

Kurzfassungen in deutscher und englischer Sprache

Mechanisms of the interaction between continuous and short fibres
in Textile-reinforced Concrete (TRC)

Mechanismen der Wechselwirkungen zwischen Endlos- und Kurzfasern
in Textilbewehrtem Beton

Dissertation,
vorgelegt von
M.Sc.-Ing. Rabea Barhum
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird über Untersuchungen zu den Mechanismen der Wechselwirkungen zwischen Kurz- und Endlosfasern in zement-basierenden Hochleistungskompositen berichtet.

Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen auf verschiedene Betrachtungsebenen (Makro-Meso- und Mikroebene) durchgeführt mit dem Ziel, detaillierte Erkenntnisse zu den Auswirkungen der Zugabe von verschiedenen Arten von Kurzfasern (disperse und integrale AR-Glasfasern, Kohlenstofffasern) auf das Festigkeits-, Verformungs- und Bruchverhalten von Textilbeton (engl.: textile-reinforced concrete = TRC) unter Zugbeanspruchung zu gewinnen. Die Bruchflächen sowie die Gestalt der Interphase zwischen der Bewehrung aus Textilien oder Kurzfasern und der umhüllenden zementgebundenen Matrix wurden mit optischen und elektronenmikroskopischen Verfahren hinsichtlich der Wechselwirkungsphänomene ausgewertet. Die Ergebnisse der experimentellen Arbeiten bildeten den Ausgangspunkt für die Formulierung stoffgesetzlicher Beziehungen für TRC mit Kurzfasern unter verformungsgesteuerter Zugbelastung. Die Formulierungen erfolgten auf Grundlage multiskalärer rheologisch-statistischer Modellansätze.

In einer Literatursichtung wurde der Kenntnisstand zu den Materialien und zum Verhalten von TRC und Faserbeton unter Zugbeanspruchung dargestellt und diskutiert. Die noch zu erforschenden Fragen wurden präzisiert und die Grundlagen für deren Untersuchung geschaffen.

Bei den Experimenten auf der Makroebene wurden drei Bewehrungsvarianten betrachtet: a) textile Bewehrung, b) Kurzfaserbewehrung, und c) hybride Bewehrung (Textil und Kurzfasern). An Dehnkörpern wurde die Spannungs-Dehnungsbeziehung unter einachsiger Zugbelastung studiert und dabei das Rissbild und die Phänomene des Faserversagens detailliert beobachtet. Anhand der Spannungs-Dehnungsbeziehungen konnte gezeigt werden, dass die Zugabe von Kurzfasern bei allen untersuchten Kurzfasersorten zu einer erheblichen Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Textilbeton führt. Dies zeigte sich unter anderem in einer ausgeprägten Anhebung der Erstrissspannung sowie der Entwicklung von zahlreicheren und damit feineren Rissen, die zu einer Verbesserung der Duktilität führten. Ebenso wurden Steigerungen der Zugfestigkeit und der Energiedissipation festgestellt. In welchem Maß diese Änderungen stattfinden, hängt von der Art der Kurzfasern ab.

Die Experimente auf der Mikro- und Mesoebene wurden so konzipiert, dass sie die Erkundung der Mechanismen, die den auf der Makroebene beobachteten Phänomenen zugrunde liegen, unterstützen. Auf der Mesoebene wurden Multifilamentgarnauszugversuche (mit und ohne Kurzfasern in der Matrix) und auf der Mikroebene Einzelfaserauszugversuche für alle betrachteten Kurzfasertypen durchgeführt.

Es wurde festgestellt, dass die Kurzfasern den Verbund zwischen Matrix und Multifilamentgarn verbessern. Kurzfasern können bei zufälliger Positionierung an der Garnoberfläche zusätzliche Haftbrücken bzw. Verbindungsstellen zu umgebenden Matrix bilden. Für die Verbundqualität zwischen Faser und Matrix ist der Wasser-Bindemittel-Wert (W/B-Wert) von entscheidender Bedeutung. Bei einer Matrix mit niedrigem W/B-Wert führt die gute Qualität des Verbunds der eingebetteten Faser zu einer Erhöhung der Steifigkeit sowie der Festigkeit des Komposites. Bei hohem W/B-Wert haben die Fasern einen schlechten Verbund zur Matrix und müssen überwiegend als Fehl- bzw. Schwachstellen klassifiziert werden. Festigkeit und Steifigkeit des Komposit nehmen daher ab.

Die Ableitung der stoffgesetzlichen Beziehung für Textilbeton mit Zugabe von Kurzfasern unter verformungsgesteuerter Zugbelastung erfolgte aufbauend auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen auf der Mikroebene. Die Einzelfaserauszugsversuche wurden mit Hilfe eines physikalisch basierten Modelles nachgebildet, das aus einfachen rheologischen Elementen besteht. Phänomene wie die graduelle Ablösung der Faser, Faserbruch und Faserauszug wurden durch eine entsprechende Kombination und Parametrierung der rheologischen Elemente zugelassen. Im Ergebnis wurden zutreffende Kraft-Rissöffnungsbeziehung modelliert.

Auf der Mesoebene wurde ein einzelner Riss modelliert, der sowohl durch Multifilamentgarne als auch Kurzfasern überbrückt werden kann. Die rissüberbrückende Wirkung der zahlreichen Kurzfasern wurde mit Hilfe statistischer Methoden rechnerisch getragen, die unterschiedliche Faser-Risswinkel und Einbindelängen abbilden. Die resultierende Spannungs-Rissöffnungskurve umfasst die rissüberbrückende Wirkung von Multifilamentgarn und Kurzfasern.

Auf der Makroebene kann die charakteristische Spannungs-Dehnungsbeziehung von TRC unter Zugbelastung in 3 Bereiche (Zustände I, IIa, IIb) unterteilt werden. Die Kurvenverläufe im Zustand I (ungerissenen) sowie Zustand IIb (abgeschlossenes Rissbild) wurden als linear betrachtet und basierend auf den entsprechenden charakteristischen Werten des jeweiligen Zustands beschrieben. Das Verhalten im Zustand IIa (multiple Rissbildung) wurde durch die Reihenschaltung einer zunehmenden Anzahl von Rissen sowie den Beitrags der ungerissenen Matrix zwischen den Rissen modelliert. Auch auf der Makroebene konnte mit dem Modell eine gute Übereinstimmung zwischen experimenteller Beobachtung sowie experimentellen Ergebnissen erzielt werden.

Abstract

This thesis reports on experimental investigations of the mechanisms inherent in the joint action of short fibres and continuous fibres in high-performance, cement-based composites. Experiments on different levels of observation (macro- meso- and micro-levels) were performed to provide detailed insights into the various effects of adding different types of short fibres (dispersed AR glass, integral AR glass and dispersed carbon fibres) on the strength, deformation, and failure behaviour of textile-reinforced concrete (TRC) subjected to tensile loading. Moreover, visual inspections of the specimens' surfaces and microscopic investigation of the fracture surfaces and the interface zone between fibre and matrix were performed and evaluated. Subsequently, the constitutive relations for TRC with short fibres under deformation controlled tensile loading conditions were derived based on a multi-scale rheological-statistical modelling approach.

Based on a literature review, the state of the art is presented and discussed to identify key questions that are yet to be answered satisfactorily. This provides the starting point for the investigations presented in this thesis.

The experimental program on the macro-level included uniaxial tension tests performed on thin, narrow plates reinforced by: a) only textile reinforcement, b) only short fibres, and c) hybrid reinforcement (both textile reinforcement with the addition of short fibres). Special attention was directed toward the course of the stress-strain relationship, crack pattern development, and fibre failure behaviour. The stress-strain curves resulting from uniaxial tension testing demonstrated clearly the positive influence of all types of short fibre on the mechanical performance of TRC. While the first-crack stress in TRC specimens increased significantly due to the addition of short fibres, an expansion of the strain region, where multiple cracks form, was observed for the stress-strain curves for TRC with added short fibres. The visual inspection of the specimens' surfaces showed a higher number of cracks and finer crack patterns for given strain levels in the cases when short fibres were added to TRC. Moreover, depending on fibre type, the positive effects of the addition of short fibres on both tensile strength and work-to-fracture of the composite were found to vary significantly.

The findings at the micro- and meso-levels of observation provided to a great extent a core of understanding of some particular mechanical behavioural properties of TRC with short fibres at the macro-level of observation. Thus, in addition to the experimental testing performed on composite materials with different parameter combinations, investigations of the action of individual material components, i.e., multifilament-yarns and single short fibres, embedded into cement-based matrices were carried out. It was found that short fibres indeed improve the bond between multifilament-yarns and the surrounding matrix. By their random positioning on the yarn's surface, short fibres built new adhesive cross-links which provided extra connecting points to the surrounding matrix. Furthermore, the water-to-binder ratio of the matrix influenced bond quality between fibre and matrix, i.e., various degrees of matrix-fibre bond were observed. As a result, the mechanical behaviour of the composite varied with w/b: While the good bond of the fibre embedded in a matrix with a low water-to-binder ratio leads to increase in stiffness and strength of the composite, fibres with weak bonding can be considered as defects with respect to stiffness as they lead to a decrease in the value.

The thesis further derives the constitutive relationships for TRC with the addition of short fibres under deformation-controlled tensile loading. A physically based rheological model consisting of simple rheological elements was developed based on the experimental results on the micro-scale, using single-fibre pullout tests. Special attention was paid to the gradual de-bonding process

and the resulting force-displacement branch. The model adequately reproduced both relevant fibre failure scenarios: fibre fracture and fibre pullout.

By means of statistical procedures the combination of these models led to description of the stress-crack opening behaviour of an individual crack bridged by the given number of short fibres.

The stress-strain relation for TRC with short fibres subjected to tensile loading was then derived. The concept followed at the macro-level of observation was modelling separately the three main regions of the characteristic stress-strain curve. The regions of crack-free material and crack-widening were considered linear and described based on the corresponding characteristic values of each region. The behaviour of the multiple cracking region was derived by considering an increasing number of cracks in serial interconnection and the contribution of the uncracked matrix in between. The stress transfer, i.e., bridging stress, across the crack was determined based on the contribution of both short fibres and multifilament-yarns. Behaviour of individual cracks was adjusted by varying the number of bridging fibres in different cracks and by varying the yarn bridging stress according to range observed in the pullout experiments.

The predicted responses provided by the model as developed were compared with experimental results obtained from the tests. The experimental and predicted curves were found to be in good agreement at all levels of observation.