

**Tensile behaviour of steel-reinforced elements made of
strain-hardening cement-based composites**

**Zum Zugtragverhalten von stahlbewehrten Bauteilen
aus hochduktilen Beton**

Von der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Eric Mündecke
aus Waren (Müritz)

eingereicht am 17.08.2017

Tag der mündlichen Prüfung: 27.11.2017

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark

Prof. dr. ir. Gideon P.A.G. van Zijl

Kurzfassung

Hochduktiler Beton ist ein mit kurzen Kunststofffasern bewehrter Hochleistungsverbundwerkstoff auf Zementbasis, der unter Zugbelastung eine hohe nichtelastische Verformbarkeit und ein verfestigendes Materialverhalten aufweist. Dieses Verhalten wird durch die Zugabe von diskontinuierlich verteilten Kurzfasern aus Kunststoff erzielt. Dabei wird die rissüberbrückende Wirkung der Kurzfasern genutzt, um Zugspannungen über feine Risse zu übertragen, wobei eine weitere Steigerung der Zugspannung ermöglicht wird.

Der alleinige Einsatz von Fasern als Bewehrung ist im konstruktiven Ingenieurbau jedoch auf wenige Anwendungsgebiete beschränkt, sodass in tragenden Bauteilen eine Kombination von hochduktilen Beton und konventioneller Stahlbewehrung sinnvoll erscheint. Das Zusammenwirken von hochduktilen Beton mit Stabstahlbewehrung bei Zugbeanspruchung, wird dabei im Wesentlichen von der Kombination der mechanischen Eigenschaften der Bewehrung, des hochduktilen Betons und des Verbundes zwischen den beiden Komponenten bestimmt. Um diese Zusammenhänge im bauwerksrelevanten Maßstab zu analysieren, wurden in der vorliegenden Arbeit einachsige Bauteilzugversuche durchgeführt auf deren Basis das globale und lokale Zugtragverhalten der großformatigen Versuchskörper beschrieben werden kann.

Ausgangspunkt sind experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten des Stabstahls und des hochduktilen Betons sowie zu deren gemeinsamen Verbundverhalten. Für die Herstellung großformatiger Versuchskörper wurde zusätzlich der Einfluss des Herstellungsprozesses auf das Verfestigungsverhalten des hochduktilen Betons und das Schwindverhalten untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass der Herstellungsprozess das Betongefüge und damit auch das mechanische Verhalten von hochduktilen Beton beeinflusst und dieser auf Grund seiner Zusammensetzung ein ausgeprägtes Schwindverhalten aufweist. Beides muss bei der Untersuchung großformatiger Versuchskörper berücksichtigt werden. Dazu wurden sowohl unbewehrte als auch bewehrte Dehnkörper mit unterschiedlichem Bewehrungsgehalt unter kontrollierten Herstellungsbedingungen in einem konventionellen Mischwerk hergestellt. Anhand dieser Probekörper wurde das Last-Verformungsverhalten sowie das Rissverhalten unter einachsiger Zugbeanspruchung analysiert.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung erlauben die Abbildung des Last-Verformungsverhaltens unter Berücksichtigung der hohen Schwindmaße durch isoliert ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des hochduktilen Betons und des reinen Stahls. Dieses Verfahren erlaubt eine einfache Beschreibung des kombinierten Tragverhaltens unter Berücksichtigung der rissüberbrückenden Wirkung der Fasern und der daraus resultierenden deutlichen Steigerung der Tragfähigkeit im Zustand II.

Abstract

This study investigates the load-bearing behaviour of steel-reinforced elements made of strain-hardening cement-based composites (SHCC) subjected to tensile loading. Previous research has shown that the combination of steel reinforcement and high performance cementitious materials such as SHCC can lead to an enhanced structural behaviour in terms of mechanical properties and durability. These properties are achieved by the specific material design and use of short polymer fibres embedded into the cementitious matrix of SHCC, which stabilise the crack growth and enable multiple cracks to develop.

While considerable research has been performed at the material level, only limited information is available on the performance of structural members made of SHCC, specifically, of those reinforced with steel bars. Previous studies have shown that the behaviour of such composite elements is – among other factors – influenced by the degree of reinforcement, the material properties of steel and SHCC as well as the bond properties of the rebar interface.

In this thesis, experimental investigations were performed to systematically analyse the effect of the production process and specimen size on the material properties of SHCC, as well as the effect of steel reinforcement on the deformation behaviour of large-scale reinforced SHCC (R/SHCC) tension members. The material properties of specimens produced in a concrete plant were analysed and compared to reference specimens obtained from laboratory mixes. The results showed that the production process of SHCC can considerably influence the material properties of SHCC. In particular, tensile strength and strain capacity were reduced in the study at hand as a result of changes in the micro-structure of the cement-based composite. Uniaxial tension tests with large unreinforced SHCC slabs showed a further decrease in tensile strength and strain capacity. It was shown that a portion of these changes stem from eccentricities and imperfections, which were found to increase with specimen size.

The tensile behaviour of structural R/SHCC members was analysed by means of uniaxial tension tests on large reinforced slab elements. The aim of this experimental investigation was to study the contribution of SHCC to the global load-bearing behaviour of reinforced tension members with special attention to the effect of steel yielding on the crack development of the fibre-reinforced cement-based composite. The tests revealed that steel reinforcement – especially in a symmetrical configuration – can reduce the effect of eccentricities and enhance control of crack widths. However, the maximum strain capacity of R/SHCC elements was found to be limited to the yielding strain of steel reinforcement.

The experimental results were discussed with respect to their implications for constitutive modelling of the tensile load-bearing behaviour. Specific attention was devoted to the effect of local steel yielding and the cracking behaviour of SHCC. It was shown that a superposition of the tensile stress-strain curves of SHCC and steel reinforcement may overestimate total deformations and hence structural ductility.