit möglichst gleichmäßiger Zuverlässigkeit (1979).
Von *W. Moosecker*. 7,70 EUR
- 308: Tragfähigkeit auf schrägen Druck von Brückenstegen, die durch Hüllrohre geschwächt sind.
Von *K. Koch* und *F. S. Rostásy*.
Spannungszustand aus Vorspannung im Bereich gekrümmter Spannglieder (1979).
Von *V. Cornelius* und *G. Mehlhorn*. 9,60 EUR
- 309: Kunstharzmörtel und Kunstharzbetone unter Kurzzeit- und Dauerlastbelastung.
Von *G. Rehm, L. Franke* und *K. Zeus*.
Langzeituntersuchungen an epoxidharzverklebten Zementmörtelprismen (1980).
Von *P. Jagfeld*. 9,50 EUR
- 310: Teilweise Vorspannung – Verbundfestigkeit von Spanngliedern und ihre Bedeutung für Rissbildung und Rissbreitenbeschränkung (1980).
Von *H. Trost, H. Cordes, U. Thormaehlen* und *H. Hagen*. 18,90 EUR
- 311: Segmentäre Spannbetonträger im Brückenbau (1980).
Von *K. Guckenberger, F. Daschner* und *H. Kupfer*. 17,10 EUR
- 312: Schwellenwerte beim Betondruckversuch (1980).
Von *G. Schickert*. 17,10 EUR
- 313: Spannungs-Dehnungs-Linien von Leichtbeton.
Versuche zum Kriechen und Schwinden von hochfestem Leichtbeton (1980).
Von *P. Probst* und *S. Stöckl*. 13,80 EUR
- 314: Kurzzeitverhalten von extrem leichten Betonen, Druckfestigkeit und Formänderungen.
Von *K. Bastgen* und *K. Wesche*.
Die Schubtragfähigkeit bewehrter Platten und Balken aus dampfgehärtetem Gasbeton nach Versuchen (1980).
Von *D. Briesemann*. 21,20 EUR
- 315: Bestimmung der Beulsicherheit von Schalen aus Stahlbeton unter Berücksichtigung der physikalisch-nicht-linearen Materialeigenschaften (1980).
Von *W. Zerna, I. Mungan* und *W. Steffen*. 7,20 EUR

Heft

- 316: Versuche zur Bestimmung der Tragfähigkeit stumpf gestoßener Stahlbetonfertigteilstützen (1980).
Von *H. Paschen* und *V. C. Zillich*. vergriffen
- 317: Untersuchungen über die Schwingfestigkeit geschweißter Betonstahlverbindungen (1981).
Teil 1: Schwingfestigkeitsversuche.
Von *G. Rehm, W. Harre* und *D. Russwurm*.
Teil 2: Werkstoffkundliche Untersuchungen.
Von *G. Rehm* und *U. Nürnberger*. 16,40 EUR
- 318: Eigenschaften von feuerverzinkten Überzügen auf kaltumgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl.
Technologische Eigenschaften von kaltgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl nach einer Feuerverzinkung (1981).
Von *U. Nürnberger*. 8,90 EUR
- 319: Vollstöße durch Übergreifung von zugbeanspruchten Rippenstählen in Normalbeton.
Von *M. Betzle, S. Stöckl* und *H. Kupfer*.
Vollstöße durch Übergreifung von zugbeanspruchten Rippenstählen in Leichtbeton.
Von *S. Stöckl, M. Betzle* und *G. Schmidt-Thrö*.
Verbundverhalten von Betonstählen, Untersuchung auf der Grundlage von Ausziehversuchen.
Von *H. Martin* und *P. Noakowski*.
Ermittlung der Verbundspannungen an gedrückten einbetonierten Betonstählen (1981).
Von *F. P. Müller* und *W. Eisenbiegler*. 24,00 EUR
- 320: Erläuterungen zu DIN 4227 Spannbeton.
Teil 1: Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung, Ausgabe 07.88
Teil 2: Bauteile mit teilweiser Vorspannung, Ausgabe 05.84
Teil 3: Bauteile in Segmentbauart; Bemessung und Ausführung der Fugen, Ausgabe 12.83
Teil 4: Bauteile aus Spannbeton, Ausgabe 02.86
Teil 5: Einpressen von Zementmörtel in Spannkannäle, Ausgabe 12.79
Teil 6: Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund, Ausgabe 05.82 (1989).
Zusammengestellt von *D. Bertram*. vergriffen
- 321: Leichtzuschlag-Beton mit hohem Gehalt an Mörtelporen (1981).
Von *H. Weigler, S. Karl* und *C. Jaegermann*. 5,90 EUR
- 322: Biegebemessung von Stahlleichtbeton, Ableitung der Spannungsverteilung in der Biegedruckzone aus Prismenversuchen als Grundlage für DIN 4219.
Von *E. Grasser* und *P. Probst*.
Versuche zur Aufnahme der Umlenkkräfte von gekrümmten Bewehrungsstäben durch Betondeckung und Bügel (1981).
Von *J. Neuner* und *S. Stöckl*. 13,80 EUR
- 323: Zum Schubtragverhalten stabförmiger Stahlbetonelemente (1981).
Von *R. Mallée*. 10,20 EUR

- | Heft | Heft | Heft |
|--|--|--|
| 324: Wärmeausdehnung, Elastizitätsmodul, Schwinden, Kriechen und Restfestigkeit von Reaktorbeton unter einachsiger Belastung und erhöhten Temperaturen.
Von <i>H. Aschl</i> und <i>S. Stöckl</i> .
Versuche zum Einfluss der Belastungshöhe auf das Kriechen des Betons (1981).
Von <i>S. Stöckl</i> . 15,10EUR | 336: Tragfähigkeit und Verformung von Stahlbetonbalken unter Biegung und gleichzeitigem Zwang infolge Auflagerverschiebung (1982).
Von <i>K. Kordina</i> , <i>F. S. Rostásy</i> und <i>B. Svensvik</i> . 10,20EUR | 347: Wirkung der Endhaken bei Vollstößen durch Übergreifung von zugbeanspruchten Rippenstäben.
Von <i>G. Schmidt-Thrö</i> , <i>S. Stöckl</i> und <i>M. Betzle</i> .
Übergreifungs-Halbstoß mit kurzem Längsversatz ($l_v = 0,5 l_d$) bei zugbeanspruchten Rippenstäben in Leichtbeton.
Von <i>M. Betzle</i> , <i>S. Stöckl</i> und <i>H. Kupfer</i> .
Rissflächen im Beton im Bereich von Übergreifungsstößen zugbeanspruchter Rippenstäbe (1983).
Von <i>M. Betzle</i> , <i>S. Stöckl</i> und <i>H. Kupfer</i> . 16,60EUR |
| 325: Großmodellversuche zur Spanngliederreibung (1981).
Von <i>H. Cordes</i> , <i>K. Schütt</i> und <i>H. Trost</i> . 10,20EUR | 337: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen – Behaviour of Concrete at High Temperatures (1982).
Von <i>U. Schneider</i> . 14,80EUR | 348: Tragfähigkeit querkraftschlüssiger Fugen zwischen Stahlbeton-Fertigteildeckenelementen (1983).
Von <i>H. Paschen</i> und <i>V. C. Zillich</i> .
vergriffen |
| 326: Blockfundamente für Stahlbetonfertigtstützen (1981).
Von <i>H. Dieterle</i> und <i>A. Steinle</i> .
vergriffen | 338: Berechnung des zeitabhängigen Verhaltens von Stahlbetonplatten unter Last- und Zwangsbeanspruchung im ungerissenen und gerissenen Zustand (1982).
Von <i>G. Schaper</i> . 12,80EUR | 349: Bestimmung des Wasserzementwertes von Frischbeton (1984).
Von <i>H. K. Hilsdorf</i> . 10,20EUR |
| 327: Versuche zur Knicksicherung von druckbeanspruchten Bewehrungsstäben (1981).
Von <i>J. Neuner</i> und <i>S. Stöckl</i> . 8,20EUR | 339: Stützenstöße im Stahlbeton-Fertigteilbau mit unbewehrten Elastomergelagern (1982).
Von <i>F. Müller</i> , <i>H. R. Sasse</i> und <i>U. Thormählen</i> . 8,20EUR | 350: Spannbetonbauteile in Segmentbauart unter kombinierter Beanspruchung aus Torsion, Biegung und Querkraft.
Von <i>K. Kordina</i> , <i>M. Teutsch</i> und <i>V. Weber</i> .
Rissbildung von Segmentbauteilen in Abhängigkeit von Querschnittsausbildung und Spannstahlverbundeigenschaften.
Von <i>K. Kordina</i> und <i>V. Weber</i> .
Einfluss der Ausbildung unbewehrter Pressfugen auf die Tragfähigkeit von schrägen Druckstreben in den Stegen von Segmentbauteilen (1984).
Von <i>K. Kordina</i> und <i>V. Weber</i> . 15,90EUR |
| 328: Zum Tragfähigkeitsnachweis für Wand-Decken-Knoten im Großtafelbau (1982).
Von <i>E. Hasse</i> . 13,80EUR | 340: Durchlaufende Deckenkonstruktionen aus Spannbetonfertigteilstücken mit ergänzender Ortbetonschicht – Continuous Skin Stressed Slabs (1982).
Behaviour in Bending (Biegetragerverhalten).
Von <i>J. Rosenthal</i> und <i>E. Bljoger</i> .
Schubtragverhalten (Behaviour in Shear).
Von <i>F. Daschner</i> und <i>H. Kupfer</i> . 11,00EUR | 351: Belastungs- und Korrosionsversuche an teilweise vorgespannten Balken.
Von <i>Günter Schelling</i> und <i>Ferdinand S. Rostásy</i> .
Teilweise Vorspannung – Plattenversuche (1984).
Von <i>Kassian Janovic</i> und <i>Herbert Kupfer</i> . 22,80EUR |
| 329: Sachstandbericht „Massenbeton“. Von <i>Deutscher Beton-Verein e.V.</i> .
Untersuchungen an einem über 20 Jahre alten Spannbetonträger der Pliensau-Brücke Esslingen am Neckar (1982).
Von <i>K. Schäfer</i> und <i>H. Scheef</i> . 8,20EUR | 341: Zum Ansatz der Betonzugfestigkeit bei den Nachweisen zur Trag- und Gebrauchsfähigkeit von unbewehrten und bewehrten Betonbauteilen (1983).
Von <i>M. Jahn</i> . 8,20EUR | 352: Empfehlungen für brandschutztechnisch richtiges Konstruieren von Betonbauwerken.
Von <i>K. Kordina</i> und <i>L. Krampf</i> .
Möglichkeiten, nachträglich die in einem Betonbauteil während eines Schadenfeuers aufgetretenen Temperaturen abzuschätzen.
Von <i>A. Haksever</i> und <i>L. Krampf</i> .
Brandverhalten von Decken aus Glasstahlbeton nach DIN 1045 (Ausg. 12.78), Abschn. 20.3.
Von <i>C. Meyer-Ottens</i> .
Eindringen von Chlorid-Ionen aus PVC-Abbrand in Stahlbetonbauteile – Literaturauswertung (1984).
Von <i>K. Wesche</i> , <i>G. Neroth</i> und <i>J. W. Weber</i> . 15,90EUR |
| 330: Zusammenstellung und Beurteilung von Messverfahren zur Ermittlung der Beanspruchungen in Stahlbetonbauteilen (1982).
Von <i>H. Twelmeier</i> und <i>J. Schneefuß</i> . 11,50EUR | 342: Dynamische Probleme im Stahlbetonbau – Teil I: Der Baustoff Stahlbeton unter dynamischer Beanspruchung (1983).
Von <i>F. P. Müller</i> , <i>E. Keintzel</i> und <i>H. Charlier</i> . 17,90EUR | 353: Einpressmörtel mit langer Verarbeitungszeit.
Von <i>W. Manns</i> und <i>R. Zimbelmann</i> .
Auswirkung von Fehlstellen im Einpressmörtel auf die Korrosion des Spannstahls.
Von <i>G. Rehm</i> , <i>R. Frey</i> und <i>D. Funk</i> .
Korrosionsverhalten verzinkter Spannstähle in gerissenem Beton (1984).
Von <i>U. Nürnberger</i> . 29,10EUR |
| 331: Kleben im konstruktiven Betonbau (1982).
Von <i>G. Rehm</i> und <i>L. Franke</i> . 11,80EUR | 343: Versuche zum Kriechen und Schwinden von hochfestem Leichtbeton. Versuche zum Rückkriechen von hochfestem Leichtbeton (1983).
Von <i>P. Hofmann</i> und <i>S. Stöckl</i> . 7,70EUR | 354: Bewehrungsführung in Ecken und Rahmenendknoten.
Von <i>Karl Kordina</i> .
Vorschläge zur Bemessung rechteckiger und kranzförmiger Konsolen insbesondere unter exzentrischer Belastung aufgrund neuer Versuche (1984).
Von <i>Heinrich Paschen</i> und <i>Hermann Malonn</i> .
vergriffen |
| 332: Anwendungsgrenzen von vereinfachten Bemessungsverfahren für schlanke, zweiachsig ausmittigt beanspruchte Stahlbetondruckglieder.
Von <i>P. C. Olsen</i> und <i>U. Quast</i> .
Traglast von Druckgliedern mit vereinfachter Bügelbewehrung unter Feuerangriff.
Von <i>A. Haksever</i> und <i>R. Hass</i> .
Traglast von Druckgliedern mit vereinfachter Bügelbewehrung unter Normaltemperatur und Kurzzeitbeanspruchung (1982).
Von <i>K. Kordina</i> und <i>R. Mester</i> . 14,30EUR | 344: Versuche zur Teilflächenbelastung von Leichtbeton für tragende Konstruktionen.
Von <i>H. G. Heilmann</i> .
Teilflächenbelastung von Normalbeton – Versuche an bewehrten Scheiben (1983).
Von <i>P. Wurm</i> und <i>F. Daschner</i> . 12,00EUR | |
| 333: Festschrift „75 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton“ (1982).
Von <i>D. Bertram</i> , <i>E. Bornemann</i> , <i>N. Bunke</i> , <i>H. Goffin</i> , <i>D. Jungwirth</i> , <i>K. Kordina</i> , <i>H. Kupfer</i> , <i>J. Schlaich</i> , <i>B. Wedler</i> und <i>W. Zerna</i> . 21,50EUR | 345: Experimentelle Ermittlung der Steifigkeiten von Stahlbetonplatten (1983).
Von <i>H. Schäfer</i> , <i>K. Schneider</i> und <i>H. G. Schäfer</i> . 11,00EUR | |
| 334: Versuche an Spannbetonbalken unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion (1982).
Von <i>M. Teutsch</i> und <i>K. Kordina</i> . 9,70EUR | 346: Tragfähigkeit geschweißter Verbindungen im Betonfertigteiltbau.
Von <i>E. Czieleski</i> und <i>M. Friedmann</i> .
Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit in Beton eingespannter Rundstahldollen aus nichtrostendem austenitischem Stahl.
Von <i>G. Utescher</i> und <i>H. Herrmann</i> .
Untersuchungen über in Beton eingelassene Scherbolzen aus Betonstahl (1983).
Von <i>H. Paschen</i> und <i>T. Schönhoff</i> .
vergriffen | |
| 335: Versuche zum Tragverhalten von segmentären Spannbetonträgern – Vergleichende Auswertung für Epoxidharz- und Zementmörtelfugen (1982).
Von <i>H. Kupfer</i> , <i>K. Guckenberger</i> und <i>F. Daschner</i> . 10,20EUR | | |

Heft

- 355: Untersuchungen zur Vorspannung ohne Verbund.
Von *Heinrich Trost, Heiner Cordes* und *Bernhard Weller*.
Anwendung der Vorspannung ohne Verbund.
Von *Karl Kordina, Josef Hegger* und *Manfred Teutsch*.
Ermittlung der wirtschaftlichen Bewehrung von Flachdecken mit Vorspannung ohne Verbund (1984).
Von *Karl Kordina, Manfred Teutsch* und *Josef Hegger*. 19,90 EUR
- 356: Korrosionsschutz von Bauwerken, die im Gleitschalungsbau errichtet wurden (1984).
Von *Karl Kordina* und *Siegfried Droese*. 15,90 EUR
- 357: Konstruktion, Bemessung und Sicherheit gegen Durchstanzen von balkenlosen Stahlbetondecken im Bereich der Innenstützen (1984).
Von *Udo Schaefer*. vergriffen
- 358: Kriechen von Beton unter hoher zentrischer und exzentrischer Druckbeanspruchung (1985).
Von *Emil Grasser* und *Udo Kraemer*. 14,60 EUR
- 359: Versuche zur Ermüdungsbeanspruchung der Schubbewehrung von Stahlbetonträgern.
Von *Klaus Guckenberger, Herbert Kupfer* und *Ferdinand Daschner*.
Vorgespannte Schubbewehrung (1985).
Von *Jürgen Ruhnau* und *Herbert Kupfer*. 24,00 EUR
- 360: Festigkeitsverhalten und Strukturveränderungen von Beton bei Temperaturbeanspruchung bis 250 °C (1985).
Von *Jürgen Seeberger, Jörg Kropp* und *Hubert K. Hilsdorf*. 17,90 EUR
- 361: Beitrag zur Bemessung von schlanken Stahlbetonstützen für schiefe Biegung mit Achsdruck unter Kurzzeit- und Dauerbelastung – Contribution to the Design of Slender Reinforced Concrete Columns Subjected to Biaxial Bending and Axial Compression Considering Short and Long Term Loadings (1985).
Von *Nelson Szilard Galgoul*. 20,50 EUR
- 362: Versuche an Konstruktionsleichtbetonbauteilen unter kombinierter Beanspruchung aus Torsion, Biegung und Querkraft (1985).
Von *Karl Kordina* und *Manfred Teutsch*. 12,80 EUR
- 363: Versuche zur Mitwirkung des Betons in der Zugzone von Stahlbetonröhren (1985).
Von *Jörg Schlaich* und *Hans Schober*. 13,80 EUR
- 364: Empirische Zusammenhänge zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit stabförmiger Stahlbetonelemente (1985).
Von *Karl Kordina* und *Franz Blume*. 11,20 EUR
- 365: Experimentelle Untersuchungen bewehrter und hohler Prüfkörper aus Normalbeton mittels eines zwängungsarmen Krafteinleitungssystems (1985).
Von *Manfred Specht, Rita Schmidt* und *Hartmut Kappes*. 15,30 EUR
- 366: Grundsätzliche Untersuchungen zum Geräteinfluss bei der mehraxialen Druckprüfung von Beton (1985).
Von *Helmut Winkler*. 27,60 EUR

Heft

- 367: Verbundverhalten von Bewehrungsstählen unter Dauerbelastung in Normal- und Leichtbeton.
Von *Kassian Janovic*.
Übergreifungsstöße geschweißter Betonstahlmatten.
Von *Gallus Rehm* und *Rüdiger Tewes*.
Übergreifungsstöße geschweißter Betonstahlmatten in Stahlleichtbeton (1986).
Von *Gallus Rehm* und *Rüdiger Tewes*. 13,80 EUR
- 368: Fugen und Aussteifungen in Stahlbetonskelettbauten (1986).
Von *Bernd Hock, Kurt Schäfer* und *Jörg Schlaich*. vergriffen
- 369: Versuche zum Verhalten unterschiedlicher Stahlsorten in stoßbeanspruchten Platten (1986).
Von *Josef Eibl* und *Klaus Kreuser*. 12,80 EUR
- 370: Einfluss von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen.
Von *Peter Schießl*.
Dauerhaftigkeit von Spanngliedern unter zyklischen Beanspruchungen.
Von *Heiner Cordes*.
Beurteilung der Betriebsfestigkeit von Spannbetonbrücken im Koppelfugbereich unter besonderer Berücksichtigung einer möglichen Rissbildung.
Von *Gert König* und *Hans-Christian Gerhardt*.
Nachweis zur Beschränkung der Rissbreite in den Normen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1986).
Von *Eilhard Wölfel*. vergriffen
- 371: Tragfähigkeit durchstanzgefährdeter Stahlbetonplatten-Entwicklung von Bemessungsvorschlägen (1986).
Von *Karl Kordina* und *Diedrich Nölting*. vergriffen
- 372: Literaturstudie zur Schubsisicherung bei nachträglich ergänzten Querschnitten.
Von *Ferdinand Daschner* und *Herbert Kupfer*.
Versuche zur notwendigen Schubbewehrung zwischen Betonfertigteilen und Ortbeton.
Von *Ferdinand Daschner*.
Verminderte Schubdeckung in Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Fugen parallel zur Tragrichtung unter Berücksichtigung nicht vorwiegend ruhender Lasten.
Von *Ingo Nissen, Ferdinand Daschner* und *Herbert Kupfer*.
Literaturstudie über Versuche mit sehr hohen Schubspannungen (1986).
Von *Herbert Kupfer* und *Ferdinand Daschner*. vergriffen
- 373: Empfehlungen für die Bewehrungsführung in Rahmenecken und -knoten.
Von *Karl Kordina, Ehrenfried Schaaff* und *Thomas Westphal*.
Das Übertragungs- und Weggrößenverfahren für ebene Stahlbetonstabtragwerke unter Verwendung von Tangentensteifigkeiten (1986).
Von *Poul Colberg Olsen*. vergriffen
- 374: Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen unter wirklichsnahen Beanspruchungs- und Umgebungsbedingungen (1986).
Von *Gallus Rehm, Wolfgang Harre* und *Willibald Beul*. 13,80 EUR

Heft

- 375: Grundlagen und Verfahren für den Knicksicherheitsnachweis von Druckgliedern aus Konstruktionsleichtbeton.
Von *Roland Molzahn*.
Einfluss des Kriechens auf Ausbiegung und Tragfähigkeit schlanker Stützen aus Konstruktionsleichtbeton (1986).
Von *Roland Molzahn*. 12,80 EUR
- 376: Trag- und Verformungsfähigkeit von Stützen bei großen Zwangsverschiebungen der Decken.
Von *Peter Steidle* und *Kurt Schäfer*.
Versuche an Stützen mit Normalkraft und Zwangsverschiebungen (1986).
Von *Rolf Wohlfahrt* und *Rainer Koch*. 21,50 EUR
- 377: Versuche zur Schubtragwirkung von profilierten Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit überdrückten Gurtplatten (1986).
Von *Herbert Kupfer* und *Klaus Guckenberger*. 13,30 EUR
- 378: Versuche über das Verbundverhalten von Rippenstählen bei Anwendung des Gleitbauverfahrens.
Teilbericht I:
Ausziehversuche, Proben in Utting hergestellt.
Von *Gerfried Schmidt-Thrö* und *Siegfried Stöckl*.
Teilbericht II:
Versuche zur Bestimmung charakteristischer Betoneigenschaften bei Anwendung des Gleitbauverfahrens.
Von *Gerfried Schmidt-Thrö, Siegfried Stöckl* und *Herbert Kupfer*.
Teilbericht III:
Ausziehversuche und Versuche an Übergreifungsstößen, Proben in Berlin bzw. Köln hergestellt.
Von *Klaus Kluge, Gerfried Schmidt-Thrö, Siegfried Stöckl* und *Herbert Kupfer*.
Einfluss der Probekörperform und der Messpunktanordnung auf die Ergebnisse von Ausziehversuchen (1986).
Von *Gerfried Schmidt-Thrö, Siegfried Stöckl* und *Herbert Kupfer*. 26,10 EUR
- 379: Experimentelle und analytische Untersuchungen zur wirklichsnahen Bestimmung der Bruchschnittgrößen unbewehrter Betonbauteile unter Zugbeanspruchung, (1987).
Von *Dietmar Scheidler*. 15,90 EUR
- 380: Eigenspannungszustand in Stahl- und Spannbetonkörpern infolge unterschiedlichen thermischen Dehnverhaltens von Beton und Stahl bei tiefen Temperaturen.
Von *Ferdinand S. Rostásy* und *Jochen Scheuermann*.
Verbundverhalten einbetonierten Betonrippenstahls bei extrem tiefer Temperatur.
Von *Ferdinand S. Rostásy* und *Jochen Scheuermann*.
Versuche zur Biegetragfähigkeit von Stahlbetonplattenstreifen bei extrem tiefer Temperatur (1987).
Von *Günter Wiedemann, Jochen Scheuermann, Karl Kordina* und *Ferdinand S. Rostásy*. 18,90 EUR
- 381: Schubtragverhalten von Spannbetonbauteilen mit Vorspannung ohne Verbund.
Von *Karl Kordina* und *Josef Hegger*.
Systematische Auswertung von Schubversuchen an Spannbetonbalken (1987).
Von *Karl Kordina* und *Josef Hegger*. 20,50 EUR

- | Heft | Heft | Heft |
|---|--|---|
| 382: Berechnen und Bemessen von Verbundprofilstäben bei Raumtemperatur und unter Brandeinwirkung (1987).
Von <i>Otto Jungbluth</i> und <i>Werner Gradwohl</i> . 15,90 EUR | 392: Dynamische Probleme im Stahlbetonbau – Teil II: Stahlbetonbauteile und -bauwerke unter dynamischer Beanspruchung (1988).
Von <i>Josef Eibl</i> , <i>Einar Keintzel</i> und <i>Hermann Charlier</i> . vergriffen | 402: Kunststoffbeschichtete Betonstähle (1989).
Von <i>Gallus Rehm</i> , <i>Rainer Blum</i> , <i>Elke Fielker</i> , <i>Reinhard Frey</i> , <i>Dieter Junginger</i> , <i>Bernhard Kipp</i> , <i>Peter Langer</i> , <i>Klaus Menzel</i> und <i>Ferdinand Nagel</i> . 27,60 EUR |
| 383: Unbewehrter und bewehrter Beton unter Wechselbeanspruchung (1987).
Von <i>Helmut Weigler</i> und <i>Karl-Heinz Rings</i> . 11,50 EUR | 393: Querschnittsbericht zur Rissbildung in Stahl- und Spannbetonkonstruktionen.
Von <i>Rolf Eligehausen</i> und <i>Helmut Kreller</i> .
Korrosion von Stahl in Beton – einschließlich Spannbeton (1988).
Von <i>Ulf Nürnberger</i> , <i>Klaus Menzel</i> und <i>Armin Löhr</i> und <i>Reinhard Frey</i> . vergriffen | 403: Wassergehalt von Beton bei Temperaturen von 100 °C bis 500 °C im Bereich des Wasserdampfpartialdruckes von 0 bis 5,0 MPa.
Von <i>Wilhelm Manns</i> und <i>Bernd Neubert</i> .
Permeabilität und Porosität von Beton bei hohen Temperaturen (1989).
Von <i>Ulrich Schneider</i> und <i>Hans Joachim Herbst</i> . 13,30 EUR |
| 384: Einwirkung von Streusalzen auf Betone unter gezielt praxisnahen Bedingungen (1987).
Von <i>Reinhard Frey</i> . 7,40 EUR | 394: Nachweisverfahren für Verankerung, Verformung, Zwangbeanspruchung und Rissbreite. Kontinuierliche Theorie der Mitwirkung des Betons auf Zug. Rechenhilfen für die Praxis (1988).
Von <i>Piotr Noakowski</i> . vergriffen | 404: Verhalten von Beton bei mäßig erhöhten Betriebstemperaturen (1989).
Von <i>Harald Budelmann</i> . 23,50 EUR |
| 385: Das Schubtragverhalten schlanker Stahlbetonbalken – Theoretische und experimentelle Untersuchungen für Leicht- und Normalbeton.
Von <i>Helmut Kirmair</i> .
Rissverhalten im Schubbereich von Stahlleichtbetonträgern (1987).
Von <i>Kassian Janovic</i> . 17,90 EUR | 395: Berechnung von Temperatur-, Feuchte- und Verschiebungsfeldern in erhärtenden Betonbauteilen nach der Methode der finiten Elemente (1988).
Von <i>Holger Hamfler</i> . 28,60 EUR | 405: Korrosion und Korrosionsschutz der Bewehrung im Massivbau – neuere Forschungsergebnisse – Folgerungen für die Praxis – Hinweise für das Regelwerk (1990).
Von <i>Ulf Nürnberger</i> . vergriffen |
| 386: Das Tragverhalten von Beton – Einfluss der Festigkeit und der Erhärungsbedingungen (1987).
Von <i>Helmut Weigler</i> und <i>Eike Bielak</i> . 12,80 EUR | 396: Rissbreitenbeschränkung und Mindestbewehrung bei Eigenspannungen und Zwang (1988).
Von <i>Manfred Puche</i> . 29,70 EUR | 406: Die Berechnung von ebenen, in ihrer Ebene belasteten Stahlbetonbauteilen mit der Methode der Finiten Elemente (1990).
Von <i>Günter Borg</i> . vergriffen |
| 387: Tragverhalten quadratischer Einzelfundamente aus Stahlbeton.
Von <i>Hannes Dieterle</i> und <i>Ferdinand S. Rostásy</i> .
Zur Bemessung quadratischer Stützenfundamente aus Stahlbeton unter zentrischer Belastung mit Hilfe von Bemessungsdiagrammen (1987).
Von <i>Hannes Dieterle</i> . 22,00 EUR | 397: Spezielle Fragen beim Schweißen von Betonstählen.
Gleichmaßdehnung von Betonstählen (1989).
Von <i>Dieter Rußwurm</i> . 15,30 EUR | 407: Zwang und Rissbildung in Wänden auf Fundamenten (1990).
Von <i>Ferdinand S. Rostásy</i> und <i>Wolfgang Henning</i> . 24,50 EUR |
| 388: Wandartige Träger mit Auflagerverstärkungen und vertikalen Arbeitsfugen (1987).
Von <i>Jens Götsche</i> und <i>Heinrich Twelmeier</i> . 16,90 EUR | 398: Zur Faltwerkwirkung der Stahlbetontreppen (1989).
Von <i>Hans-Heinrich Osteroth</i> . vergriffen | 408: Druck und Querkzug in bewehrten Betonelementen.
Von <i>Kurt Schäfer</i> , <i>Günther Schelling</i> und <i>Thomas Kuchler</i> .
Altersabhängige Beziehung zwischen der Druck- und Zugfestigkeit von Beton im Bauwerk – Bauwerkszugfestigkeit – (1990).
Von <i>Ferdinand S. Rostásy</i> und <i>Ernst-Holger Ranisch</i> . 24,50 EUR |
| 389: Verankerung der Bewehrung am Endauflager bei einachsiger Querverpressung.
Von <i>Gerfried Schmidt-Thrö</i> , <i>Siegfried Stöckl</i> und <i>Herbert Kupfer</i> .
Einfluss einer einachsigen Querverpressung und der Verankerungslänge auf das Verbundverhalten von Rippenstählen im Beton.
Von <i>Gerfried Schmidt-Thrö</i> , <i>Siegfried Stöckl</i> und <i>Herbert Kupfer</i> .
Rissflächen im Beton im Bereich einer auf Zug beanspruchten Stabverankerung (1988).
Von <i>Gerfried Schmidt-Thrö</i> . 26,60 EUR | 399: Das Bewehren von Stahlbetonbauteilen – Erläuterungen zu verschiedenen gebräuchlichen Bauteilen (1993).
Von <i>Rolf Eligehausen</i> und <i>Roland Gerster</i> . vergriffen | 409: Zum nichtlinearen Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonstabtragwerken unter Last- und Zwangeinwirkung (1990).
Von <i>Helmut Kreller</i> . 20,50 EUR |
| 390: Einfluss von Betongüte, Wasserhaushalt und Zeit auf das Eindringen von Chloriden in Beton.
Von <i>Gallus Rehm</i> , <i>Ulf Nürnberger</i> , <i>Bernd Neubert</i> und <i>Frank Nenninger</i> .
Chloridkorrosion von Stahl in gerissenen Beton.
A – Bisheriger Kenntnisstand.
B – Untersuchungen an der 30 Jahre alten Westmole in Helgoland.
C – Auslagerung gerissener, mit unverzinkten und feuerverzinkten Stählen bewehrten Stahlbetonbalken auf Helgoland (1988).
Von <i>Gallus Rehm</i> , <i>Ulf Nürnberger</i> und <i>Bernd Neubert</i> . vergriffen | 400: Erläuterungen zu DIN 1045, Beton und Stahlbeton, Ausgabe 07.88. Zusammengefasst von <i>Dieter Bertram</i> und <i>Norbert Bunke</i> .
Hinweise für die Verwendung von Zement zu Beton.
Von <i>Justus Bonzel</i> und <i>Karsten Rendchen</i> .
Grundlagen der Neuregelung zur Beschränkung der Rissbreite.
Von <i>Peter Schießl</i> .
Erläuterungen zur Richtlinie für Beton mit Fließmitteln und für Fließbeton.
Von <i>Justus Bonzel</i> und <i>Eberhard Siebel</i> .
Erläuterungen zur Richtlinie Alkali-Reaktion im Beton (1989). 4. Auflage 1994 (3. berichtiger Nachdruck).
Von <i>Justus Bonzel</i> , <i>Jürgen Dahms</i> und <i>Jürgen Krell</i> . vergriffen | 410: Kunststoffbeschichtungen auf ständig durchfeuchtetem Beton – Adhäsionseigenschaften, Eignungsprüfkriterien, Beschichtungsgrundsätze (1990).
Von <i>Michael Fiebrich</i> . 19,40 EUR |
| 391: Biegetragverhalten und Bemessung von Trägern mit Vorspannung ohne Verbund.
Von <i>Josef Zimmermann</i> .
Experimentelle Untersuchung zum Biegetragverhalten von Durchlaufträgern mit Vorspannung ohne Verbund (1988).
Von <i>Bernhard Weller</i> . 24,50 EUR | 401: Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton.
Arbeitskreis: Prüfverfahren – Chlorideindringtiefe.
Leitung: <i>Rupert Springenschmid</i> .
Schnellbestimmung des Chloridgehaltes von Beton.
Von <i>Horst Dörner</i> , <i>Günter Kleiner</i> .
Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton durch Direktpotentiometrie. (1989).
Von <i>Horst Dörner</i> . vergriffen | 411: Untersuchungen über das Tragverhalten von Köcherfundamenten (1990).
Von <i>Georg-Wilhelm Mainka</i> und <i>Heinrich Paschen</i> . 21,50 EUR |
| | | 412: Mindestbewehrung zwangbeanspruchter dicker Stahlbetonbauteile (1990).
Von <i>Manfred Helmus</i> . 23,50 EUR |
| | | 413: Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Druckfestigkeit des gerissenen Stahlbetons bei einer Querkzugbeanspruchung (1990).
Von <i>Johann Kollegger</i> und <i>Gerhard Mehlhorn</i> . 26,60 EUR |
| | | 414: Versuche zur Ermittlung von Schalungsdruck und Schalungsreibung im Gleitbau (1990).
Von <i>Karl Kordina</i> und <i>Siegfried Droese</i> . 18,40 EUR |

- | Heft | Heft | Heft |
|---|--|---|
| 415: Programmgesteuerte Berechnung beliebiger Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft (Programm MASQUE) (1990).
Von Dirk Busjaeger und Ulrich Quast.
29,70 EUR | 427: Verminderte Schubdeckung in Betonträgern mit Fugen parallel zur Tragrichtung bei sehr hohen Schubspannungen und nicht vorwiegend ruhenden Lasten (1992).
Von Ferdinand Daschner und Herbert Kupfer.
13,30 EUR | 440: Untersuchung zur Durchlässigkeit von faserfreien und faserverstärkten Betonbauteilen mit Trennrissen.
Von Masaaki Tsukamoto.
Gitterschnittkennwert als Kriterium für die Adhäsionsgüte von Oberflächenschutzsystemen auf Beton (1994).
Von Michael Fiebrich.
17,40 EUR |
| 416: Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen – Sachstandsbericht (1991).
Von Thomas Fehlhaber, Gert König, Siegfried Mängel, Hermann Poll, Hans-Wolf Reinhardt, Carola Reuter, Peter Schießl, Bernd Schnütgen, Gerhard Spanka, Friedhelm Stangenberg, Gerd Thielen und Johann-Dietrich Wörner.
35,80 EUR | 428: Entwicklung eines Expertensystems zur Beurteilung, Beseitigung und Vorbeugung von Oberflächenschäden an Betonbauteilen (1992).
Von Michael Sohni.
19,40 EUR | 441: Physikalisch nichtlineare Berechnung von Stahlbetonplatten im Vergleich zur Bruchlinientheorie (1994).
Von Andreas Pardey.
34,80 EUR |
| 417: Stahlbeton- und Spannbetonbauteile bei extrem tiefer Temperatur – Versuche und Berechnungsansätze für Lasten und Zwang (1991).
Von Uwe Pusch und Ferdinand S. Rostásy.
21,50 EUR | 429: Der Einfluss mechanischer Spannungen auf den Korrosionswiderstand zementgebundener Baustoffe (1992).
Von Ulrich Schneider, Erich Nägele, Frank Dumat und Steffen Holst.
19,40 EUR | 442: Versuche zum Kriechen von Beton bei mehrachsiger Beanspruchung – Auswertung auf der Basis von errechneten elastischen Anfangsverformungen.
Von Henric Bierwirth, Siegfried Stöckl und Herbert Kupfer.
Kriechen, Rückkriechen und Dauerstandfestigkeit von Beton bei unterschiedlichem Feuchtegehalt und Verwendung von Portlandzement bzw. Portlandkalksteinzement (1994).
Von Dirk Nechvatal, Siegfried Stöckl und Herbert Kupfer.
19,40 EUR |
| 418: Warmbehandlung von Beton durch Mikrowellen (1991).
Von Ulrich Schneider und Frank Dumat.
28,60 EUR | 430: Standardisierte Nachweise von häufigen D-Bereichen (1992).
Von Mattias Jennwein und Kurt Schäfer.
19,40 EUR | 443: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen – Sachstandsbericht – (1994).
Von H. Rainer Sasse u. a.
49,10 EUR |
| 419: Bruchmechanisches Verhalten von Beton unter monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung (1991).
Von Herbert Duda.
16,40 EUR | 431: Spannungsumlagerungen in Verbundquerschnitten aus Fertigteilen und Ortbeton statisch bestimmter Träger infolge Kriechen und Schwinden unter Berücksichtigung der Rissbildung (1992).
Von Günther Ackermann, Erich Raue, Lutz Ebel und Gerhard Setzpfandt.
15,30 EUR | 444: Zum Zug- und Schubtragverhalten von Bauteilen aus hochfestem Beton (1994).
Von Gerd Remmel.
22,50 EUR |
| 420: Versuche zum Kriechen und zur Restfestigkeit von Beton bei mehrachsiger Beanspruchung.
Von Norbert Lanig, Siegfried Stöckl und Herbert Kupfer.
Kriechen von Beton nach langer Lasteinwirkung.
Von Norbert Lanig und Siegfried Stöckl.
Frühe Kriechverformungen des Betons (1991).
Von Heinrich Trost und Hans Paschmann.
23,50 EUR | 432: Lineare und nichtlineare Theorie des Kriechens und der Relaxation von Beton unter Druckbeanspruchung (1992).
Von Jing-Hua Shen.
12,30 EUR | 445: Zum Eindringverhalten von Flüssigkeiten und Gasen in ungerissenen Beton.
Von Thomas Fehlhaber.
Eindringverhalten von Flüssigkeiten in Beton in Abhängigkeit von der Feuchte der Probekörper und der Temperatur.
Von Massimo Sosoro und Hans-Wolf Reinhardt.
Untersuchung der Dichtheit von Vakuumbeton gegenüber wassergefährdenden Flüssigkeiten (1994).
Von Reinhard Frey und Hans-Wolf Reinhardt.
26,60 EUR |
| 421: Entwicklung radiographischer Untersuchungsmethoden des Verbundverhaltens von Stahl und Beton (1991).
Von Andrea Steinwedel.
21,50 EUR | 433: Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton (1992).
Von Michael Raupach.
22,50 EUR | 446: Modell zur Vorhersage des Eindringverhaltens von organischen Flüssigkeiten in Beton (1995).
Von Massimo Sosoro.
16,40 EUR |
| 422: Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048 (1991).
Zusammengestellt von Norbert Bunke.
31,70 EUR | 434: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff (1993).
Von Franz Sybertz.
22,50 EUR | 447: Versuche zum Verhalten von Beton unter dreiachsiger Kurzzeitbeanspruchung.
Tests on the Behaviour of Concrete under Triaxial Shorttime Loading.
Von Ulrich Scholz, Dirk Nechvatal, Helmut Aschl, Diethelm Linse, Emil Grasser und Herbert Kupfer.
Auswertung von Versuchen zur mehrachsigen Betonfestigkeit, die an der Technischen Universität München durchgeführt wurden.
Evaluation of the Multiaxial Strength of Concrete Tested at Technische Universität München.
Von Zhenhai Guo, Yunlong Zhou und Dirk Nechvatal.
Versuche zur Methode der Verformungsmessung an dreiachsig beanspruchten Betonwürfeln.
Tests on Methods for Strain Measurements on Cubic Specimen of Concrete under Triaxial Loading (1995).
Von Christian Dialer, Norbert Lanig, Siegfried Stöckl und Célestin Zelger.
24,50 EUR |
| 423: Experimentelle Untersuchungen des Trag- und Verformungsverhaltens schlanker Stahlbetondruckglieder mit zweiachsiger Ausmitte.
Von Rainer Grzeschkowitz, Karl Kordina und Manfred Teutsch.
Erweiterung von Traglastprogrammen für schlanke Stahlbetondruckglieder (1992).
Von Rainer Grzeschkowitz und Ulrich Quast.
22,50 EUR | 435: Zur Spannungsumlagerung im Spannbeton bei der Rissbildung unter statischer und wiederholter Belastung (1993).
Von Nguyen Viet Tue.
17,40 EUR | |
| 424: Tragverhalten von Befestigungen unter Querlasten in ungerissenen Beton (1992).
Von Werner Fuchs.
27,60 EUR | 436: Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton (1993).
Von Dieter Bunte.
26,60 EUR | |
| 425: Bemessungshilfsmittel zu Eurocode 2 Teil 1 (DIN V ENV 1992 Teil 1-1, Ausgabe 06.92).
Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken (1992).
3. ergänzte Auflage 1997.
Von Karl Kordina u. a.
38,90 EUR | 437: Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung – Versuche und Modellbildung – (1994).
Von Karl-Christian Thienel.
21,50 EUR | |
| 426: Einfluss der Probekörperform auf die Ergebnisse von Ausziehversuchen – Finite-Element-Berechnung – (1992).
Von Jürgen Mainz und Siegfried Stöckl.
18,40 EUR | 438: Hochfester Beton, Sachstandsbericht, Teil 1: Betontechnologie und Betoneigenschaften.
Von Ingo Schrage.
Teil 2: Bemessung und Konstruktion (1994).
Von Gert König, Harald Bergner, Rainer Grimm, Markus Held, Gerd Remmel und Gerd Simsch.
18,40 EUR | |
| | 439: Ermüdungsfestigkeit von Stahlbeton und Spannbetonbauteilen mit Erläuterungen zu den Nachweisen gemäß CEB-FIP. Model Code 1990 (1994).
Von Gert König und Ireneusz Danielewicz.
20,50 EUR | |

Heft

- 448: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften (1995).
Von *Reiner Hårdtl*. 17,40 EUR
- 449: Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk bei früh einsetzendem Temperaturzwang (1995).
Von *Peter Onken* und *Ferdinand S. Rostásy*. 19,40 EUR
- 450: Prüfverfahren und Untersuchungen zum Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen in Beton sowie zum chemischen Widerstand von Beton.
Von *Hans Paschmann*, *Horst Grube* und *Gerd Thielen*.
Untersuchungen zum Eindringen von Flüssigkeiten in Beton sowie zur Verbesserung der Dichtheit des Betons (1995).
Von *Hans Paschmann*, *Horst Grube* und *Gerd Thielen*. 22,50 EUR
- 451: Beton als sekundäre Dichtbarriere gegenüber umweltgefährdenden Flüssigkeiten (1995).
Von *Michael Aufrecht*. vergriffen
- 452: Wöhlerlinien für einbetonierte Spanngliedkopplungen.
– Dauerschwingversuche an Spanngliedkopplungen des Litzenspannverfahrens D & W.
Von *Gert König* und *Roland Sturm*.
– Dauerschwingversuche an Spanngliedkopplungen des Bündelspanngliedes BBRV-SUSPA II (1995).
Von *Gert König* und *Ireneusz Danielewicz*. 15,30 EUR
- 453: Ein durchgängiges Ingenieurmodell zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit im Bruchzustand von Bauteilen aus Stahlbeton mit und ohne Vorspannung der Festigkeitsklassen C 12 bis C 115 (1995).
Von *Manfred Specht* und *Hans Scholz*. 22,50 EUR
- 454: Tragverhalten von randfernen Kopfbolzenverankerungen bei Betonbruch (1995).
Von *Guochen Zhao*. 19,40 EUR
- 455: Wasserdurchlässigkeit und Selbstheilung von Trennrissen in Beton (1996).
Von *Carola Katharina Edvardsen*. 22,50 EUR
- 456: Zum Schubtragverhalten von Fertigplatten mit Ortbetonergänzung.
Von *Horst Georg Schäfer* und *Wolfgang Schmidt-Kehle*.
Oberflächenrauheit und Haftverbund.
Von *Horst Georg Schäfer*, *Klaus Block* und *Rita Drell*.
Zur Oberflächenrauheit von Fertigplatten mit Ortbetonergänzung.
Von *Horst Georg Schäfer* und *Wolfgang Schmidt-Kehle*.
Ortbetonergänzte Fertigteilbalken mit profilierter Anschlussfuge unter hoher Querkraftbeanspruchung (1996).
Von *Horst Georg Schäfer* und *Wolfgang Schmidt-Kehle*. 28,60 EUR
- 457: Verbesserung der Undurchlässigkeit, Beständigkeit und Verformungsfähigkeit von Beton.
Von *Udo Wiens*, *Fritz Grahn* und *Peter Schießl*.

Heft

- Durchlässigkeit von überdrückten Trennrissen im Beton bei Beaufschlagung mit wassergefährdenden Flüssigkeiten.
Von *Norbert Brauer* und *Peter Schießl*.
Untersuchungen zum Eindringen von Flüssigkeiten in Beton, zur Dekontamination von Beton sowie zur Dichtheit von Arbeitsfugen (1996).
Von *Hans Paschmann* und *Horst Grube*. vergriffen
- 458: Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe – Sachstandsbericht – (1996).
Von *Inga Hohberg*, *Christoph Müller*, *Peter Schießl* und *Gerhard Volland*. vergriffen
- 459: Bemessen von Stahlbetonbalken und -wandscheiben mit Öffnungen (1996).
Von *Hermann Ulrich Hottmann* und *Kurt Schäfer*. 25,60 EUR
- 460: Fließverhalten von Flüssigkeiten in durchgehend gerissenen Betonkonstruktionen (1996).
Von *Christiane Imhof-Zeitler*. 30,70 EUR
- 461: Grundlagen für den Entwurf, die Berechnung und konstruktive Durchbildung lager- und fugenloser Brücken (1996).
Von *Michael Pötzl*, *Jörg Schlaich* und *Kurt Schäfer*. 20,50 EUR
- 462: Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Baustoffe – Sachstandsbericht (1996).
Von *Peter Grübl* u. a. 30,70 EUR
- 463: Contec ES – Computer Aided Consulting für Betonoberflächenschäden (1996).
Von *Gabriele Funk*. vergriffen
- 464: Sicherheitserhöhung durch Fugenverminderung – Spannbeton im Umweltbereich.
Von *Jens Schütte*, *Manfred Teutsch* und *Horst Falkner*.
Fugen in chemisch belasteten Betonbauteilen.
Von *Hans-Werner Nordhues* und *Johann-Dietrich Wörner*.
Durchlässigkeit und konstruktive Konzeption von Fugen (Fertigteilverbindungen) (1996).
Von *Marko Bida* und *Klaus-Peter Grote*. 29,70 EUR
- 465: Dichtschichten aus hochfestem Faserbeton.
Von *Martina Lemberg*.
Dichtheit von Faserbetonbauteilen (synthetische Fasern) (1996).
Von *Johann-Dietrich Wörner*, *Christiane Imhof-Zeitler* und *Martina Lemberg*. 27,60 EUR
- 466: Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton sowie Kommentare, Hintergrundinformationen und Anwendungsbeispiele zu den Regelungen nach DIN 1045. EC2 und Model Code 90 (1996).
Von *Gert König* und *Nguyen Viet Tue*. 20,50 EUR
- 467: Verstärken von Betonbauteilen – Sachstandsbericht – (1996).
Von *Horst Georg Schäfer* u. a. 17,40 EUR

Heft

- 468: Stahlfaserbeton für Dicht- und Verschleißschichten auf Betonkonstruktionen.
Von *Burkhard Wienke*.
Einfluss von Stahlfasern auf das Verschleißverhalten von Betonen unter extremen Betriebsbedingungen in Bunkern von Abfallbehandlungsanlagen (1996).
Von *Thomas Höcker*. 25,60 EUR
- 469: Schadensablauf bei Korrosion der Spannbewehrung (1996).
Von *Gert König*, *Nguyen Viet Tue*, *Thomas Bauer* und *Dieter Pommerning*. 15,30 EUR
- 470: Anforderungen an Stahlbetonlager thermischer Behandlungsanlagen für feste Siedlungsabfälle.
Von *Georg Zimmermann*.
Temperaturbeanspruchungen in Stahlbetonlagern für feste Siedlungsabfälle (1996).
Von *Ralf Brüning*. 34,80 EUR
- 471: Zum Bruchverhalten von hochfestem Beton bei einer Zugbeanspruchung durch formschlüssige Verankerungen (1997).
Von *Ralf Zeitler*. 16,40 EUR
- 472: Segmentbalken mit Vorspannung ohne Verbund unter kombinierter Beanspruchung aus Torsion, Biegung und Querkraft.
Von *Horst Falkner*, *Manfred Teutsch* und *Zhen Huang*.
Eurocode 8: Tragwerksplanung von Bauten in Erdbebengebieten Grundlagen, Anforderungen. Vergleich mit DIN 4149 (1997).
Von *Dan Constantinescu*. 15,30 EUR
- 473: Zum Verbundtragverhalten laschenverstärkter Betonbauteile unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung.
Von *Christoph Hankers*.
Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile (1997).
Von *Peter Holzenkämpfer*. 28,60 EUR
- 474: Injizierte Risse unter Medien- und Lasteinfluss.
Teil I: Grundlagenversuche.
Von *Horst Falkner*, *Manfred Teutsch*, *Thies Claußen*, *Jürgen Günther* und *Sabine Rohde*.
Teil 2: Bauteiluntersuchungen.
Von *Hans-Wolf Reinhardt*, *Massimo Sosoro*, *Friedrich Paul* und *Xiao-feng Zhu*.
Oberflächenschutzmaßnahmen zur Erhöhung der chemischen Dichtungswirkung.
Von *Klaus Littmann*.
Korrosionsschutz der Bewehrung bei Einwirkung umweltgefährdender Flüssigkeiten (1997).
Von *Romain Weydert* und *Peter Schießl*. 26,60 EUR
- 475: Transport organischer Flüssigkeiten in Betonbauteilen mit Mikro- und Biegerissen.
Von *Xiao-feng Zhu*.
Eindring- und Durchströmungsvorgänge umweltgefährdender Stoffe an feinen Trennrissen in Beton (1997).
Von *Detlef Bick*, *Heiner Cordes* und *Heinrich Trost*. 26,60 EUR

- | Heft | Heft | Heft |
|--|---|--|
| 476: Zuverlässigkeit des Verpressens von Spannkämen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten auf der Baustelle (1997).
Von <i>Ferdinand S. Rostásy</i> und <i>Alex-W. Gutsch</i> . 24,50 EUR | 489: Mindestbewehrung für verformungsbehinderte Betonbauteile im jungen Alter (1998).
Von <i>Udo Paas</i> . 22,50 EUR | 503: Untersuchungen zum Einfluss der bezogenen Rippenfläche von Bewehrungsstäben auf das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen im Gebrauchs- und Bruchzustand (2000).
Von <i>Rolf Eligehausen</i> und <i>Utz Mayer</i> . 19,90 EUR |
| 477: Einfluss bruchmechanischer Kenngrößen auf das Biege- und Schubtragverhalten hochfester Betone (1997).
Von <i>Rainer Grimm</i> . 26,60 EUR | 490: Beschichtete Bewehrung, Ergebnisse sechsjähriger Auslagerungsversuche. Von <i>Klaus Menzel</i> , <i>Frank Schulze</i> und <i>Hans-Wolf Reinhardt</i> . Kontinuierliche Ultraschallmessung während des Erstarrens und Erhärtens von Beton als Werkzeug des Qualitätsmanagements (1998).
Von <i>Hans-Wolf Reinhardt</i> , <i>Christian U. Große</i> und <i>Alexander Herb</i> . 17,40 EUR | 504: Schubtragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit rezyklierten Zuschlägen (2000).
Von <i>Sufang Lü</i> . 23,50 EUR |
| 478: Tragfähigkeit von Druckstreben und Knoten in D-Bereichen (1997).
Von <i>Wolfgang Sundermann</i> und <i>Kurt Schäfer</i> . 27,60 EUR | 491: Der Einfluss der freien Schwingungen auf ausgewählte dynamische Parameter von Stahlbetonbiegeträgern (1999).
Von <i>Manfred Specht</i> und <i>Michael Kramp</i> . 29,70 EUR | 505: Biegetragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit rezyklierten Zuschlägen (2000).
Von <i>Matthias Meißner</i> . 27,60 EUR |
| 479: Über das Brandverhalten punktgestützter Stahlbetonplatten (1997).
Von <i>Karl Kordina</i> . 24,50 EUR | 492: Nichtlineares Last-Verformungs-Verhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen, Verformungsvermögen und Schnittgrößenermittlung (1999).
Von <i>Gert König</i> , <i>Dieter Pommerening</i> und <i>Nguyen Viet Tue</i> . 25,60 EUR | 506: Verwertung von Brechsand aus Bauschutt (2000).
Von <i>Christoph Müller</i> und <i>Bernd Dora</i> . 23,50 EUR |
| 480: Versagensmodell für schubschlanke Balken (1997).
Von <i>Jürgen Fischer</i> . 18,40 EUR | 493: Leitfaden für die Erfassung und Bewertung der Materialien eines Abbruchobjektes (1999).
Von <i>Theo Rommel</i> , <i>Wolfgang Katzer</i> , <i>Gerhard Tauchert</i> und <i>Jie Huang</i> . 17,90 EUR | 507: Betonkennwerte für die Bemessung und Verbundverhalten von Beton mit rezykliertem Zuschlag (2000).
Von <i>Konrad Zilch</i> und <i>Frank Roos</i> . 18,40 EUR |
| 481: Sicherheitskonzept für Bauten des Umweltschutzes.
Von <i>Daniela Kiefer</i> . Erfahrungen mit Bauten des Umweltschutzes.
Von <i>Johann-Dietrich Wörner</i> , <i>Daniela Kiefer</i> und <i>Hans-Werner Nordhues</i> . Qualitätskontrollmaßnahmen bei Betonkonstruktionen (1997).
Von <i>Otto Kroggel</i> . 20,50 EUR | 494: Tragverhalten von Stahlfaserbeton (1999).
Von <i>Yong-zhi Lin</i> . 22,50 EUR | 508: Zulässige Toleranzen für die Abweichungen der mechanischen Kennwerte von Beton mit rezykliertem Zuschlag (2000).
Von <i>Johann-Dietrich Wörner</i> , <i>Pieter Moerland</i> , <i>Sabine Giebenhain</i> , <i>Harald Kloft</i> und <i>Klaus Leiblein</i> . 15,90 EUR |
| 482: Rissbreitenbeschränkung zwangbeanspruchter Bauteile aus hochfestem Normalbeton (1997).
Von <i>Harald Bergner</i> . 24,50 EUR | 495: Stoffeigenschaften jungen Betons; Versuche und Modelle (1999).
Von <i>Alex-W. Gutsch</i> . 28,10 EUR | 509: Bruchmechanisches Verhalten jungen Betons (2000).
Von <i>Karim Hariri</i> . 23,50 EUR |
| 483: Durchlässigkeitsgesetze für Flüssigkeiten mit Feinstoffanteilen bei Betonbunkern von Abfallbehandlungsanlagen.
Von <i>Klaus-Peter Grote</i> . Einfluss von Stahlfasern auf die Durchlässigkeit von Beton (1997).
Von <i>Ralf Winterberg</i> . 21,50 EUR | 496: Entwerfen und Bemessen von Betonbrücken ohne Fugen und Lager (1999).
Von <i>Stephan Engelsmann</i> , <i>Jörg Schlaich</i> und <i>Kurt Schäfer</i> . 24,50 EUR | 510: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion (2000).
Von <i>Christoph Gehlen</i> . 23,00 EUR |
| 484: Grenzen der Anwendung nichtlinearer Rechenverfahren bei Stabtragwerken und einachsiger gespannten Platten.
Von <i>Rolf Eligehausen</i> und <i>Eckhart Fabritius</i> . Rotationsfähigkeit von plastischen Gelenken im Stahl- und Spannbetonbau.
Von <i>Longfei Li</i> . Verdrehfähigkeit plastizierter Tragwerksbereiche im Stahlbetonbau (1998).
Von <i>Peter Langer</i> . 35,80 EUR | 497: Entwicklung von Verfahren zur Beurteilung der Kontaminierung der Baustoffe vor dem Abbruch (Schnellprüfverfahren) (2000).
Von <i>Jochen Stark</i> und <i>Peter Nobst</i> . 19,90 EUR | 511: Hydroabrasionsverschleiß von Betonoberflächen.
Beton und Mörtel für die Instandsetzung verschleißgeschädigter Betonbauteile im Wasserbau (2000).
Von <i>Gesa Haroske</i> , <i>Jan Vala</i> und <i>Ulrich Diederichs</i> . 26,10 EUR |
| 485: Verwendung von Bitumen als Gleitschicht im Massivbau.
Von <i>Manfred Curbach</i> und <i>Thomas Bösche</i> . Versuche zur Eignung industriell gefertigter Bitumenbahnen als Bitumengleitschicht (1998).
Von <i>Manfred Curbach</i> und <i>Thomas Bösche</i> . 20,50 EUR | 498: Kriechen von Beton unter Zugbeanspruchung (2000).
Von <i>Karl Kordina</i> , <i>Lothar Schubert</i> und <i>Uwe Troitzsch</i> . 15,90 EUR | 512: Zwang und Rissbildung infolge Hydrationswärme – Grundlagen Berechnungsmodelle und Tragverhalten (2000).
Von <i>Benno Eierle</i> und <i>Karl Schikora</i> . 26,10 EUR |
| 486: Trag- und Verformungsverhalten von Rahmenknoten (1998).
Von <i>Karl Kordina</i> , <i>Manfred Teutsch</i> und <i>Erhard Wegener</i> . 32,70 EUR | 499: Tragverhalten von stumpf gestoßenen Fertigteilstützen aus hochfestem Beton (2000).
Von <i>Jens Minnert</i> . 27,60 EUR | 513: Beton als kreislaufgerechter Baustoff (2001).
Von <i>Christoph Müller</i> . 62,40 EUR |
| 487: Dauerhaftigkeit hochfester Betone (1998).
Von <i>Ulf Guse</i> und <i>Hubert K. Hilsdorf</i> . 18,40 EUR | 500: BiM-Online – Das interaktive Informationssystem zu „Baustoffkreislauf im Massivbau“ (2000).
Von <i>Hans-Wolf Reinhardt</i> , <i>Marcus Schreyer</i> und <i>Joachim Schwarte</i> . 20,50 EUR | 514: Einfluss von rezykliertem Zuschlag aus Betonbruch auf die Dauerhaftigkeit von Beton.
Von <i>Beatrix Kerkhoff</i> und <i>Eberhard Siebel</i> . Einfluss von Feinstoffen aus Betonbruch auf den Hydrationsfortschritt.
Von <i>Walter Wassing</i> . Recycling von Beton, der durch eine Alkalireaktion gefährdet oder bereits geschädigt ist.
Von <i>Wolfgang Aue</i> . Frostwiderstand von rezykliertem Zuschlag aus Altbeton und mineralischen Baustoffgemischen (Bauschutt) (2001).
Von <i>Stefan Wies</i> und <i>Wilhelm Manns</i> . 52,90 EUR |
| 488: Sachstandsbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau (1998).
Von <i>Manfred Curbach</i> u. a. 21,50 EUR | 501: Tragverhalten und Sicherheit betonstahlbewehrter Stahlfaserbetonbauteile (2000).
Von <i>Ulrich Gossila</i> . 19,40 EUR | |
| | 502: Witterungsbeständigkeit von Beton. 3. Bericht (2000).
Von <i>Wilhelm Manns</i> und <i>Kurt Zeus</i> . 16,90 EUR | |

Heft	Heft	Heft
515: Analytische und numerische Untersuchungen des Durchstanzenverhaltens punktgestützter Stahlbetonplatten (2001). Von <i>Markus Anton Staller</i> . 41,40 EUR	523: Beständigkeit verschiedener Betonarten im Meerwasser und in sulfathaltigem Wasser. Von <i>Ottokar Hallauer</i> . 91,50 EUR	534: Sicherheitskonzept für nichtlineare Traglastverfahren im Betonbau (2003). Von <i>Michael Six</i> . 49,40 EUR
516: Sachstandbericht Selbstverdichtender Beton (SVB) (2001). Von <i>Hans-Wolf Reinhardt, Wolfgang Brameshuber, Geraldine Buchenau, Frank Dehn, Horst Grube, Peter Grübl, Bernd Hillemeier, Martin Jooß, Bert Kilanowski, Thomas Krüger, Christoph Lemmer, Viktor Mechterine, Harald Müller, Thomas Müller, Markus Planer, Andreas Rogge, Andreas Schaab, Angelika Schießl und Stephan Uebachs</i> . 32,20 EUR	524: Mehraxiale Festigkeit von duktilem Hochleistungsbeton (2002). Von <i>Manfred Curbach und Kerstin Speck</i> . 65,00 EUR	535: Rotationsfähigkeit von Rahmenecken (2002). Von <i>Jan Akkermann und Josef Eibl</i> . 41,60 EUR
517: Verformungsverhalten und Tragfähigkeit dünner Stege von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit hoher Betongüte (2001). Von <i>Karl-Heinz Reineck, Rolf Wohlfahrt und Harianto Hardjasaputra</i> . 51,60 EUR	525: Erläuterungen zu DIN 1045-1. 62,90 EUR	537: Zum Einfluss der Oberflächengestalt von Rippenstählen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen (2003). Von <i>Utz Mayer</i> . 42,10 EUR
518: Schubtragfähigkeit längsbewehrter Porenbetonbauteile ohne Schubbewehrung. Thermische Vorspannung bewehrter Porenbetonbauteile. Kriechen von unbewehrtem Porenbeton. Kriechen des Porenbetons im Bereich der zur Verankerung der Längsbewehrung dienenden Querstäbe und Tragfähigkeit der Verankerung (2001). Von <i>Ferdinand Daschner und Konrad Zilch</i> . 53,20 EUR	526: Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN 4226. 41,10 EUR	538: Analyse der Transportmechanismen für wassergefährdende Flüssigkeiten in Beton zur Berechnung des Medientransportes in ungerissene und gerissene Betondruckzonen (2002). Von <i>Norbert Brauer</i> . 43,20 EUR
519: Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Zweiter Sachstandsbericht mit Beispielsammlung (2001). Von <i>Rolf Breitenbücher, Franz-Josef Frey, Horst Grube, Wilhelm Kanning, Klaus Lehmann, Hans-Wolf Reinhardt, Bernd Schnütgen, Manfred Teutsch, Günter Timm und Johann-Dietrich Wörner</i> . 49,60 EUR	527: Füllen von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteilen (2006). Von <i>Angelika Eßer</i> . 55,60 EUR	539: Alkalireaktion im Bauwerksbeton. Ein Erfahrungsbericht (2003). Von <i>Wilfried Bödeker</i> . 25,00 EUR
520: Frühe Risse in massigen Betonbauteilen – Ingenieurmodelle für die Planung von Gegenmaßnahmen (2001). Von <i>Ferdinand S. Rostásy und Matias Krauß</i> . 35,30 EUR	528: Schubtragfähigkeit von Betonergänzungen an nachträglich aufgerauten Betonoberflächen bei Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen (2002). Von <i>Konrad Zilch und Jürgen Mainz</i> . 19,80 EUR	540: Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetontragwerken unter Betriebsbelastung (2003). Von <i>Thomas M. Sippel</i> . 26,00 EUR
521: Sachstandbericht Nachhaltig Bauen mit Beton (2001). Von <i>Hans-Wolf Reinhardt, Wolfgang Brameshuber, Carl-Alexander Graubner, Peter Grübl, Bruno Hauer, Katja Hüske, Julian Kümmel, Hans-Ulrich Litzner, Heiko Lünser, Dieter Rußwurm</i> . 29,60 EUR	529: Betonwaren mit Recyclingzuschlägen. Von <i>Christoph Müller und Peter Schießl</i> . Rezyklieren von Leichtbeton (2002). Von <i>Hans-Wolf Reinhardt und Julian Kümmel</i> . 30,70 EUR	541: Das Ermüdungsverhalten von Dübelbefestigungen (2003). Von <i>Klaus Block und Friedrich Dreier</i> . 36,90 EUR
522: Anwendung von hochfestem Beton im Brückenbau. Von <i>Konrad Zilch und Markus Hennecke</i> . Erfahrungen mit Entwurf, Ausschreibung, Vergabe und Tragwerksplanung. Von <i>André Müller, Hans Pfisterer, Jürgen Weber und Konrad Zilch</i> . Erfahrungen mit der Bauausführung und Maßnahmen zur Gewährleistung der geforderten Qualität. Von <i>Markus Hennecke, Gert Leonhardt und Rolf Stahl</i> . Betontechnologie (2002). Von <i>Volker Hartmann und Werner Schrub</i> . 35,80 EUR	530: Nachweise zur Sicherheit beim Abbruch von Stahlbetonbauwerken durch Sprengen. Von <i>Josef Eibl, Andreas Plotzitz, Nico Herrmann, Martin Fenchel</i> . Sprengtechnischer Abbruch, Erprobung und Optimierung (2000). Von <i>Hans-Ulrich Freund, Gerhard Duseberg, Steffen Schumann, Helmut Roller, Walter Werner</i> . 34,80 EUR	542: Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen. Von <i>Inga Hohberg</i> . 49,90 EUR
	531: Großtechnische Versuche zur Nassaufbereitung von Recycling-Baustoffen mit der Setzmaschine. Von <i>Harald Kurkowski und Klaus Mesters</i> . Einflüsse der Aufbereitung von Bauschutt für eine Verwendung als Betonzuschlag. Von <i>Werner Reichel und Petra Heldt</i> . 40,80 EUR	543: Mikrostrukturuntersuchungen zum Sulfatgriff bei Beton (2003). Von <i>Winfried Malorny</i> . 18,70 EUR
	532: Die Bemessung und Konstruktion von Rahmenknoten. Grundlagen und Beispiele gemäß DIN 1045-1(2002). Von <i>Josef Hegger und Wolfgang Roeser</i> . 59,80 EUR	544: Hochfester Beton unter Dauerzuglast (2003). Von <i>Tassilo Rinder</i> . 35,90 EUR
	533: Rechnerische Untersuchung der Durchbiegung von Stahlbetonplatten unter Ansatz wirklichkeitsnaher Steifigkeiten und Lagerungsbedingungen und unter Berücksichtigung zeitabhängiger Verformungen. Von <i>Konrad Zilch und Uli Donaubauer</i> . Zum Trag- und Verformungsverhalten bewehrter Betonquerschnitte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Von <i>Wolfgang Krüger und Olaf Mertzsch</i> (2006). 64,50 EUR	545: Gebrauchsverhalten von Bodenplatten aus Beton unter Einwirkungen infolge Last und Zwang (2004). Von <i>Peter Niemann</i> . 61,90 EUR
		546: Zu Deckenscheiben zusammenge-spannte Stahlbetonfertigteile für demontable Gebäude (2003). Von <i>Georg Christian Weiß</i> . 38,00 EUR
		547: Durchstanzen von Bodenplatten unter rotationssymmetrischer Belastung (2004). Von <i>Maike Timm</i> . 46,80 EUR
		548: Die Druckfestigkeit von gerissenen Scheiben aus Hochleistungsbeton und selbstverdichtendem Beton unter Berücksichtigung des Einflusses der Rissneigung (2005). Von <i>Angelika Schießl</i> . 53,60 EUR
		549: Zum Gebrauchs- und Tragverhalten von Tunnelschalen aus Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärktem Stahlbeton (2004). Von <i>Olaf Hemmy</i> . 70,70 EUR

Heft	Heft	Heft
550: Zur Querkrafttragfähigkeit von Balken aus stahlfaserverstärktem Stahlbeton (2004). Von <i>Joachim Rosenbusch</i> . 45,30 EUR	560: Sachstandbericht „Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse“ (2005). Von <i>E. Siebel, W. Brameshuber, Ch. Brandes, U. Dahme, F. Dehn, K. Dombrowski, V. Feldrappe, U. Frohburg, U. Guse, A. Huß, E. Lang, L. Lohaus, Ch. Müller, H. S. Müller, S. Palecki, L. Petersen, P. Schröder, M. J. Setzer, F. Weise, A. Westendarp, U. Wiens</i> . 34,30 EUR	567: Sachstandbericht „Frischbetondruck fließfähiger Betone“ (2006). Von <i>C.-A. Graubner, H. Beitzel, M. Beitzel, W. Brameshuber, M. Brunner, F. Dehn, S. Glowienka, R. Hertle, J. Huth, O. Leitzbach, L. Meyer, Ch. Motzko, H. S. Müller, H. Schuon, T. Proske, M. Rathfelder, S. Uebachs</i> . 23,40 EUR
551: Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton (2005). Von <i>Udo Wiens</i> . 60,30 EUR	561: Sachstandbericht „Ultrahochfester Beton“ (2008). Von <i>M. Schmidt, R. Bornemann, K. Bunje, F. Dehn, K. Droll, E. Fehling, S. Greiner, J. Horvath, E. Kleen, Ch. Müller, K.-H. Reineck, I. Schachinger, T. Teichmann, M. Teutsch, R. Thiel, N. V. Tue</i> . 37,40 EUR	568: Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion – Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken (2007). Von <i>Sascha Lay</i> . 45,00 EUR
552: Randbedingungen bei der Instandsetzung nach dem Schutzprinzip W bei Bewehrungskorrosion im karbonatisierten Beton (2005). Von <i>Romain Weydert</i> . 36,70 EUR	562: Eigenschaften von wärmebehandeltem Selbstverdichtendem Beton (2006). Von <i>Michael Stegmaier</i> . 52,00 EUR	569: Sachstandbericht „Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff – Sachstand und Szenarien für die Anwendung in Deutschland“. Von <i>O. Aßbrock, W. Brameshuber, A. Ehrenberg, D. Heinz, E. Lang, Ch. Müller, R. Pierkes, E. Siebel</i> . 31,70 EUR
553: Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerkswände – Nichtlineares Berechnungsmodell und konsistentes Bemessungskonzept für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung (2005). Von <i>Christian Glock</i> . 64,50 EUR	563: Zur wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion von hochfesten Spannstählen – Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Spannbetonbauteilen (2005). Von <i>Jörg Moersch</i> . 36,90 EUR	570: Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbetonen. Von <i>Patrick Fontana</i> . 36,40 EUR
554: Sachstandbericht „Sulfatangriff auf Beton“ (2006). Von <i>R. Breitenbücher, D. Heinz, K. Lipus, J. Paschke, G. Thielen, L. Urbanos, F. Wisotzky</i> . 48,40 EUR	564: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (2006). Von <i>Timo Wüstholtz</i> . 43,20 EUR	571: Konzentrierte Lasteinleitung in dünnwandige Bauteile aus textilbewehrtem Beton. Von <i>Manfred Curbach, Kerstin Speck</i> . 34,80 EUR
555: Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ (2006). 17,20 EUR	565: Zerstörungsfreie Prüfverfahren und Bauwerksdiagnose im Betonbau – Beiträge zur Fachtagung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 11.03.2005 Berlin (2006). 26,50 EUR	572: Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“. 93,10 EUR
556: Probabilistischer Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen gegen frühe Trennrisse in massigen Betonbauteilen (2006). Von <i>Matias Krauß</i> . 49,90 EUR	566: Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Stahlbetonbalken mit großen Öffnungen (2007). Von <i>Martina Schnellenbach-Held, Stefan Ehmann, Carina Neff</i> . 34,50 EUR	573: Korrosionsmonitoring und Bruchortung vorgespannter Zugglieder in Bauwerken. Von <i>Alexander Holst</i> . In Vorbereitung
557: Querkrafttragfähigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normal- und Hochleistungsbeton (2007). Von <i>Josef Hegger, Stephan Görtz</i> . 33,80 EUR		
558: Zur Dauerhaftigkeit von AR-Glasbewehrung in Textilbeton (2005). Von <i>Jeanette Orlowsky</i> . 33,80 EUR		
559: Herstellungszustand verformungsbehinderter Bodenplatten aus Beton (2006). Von <i>Silke Agatz</i> . 34,30 EUR		

Hinweis auf überarbeitete und ergänzte Hefte der Schriftenreihe des DAfStb:

Heft 220: 2. überarbeitete Auflage 1991

Heft 240: 3. überarbeitete Auflage 1991 (vergriffen)

Heft 400: 4. Auflage 1994 (3. berichtiger Nachdruck) vergriffen

Heft 425: 3. ergänzte Auflage 1997



ISBN 978-3-410-65045-4