

ZUM TRAGVERHALTEN VON ZUGBEANSPRUCHTEN BAUTEILEN AUS ULTRA-HOCHLEISTUNGS-FASERBETON

THÈSE N° 3429 (2006)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

Institut de structures

SECTION DE GENIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Jörg JUNGWIRTH

Diplom-Ingenieur, Technische Universität München, Allemagne
et de nationalité allemande

acceptée sur proposition du jury:

Prof. A. Muttoni, directeur de thèse
Prof. E. Brühwiler, rapporteur
Prof. E. Fehling, rapporteur
Dr J.-P. Jaccoud, rapporteur

Lausanne, EPFL
2006

Vorwort

Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHLFB) ist ein neuer Werkstoff dessen mechanische Eigenschaften stark von denen des klassischen Betons abweichen: rund 7 mal höhere Druckfestigkeit, rund 4 mal höhere Zugfestigkeit bei einem geringfügig veränderten E-Modul der nur knapp das Doppelte eines normalen Betons erreicht. Trotz der Zugabe von Fasern ist das Tragverhalten relativ spröde mit einer signifikanten Lokalisierung der Verformungen. Aus diesem Grund sind die traditionellen Modelle, die in der Vergangenheit für Betontragwerke entwickelt wurden, nicht mehr anwendbar.

Obwohl dieser Werkstoff bereits für grössere Bauwerke eingesetzt worden ist und sein Tragverhalten seit etwa zehn Jahre intensiv untersucht wurde, basieren die bestehenden Modelle zur Beschreibung des Bauteilverhaltens noch weitgehend auf empirische Ansätze und wichtige Phänomene wie beispielsweise der Massstabeffekt wurden noch wenig untersucht.

Die Doktorarbeit von Jörg Jungwirth setzt bei dieser Problematik an und behandelt erstmalig systematisch die Modellierung von zugbelasteten Bauteilen aus UHLFB ohne und mit Bewehrung bzw. Vorspannung. Das entwickelte Modell erlaubt nicht nur die Festigkeit zu bestimmen, sondern konzentriert sich vielmehr auf die Charakterisierung des mechanischen Verhaltens, welches in einigen Fällen relativ duktil, in anderen Fällen aber auch sehr spröde sein kann. Es zeigt sich, dass nicht nur das mechanische Verhalten des Faserbetons, sondern ebenfalls die Bewehrung und insbesondere die charakteristische Länge des Bauteils eine entscheidende Rolle spielen.

Bezüglich baupraktischer Anwendungen zeigt die Arbeit von Jörg Jungwirth auf, für welchen Bereich der UHLFB eingesetzt werden kann. Bauteile mit einer charakteristischen Länge von nur wenigen Zentimetern, wie beispielsweise dünne Platten, besitzen ein duktileres Verhalten und können entsprechend ohne zusätzliche Bewehrung hergestellt werden. Für Bauteile mit einer charakteristischen Länge in der Grössenordnung von einigen Dezimetern, wie beispielsweise Biegebalken, ist der Einsatz einer zusätzlichen Bewehrung sinnvoll. Für grosse Bauteile, wie Zugstäbe von Fachwerken, Zuggurte von unterspannten Tragwerken oder Balkentragwerke mit grossen Spannweiten, ist der Einsatz einer Vorspannung praktisch unerlässlich.

Die Zukunft dieses neuen Werkstoffes hängt sehr stark davon ab, in wieweit werkstoffangepasste Anwendungen entwickelt werden. Aus diesem Grund ist die vorliegende Arbeit als wichtiger Fortschritt in Richtung einer effizienten und wirtschaftlichen Nutzung dieses innovativen Werkstoffes zu sehen.

Lausanne, Januar 2006

Prof. Dr. Aurelio Muttoni

Zusammenfassung

Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHLFB) ist wegen seiner hohen Druckfestigkeit und seiner verbesserten Dauerhaftigkeit als einer der Innovationen der letzten Jahre im Bauingenieurwesen anzusehen. Materialtechnologen haben durch Optimierung der Betonzusammensetzung und Verbesserung der Packungsdichte einen sehr leistungsfähigen „High-Tech“ Werkstoff entwickelt.

Sein Tragverhalten und insbesondere sein, trotz des spröden Verhaltens der hochfesten Matrix, duktilen Verhalten werden massgebend durch die rissüberbrückende Wirkung der Fasern beeinflusst. Hierdurch wird nicht nur das Zugtragverhalten verbessert, sondern auch die globalen Trageigenschaften des Materials: Biegetragverhalten (Biegezug), Druck (Querzug, Umschnürung), Querkraft, Durchstanzen, konzentrierte Lasteinleitungen, etc...

Die vorliegende Arbeit behandelt das Zugtragverhalten des UHLFB als Grundlage für das globale Tragverhalten. Die Untersuchungen erstrecken sich von der ‚microscale‘ Betrachtung des Verhaltens der rissüberbrückenden Fasern in einem Riss bis zur ‚macroscale‘ Betrachtung von zugbelasteten Bauteilen aus UHLFB. Um ein effizientes Zugtragverhalten zu erhalten, ist es sinnvoll in Kombination mit dem UHLFB Bewehrungselemente einzusetzen. Es wird daher das Verbundverhalten zwischen Bewehrungselementen und UHLFB untersucht, um daraus das Tragverhalten von bewehrten UHLFB Zugelementen zu entwickeln und zu diskutieren.

In allen Betrachtungsebenen wird ausführlich auf das Verständnis der mechanischen Vorgänge eingegangen. Es werden die Einflüsse durch die Faserorientierung, durch Schwinden und Kriechen sowie durch Vorspannung diskutiert. Basierend auf den mechanischen Überlegungen wird eine Modellierung des Tragverhaltens in den verschiedenen Betrachtungsebenen durchgeführt.

Mit der Arbeit werden die Rissbildungsmechanismen des UHLFB erarbeitet. Für das Tragverhalten bewehrter UHLFB-Zugelemente ist hierbei insbesondere der Effekt der doppelten Multirissbildung relevant. Dabei bilden sich zunächst, bedingt durch die Fasern, multiple Mesorisse und folgend, durch den Verbund mit der Bewehrung, multiple Makrorisse aus. Mit der basierend auf diese Mechanismen entwickelten Modellierung, kann das Tragverhalten von Zugelementen aus beliebigen UHLFB gut wiedergegeben werden. In Abhängigkeit der Konfiguration des Zugelements (Typ des UHLFB, Bewehrungsgrad, Stahltyp, Vorspannung) ergeben sich für bewehrte UHLFB-Zugelemente fünf verschiedene Versagensregime.

Für baupraktische Anwendungen können zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Zugelemente aus bewehrtem UHLFB weisen ein sehr effizientes Tragverhalten auf. Die Festigkeit des UHLFB addiert sich entsprechend seines Dehnungs- bzw. Risszustandes zur Stahlfestigkeit. Die fein verteilte Rissbildung des UHLFB führt zu einer erheblichen Erhöhung der Steifigkeit des Zugelements (hoher „tension stiffening“ - Effekt).

Um ein effizientes Zugelement mit einem grossen Verformungsvermögen zu erhalten, ist ein hoher Bewehrungsgrad nötig. Der Einsatz von hochfesten Bewehrungsstählen ohne Fliessplateau ist, aufgrund des kontinuierlich verfestigenden Verhaltens und der grossen elastischen Verformung, zu empfehlen.

Version abrégée

Le béton fibré à ultra haute performance (BFUHP) constitue, grâce à sa résistance à la compression élevée et à sa durabilité améliorée, une des innovations de ces dernières années dans le domaine de la construction. La science des matériaux a développé un matériau « high-tech » très performant par l'optimisation de la composition du béton et par l'amélioration de la densité de sa matrice cimentaire.

Son comportement structural et sa ductilité relativement élevée, malgré le comportement fragile de la matrice, sont principalement influencés par l'effet des fibres qui traversent les fissures formées. Ce phénomène influence non seulement le comportement à la traction, mais aussi le comportement structural des éléments de structure: comportement à la flexion (traction par flexion), compression (traction transversale, confinement), effort tranchant, poinçonnement, introduction ponctuelle des efforts, etc....

La thèse traite le comportement à la traction du BFUHP comme base pour le comportement structural global. L'étude comporte l'analyse à l'échelle microscopique du comportement des fibres traversant une fissure, puis s'élargit vers l'analyse d'un élément de structure en BFUHP soumis à la traction. Pour obtenir un comportement structural efficace à la traction, il est judicieux de disposer une armature dans les éléments structuraux en BFUHP. L'adhérence entre les barres d'armature et le BFUHP est analysée, pour en déduire et comprendre le comportement structural des tirants en BFUHP armé.

L'analyse met l'accent sur la compréhension des processus mécaniques. L'influence de l'orientation des fibres, du retrait et du fluage ainsi que de la précontrainte est discutée. La modélisation du comportement structural se fait sur la base de réflexions mécaniques pour chaque niveau d'analyse.

Ce travail de recherche décrit les mécanismes de fissuration du BFUHP. Pour le comportement structural de tirants en BFUHP armés, l'effet de la « multi fissuration double » est d'importance primordiale. Dans une première phase, les fibres permettent la formation des « meso-fissures multiples », alors que dans une deuxième phase l'adhérence de la matrice aux barres d'armature mène à la formation de « macro-fissures multiples ». La modélisation développée sur la base de ces mécanismes permet de reproduire le comportement structural de tirants en différents types de BFUHP. En fonction de la configuration du tirant (type de BFUHP, taux d'armature, type d'acier, précontrainte) cinq régimes de rupture différents peuvent être mis en évidence.

Pour l'application pratique, les conclusions suivantes peuvent être formulées :

Les tirants en BFUHP armés démontrent un comportement structural efficace. La résistance du BFUHP s'additionne selon son état de déformation ou de fissuration à la résistance de l'acier. La distribution fine de la fissuration du BFUHP amène à une augmentation significative de la rigidité de l'élément en traction (effet « tension-stiffening » élevé).

Pour obtenir un élément de traction efficace avec une grande capacité de déformation, un taux d'armature élevé est nécessaire. L'emploi d'aciers à haute résistance sans plateau d'écoulement est conseillé. La grande déformation élastique et le comportement durcissant continu de ces aciers conduisent à un meilleur comportement du tirant.

Summary

Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) can be considered, due to its high strength and improved durability, as one of the leading recent innovations in civil engineering. Material scientists have developed a very efficient, high-tech material by optimizing the concrete composition and improving the density of the cement matrix.

Its structural behavior and in particular its relatively high ductility, despite the brittle behavior of the cement matrix, is influenced significantly by the crack-bridging behavior of the fibers. This behavior affects not only the tensile behavior, but also the global material behavior, i.e.: bending (tension by bending), compression (transversal tension, confinement), shear, punching, concentrated load introduction, etc.

In the presented study, the tensile behavior of UHPFRC is analyzed as a basis for its structural behavior. The investigations extend from the 'micro-scale' behavior of the crack-bridging fibers in one crack to the 'macro-scale' behavior of tension members composed of UHPFRC. To obtain efficient tensile performance, the use of the UHPFRC in combination with reinforcing bars is expedient. The bond between the reinforcing bars and the UHPFRC is investigated, in order to analyze and understand the structural response of reinforced UHPFRC tension members.

At each level of investigation, emphasis is placed on comprehension of the mechanical process. The influence of the fiber orientation, creep, shrinkage, and pre-stressing is discussed. Based on the studied mechanical processes, micro- and macro-scale modeling of the structural behavior is carried out.

The cracking mechanisms of UHPFRC are examined in the research work. For the structural response of reinforced UHPFRC tension members, the influence of the double multi-cracking behavior is particularly relevant. First, multiple meso-cracks form controlled by the fibers and then multiple macro-cracks form controlled by the bond between the UHPFRC and the reinforcing steel. With a model based on these mechanisms, the structural response of tension members made from different types of UHPFRC can be described. Depending on the configuration of the tension member (i.e.: type of UHPFRC, reinforcement ratio, steel type, pre-stressing), five different failure regimes result for reinforced UHPFRC tension members.

For practical applications the following conclusions can be drawn:

Tension members composed of UHPFRC show very efficient structural behavior. The resistance of the UHPFRC supplements the steel resistance according to its strain-respective cracking state. The well distributed cracking of the UHPFRC leads to a considerable increase in the rigidity of the tension member (high tension stiffening effect).

To obtain an efficient tension member with a large deformation capacity, a relatively high reinforcement ratio is necessary. Due to the associated continuous hardening behavior and significant elastic deformation, the use of high-strength reinforcing steel without a yielding plateau is favorable.

Inhaltsverzeichnis

Begriffe	XVII
Bezeichnungen	XX
<u>1</u> Einleitung	<u>1</u>
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung / Schwerpunkte	1
1.3 Vorgehen	2
<u>2</u> Ultra-Hochleistungs-Faserbeton	<u>3</u>
2.1 Entwicklung des UHLFB	3
2.2 Werkstoffkunde	4
2.3 Typische UHLFB	6
Verwendeter UHLFB	7
<u>3</u> Mikromechanik eines Risses	<u>9</u>
3.1 Verhalten einer rissüberbrückenden Faser	9
Betrachtung am differenziellen Element	10
Mechanische Vorgänge	11
Reissen der Faser	14
3.2 Rissüberbrückendes Verhalten des Faserverbundwerkstoff UHLFB	15
Parallele Fasern	15
Faserorientierung im Raum	17
Schiefwinkliger Faserauszug	21
Rissöffnung einer Fasergruppe	23
3.3 Vergleich mit eigenen Versuchsergebnissen	25
Ungestörte Zugfestigkeit $f_{ct,3D}$	27
Diskussion des Modells	28
3.4 Semi-empirisches Modell der Rissöffnung bei Fasergruppen	29
3.5 Erkenntnisse	33
<u>4</u> Zugverhalten nicht bewehrter UHLFB Bauteile	<u>35</u>
4.1 Belastungsverhalten	35
Ungerissene Matrix	35
Initiale Rissbildung	37
Multirissbildung	39
Rissstabilisierung	40
Belastungsverhalten	41
Risslokalisierung und Rissöffnung	43
4.2 Entfestigendes Rissöffnungsverhalten	44
Verknüpfung zu einem Zugelement (fiktives Rissmodell)	44
Bruchmechanische Betrachtung	48
4.3 Vergleich mit Versuchsergebnissen	53
Zugverhalten	53
Rissöffnung bei f_{ct}	55
Residuale Rissöffnung / Entlastungsmodul	56
Rissöffnungsverlauf und ε_{II}	57

	Ungestörte Zugfestigkeit $f_{ct,3D}$	58
	Bruchenergie.....	59
	Modellierung beliebiger UHLFB.....	61
4.4	Erkenntnisse	63
5	<u>Verbund mit Bewehrungselementen</u>	67
5.1	Betonstahl.....	67
5.2	Verbund.....	70
5.3	Eigene Versuche zur Ermittlung des Verbundverhaltens.....	72
5.4	Verbundmodell für UHLFB	75
5.5	Erkenntnisse	76
6	<u>Zugverhalten von bewehrten UHLFB Bauteilen</u>	79
6.1	Modellbildung	79
	Material.....	79
	Modellschema.....	80
	Regime.....	81
6.2	Belastungsverhalten in den einzelnen Phasen	81
	Ungerissene Matrix.....	81
	Multimesorissbildung (Fasern)	82
	Multimakorissbildung (Bewehrung)	85
	Rissöffnungsverlauf des UHLFB bei n_r Makrorissen.....	88
6.3	Lokalisierung.....	90
	Lokalisierte Verformung des Stahls	92
	Entfestigendes Verhalten des UHLFB.....	93
	Reduziertes Verformungsverhalten	93
	Unterbewehrte und schwach bewehrte Querschnitte	94
6.4	Modellierung des Tragverhaltens	95
	Rechnergestützte Umsetzung.....	97
6.5	Innerer Zwang aus Schwinden, Kriechen und Vorspannung	100
	Schwinden	100
	Vorspannung.....	100
	Kriechen	101
	Gesamtheit der inneren Zwängungen	101
	Modellierung	102
6.6	Eigene Versuche an bewehrten UHLFB-Zugelementen	104
	Rissbildung.....	105
	Versuchsergebnisse	106
	Vorgespanntes Zugelement	108
	Schwinden	109
	Wirksame Zugfestigkeit.....	110
	Zweite Versuchsserie.....	112
6.7	Nachrechnung der Versuche von Michels, Leutbecher und Fischer	114
	Versuche von Michels / Brühwiler	115
	Versuche von Leutbecher / Fehling.....	117
	Versuche von Fischer / Li.....	119
6.8	Erkenntnisse	122
7	<u>Diskussion des Tragverhaltens</u>	125
7.1	Diskussion der Regime.....	125

7.2	Vergleich mit Modell des traditionellen Stahlbetons.....	128
7.3	Einfluss der Bauteillänge.....	130
7.4	Einfluss von innerem Zwang.....	131
	Einfluss des Bewehrungsgrades ρ auf Schwinden und Vorspannung.....	131
	Rissbildung durch Schwinden.....	132
	Einfluss des Schwindens auf das Tragverhalten.....	133
	Einfluss der Vorspannung auf das Tragverhalten.....	135
7.5	Einfluss Faserorientierung und Querschnittsschlankheit.....	135
7.6	Typische Konfigurationen.....	138
7.7	Erkenntnisse.....	139
8	Zusammenfassung und Ausblick	143
8.1	Zusammenfassung.....	143
	Ultra-Hochleistungs-Faserbeton.....	143
	Mikromechanik eines Risses.....	143
	Zugverhalten nicht bewehrter UHLFB Bauteile.....	143
	Verbund mit Bewehrung.....	144
	Zugverhalten von bewehrten UHLFB Bauteilen.....	144
	Diskussion des Tragverhaltens.....	145
8.2	Erkenntnisse.....	145
8.3	Offene Fragen und weiterer Forschungsbedarf.....	147
	Materialverhalten.....	147
	Verbund.....	147
	Zugelemente.....	147
	Druckelemente / Stützen.....	148
	Biegung.....	148
	Durchstanzen.....	148
	Details.....	148
	Bemessung.....	149
	Entwurf.....	149
	Literatur	151
	Anhang	A1
A	Parameterstudie zur Abgrenzung der Regime bewehrten UHLFB-Zugelemente.....	A3
B	Tragverhalten typischer Zuggliedkonfigurationen.....	A11
C	Rechenmodell des Zugtragverhaltens von Bauteilen aus UHLFB – Dokumentation.....	A15
D	Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton – Zusammenfassung.....	A23