Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

1.1 Motivation 1

1.2 Entwicklung von Normalbeton über hochfesten Beton zu ultrahochfestem Beton 4

1.3 Gliederung der Arbeit 13

2 Tragverhalten von UHFFB 15

2.1 Materialfestigkeiten und weitere Kennwerte 15

2.1.1 Einleitende Bemerkungen 15

2.1.2 Eigenschaften des UHFFB Ductal® 16

2.1.3 Eigene Versuche zur Festigkeitsermittlung 16

2.2 Faserorientierung 21

2.3 Beschreibung des Zugtragverhaltens von UHFFB 25

2.3.1 Spannungs-Rissbreiten- und Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für UHFFB 25

2.3.2 Anwendung der Materialgesetze auf Biegeprismen 28

2.4 Besonderheiten bei der Faserausrichtung 31

2.5 Lastwechsel unter kombinierter Momenten- und Normalkraftbeanspruchung 33

2.5.1 Versuchsbeschreibung und –durchführung 33

2.5.2 Versuchsergebnisse 37

3 Bemessung von UHFFB auf Querschnittsebene 39

3.1 Versuchskörper zur Bestimmung des Materialverhaltens unter Druck- und Zugbelastung 39

3.1.1 Druckfestigkeit und E-Modul 39

3.1.2 Zugfestigkeit 39

3.1.3 Besondere Randbedingungen 42

3.2 Bemessung auf Querschnittsebene 46

3.2.1 Allgemeines 46

3.2.2 Bemessungswert der Druckfestigkeit 47

3.2.3 Bemessungswert der Zugfestigkeit 49

3.2.4 Elastische Verformungseigenschaften 50

3.2.5 Kriechen und Schwinden 51

3.2.6 Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 51

3.2.6.1 Materialgesetz 51

3.2.6.2 Rissbreitenbegrenzung 51

3.2.7 Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit 52
3.2.7.1 Materialgesetze 52
3.2.7.2 Grundlagen zur Bemessung von Biegung mit Längskraft 53

4 Fugenausbildung bei UHFFB-Bauwerken 55
4.1 Mögliche Fugenausbildungen 55
4.2 Ausziehversuche 60
4.2.1 Ausziehen von Fasern bzw. Drähten 60
4.2.2 Ausziehen von Bewehrungsstäben 63
4.3 Kraftschlüssige Verbindung mittels Übergreifungsstoß 68

5 Theoretische Ansätze und Untersuchungen zur Moment-Normalkraft-Interaktion 73
5.1 Probabilistische Bruchmechanik 73
5.1.1 Allgemeines 73
5.1.2 Versagenswahrscheinlichkeit der Matrix mittels Weibull-Theorie 74
5.1.2.1 Einleitende Bemerkungen 74
5.1.2.2 Zentrische Zugbeanspruchung 74
5.1.2.3 Betrachtung der Zugzone von Biegeprismen 76
5.1.3 Versagenswahrscheinlichkeit der Fasern 77
5.1.4 Verhalten des UHFFB unter Zugbeanspruchung 78
5.2 Ansätze für das Zugtragverhalten von Stahlfaserbeton 80
5.2.1 Einleitende Bemerkungen 80
5.2.2 Regelungen für das Zugtragverhalten von Stahlfaserbeton nach DBV u. DAfStb 80
5.2.3 Bewertung der Ansätze von DBV und DAfStb hinsichtlich einer Anwendung für UHFFB 84
5.3 Materialgesetze für UHFFB unter Druck- und Zugbeanspruchung 88
5.3.1 Materialgesetze aufgrund von Versuchen und theoretischen Ansätzen 88
5.3.1.1 Materialgesetze für einaxiale Druckbeanspruchung 88
5.3.1.2 Materialgesetze für einaxiale Zugbeanspruchung 89
5.3.1.3 Mehraxiale Materialgesetze für Druck- und Zugbeanspruchung 91
5.3.2 Überführung der Materialgesetze in FE-Modelle 92
5.3.3 FE-Modell zur Berechnung von Balken und Platten unter kombinierter Momenten-Normalkraft-Beanspruchung 95
5.4 Querschnittsversagen von Balken und einachsig gespannten Platten 96
5.4.1 Nachrechnung der Biegeversuche an 70 mm und 150 mm Prismen 96
5.4.2 M+N-Interaktion an einachsig gespannten, gelenkig gelagerten Platten 98

5.5 Örtlich begrenzte Fehlstellen und Prozesszonenlänge 102
5.5.1 Einleitung und Anmerkungen zur Wahl der Prozesszonenlänge 102
5.5.2 Zentrische Zugversuche an Flachproben mit Kerbung und Öffnung 104
5.6 Momenten-Normalkraft-Interaktionsdiagramm für Platte und Prisma 106

6 Fließlinientheorie und materiell nichtlineare FE-Untersuchungen für Flächentragwerke aus UHFFB 115
6.1 Fließlinientheorie für Platten – Vergleich mit nichtlinearer FE-Rechnung 115
6.1.1 Einleitung und Berechnungsannahmen 115
6.1.2 Einachsig gespannte, beidseitig eingespannte Platte 116
6.1.3 Eingespannte Rechteckplatte 117
6.1.4 Gelenkig gelagerte Quadratplatte 119
6.1.5 Allseitig eingespannte Quadratplatte 120
6.2 Auswirkung von Temperatureinwirkungen 123
6.2.1 Stahlbetontragwerke 123
6.2.2 Tragwerke aus UHFFB 125
6.2.3 Vergleich des Tragverhaltens von Stahlbeton und UHFFB 126
6.3 Randbedingungen beim Entwurf von Wärmespeichern 128
6.3.1 Allgemeine Randbedingungen 128
6.3.2 Wärmespeicher in Friedrichshafen-Wiggenhausen 129
6.3.3 Belastungen 131
6.3.4 Optimierung von Material, Form und Kosten 132
6.3.4.1 Entwicklung von Normalbeton über HFB zu UHFFB 132
6.3.4.2 Formoptimierung 133
6.3.4.3 Kostenoptimierung 140
6.4 Nichtlineare Berechnungsverfahren in Anlehnung an DIN 1045-1 145
6.5 Nichtlineares Tragverhalten unter Gebrauchslasten und Traglast 148
6.5.1 FE-Modell für einen UHFFB-Wärmespeicher mit den Abmessungen des Speichers in Friedrichshafen 148
6.5.2 Spannungsverteilung und Rissbildung unter Gebrauchslasten 149
6.5.3 Traglastuntersuchungen für den UHFFB-Wärmespeicher 151
6.5.3.1 Steigerung der Last auf der oberen Kegelstumpfschale 151
6.5.3.2 Erhöhung des Temperatursprungs über 1 m Wandhöhe 155
6.5.3.3 Erhöhung des Wasserdrucks 156
6.6 Traglastuntersuchungen in Anlehnung an DIN 1045-1 (2001-07) 159

7 Ausblick und mögliche Anwendungen für Schalentragwerke aus UHFFB **165**
7.1 Einleitende Bemerkungen 165
7.2 Hyparschalen 167
7.3 Kuppeln bzw. Kugelschalen 170
7.4 Kegelschalen 175
7.5 Zylinder- bzw. Tonnenschale 176
7.6 Anwendungsbeispiele und Herstellung 178

8 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick **181**

Schrifttum **185**

Lebenslauf **195**