

Konstruktiver Makroglasfaserbeton für Bodenplatten und Industrieböden

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden zur Erlangung der
Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) eingereichte

DISSERTATION

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. (FH) Philipp Löber

Eingereicht am:

31.07.2020

Tag der mündlichen Prüfung:

13.04.2021

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Manfred Curbach

Prof. Dr.-Ing. Klaus Holschemacher

Dr.-Ing. Dirk Weiße

Kurzfassung

Im konstruktiven Betonbau haben sich Kurzfasern in Form von Makrofasern zur isotropen Verstärkung vorwiegend statisch unbestimmter Bauteile etabliert. Diese Fasern werden dem Frischbeton konventionell beigemischt und verleihen dem Festbeton bei üblichen Fasergehalten von etwa 1 Vol.-% die Eigenschaft, auch nach erfolgter Rissbildung einen gewissen Grad an Zugspannungen im Riss übertragen zu können. Die dabei übertragbaren Spannungen nehmen in der Regel mit zunehmender Rissweite ab. Das Hauptanwendungsgebiet stellen daher Bodenplatten und Industrieböden dar, deren Systemtragfähigkeit aufgrund ihrer hohen statischen Unbestimmtheit nicht auf die Querschnitttragfähigkeit begrenzt ist. Da die Tragwerk-Baugrund-Interaktion ein komplexer Prozess ist, gestaltet sich eine Aussage zu den Mindestanforderungen an das Entfestigungsverhalten konstruktiver Faserbetone zur Gewährleistung eines duktilen und überkritischen Systemtragverhaltens schwierig.

Die Regelungen zur Akzeptanz und zum Einsatz von Faserprodukten für konstruktive Betonbauteile sind zudem insbesondere im deutschsprachigen Raum durch präskriptive Vorgaben wie in der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ auf die Anwendung von Stahlfasern begrenzt. International können dagegen durch leistungsbezogene Normen, wie dem *fib* Model Code 2010, auch andere Fasermaterialien eingesetzt werden, sofern diese mit der Betonmatrix verträglich sind. Kurzfasern aus Glas dürfen im konstruktiven Betonbau momentan nicht auf die Tragfähigkeit von Bauteilen angerechnet werden. Insbesondere längere Makroglasfasern erscheinen aber als geeignet, Spannungen auch bei größeren Rissöffnungen übertragen zu können und insbesondere Betonbodenplatten eine höhere Tragfähigkeit und Duktilität zu verleihen.

In dieser Arbeit wurde die Verwendung von Makroglasfasern mit einer Länge von 36 mm im Kontext ihrer Leistungsfähigkeit auf Material- und Bauteilebene untersucht. Auf Basis von Drei- und Vier-Punkt-Biegezugversuchen wurden Finite-Elemente-Modelle entwickelt und die Leistungsfähigkeit der Faserbetone auf Materialebene durch inverse Analysen bestimmt. Zusätzlich wurde ein eigener Ansatz für dieses Vorgehen entwickelt, mit dem einige der in den Regelwerken verankerten Parameter hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für Makroglasfaserbeton neu kalibriert wurden. Durch experimentelle und numerische Versuche an Decken- und Bodenplatten wurde das Materialverhalten des Makroglasfaserbetons auf Bauteilebene untersucht. Die im Vorfeld ermittelten Materialkennwerte bildeten die Eingangswerte für die Simulation der Bauteilversuche. Abschließend verdeutlichte eine Parameterstudie den Einfluss der Leistungsfähigkeit des Faserbetons und der Bodensteifigkeit auf die Tragfähigkeit von Bodenplatten. Insgesamt soll diese Arbeit einen wissenschaftlichen Beitrag zur Verwendung und statischen Anrechenbarkeit von Makroglasfasern in Konstruktionsbeton und seiner Anwendung in Bodenplatten leisten.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass Makroglasfaserbeton innerhalb der untersuchten Fasergehalte ein dehnungsentfestigendes Materialverhalten aufweist. Die normativ verankerten Beiwerte für die Umrechnung der Nachrissbiegezugfestigkeit in die Nachrisszugfestigkeit sind zu hoch angesetzt, und die rechnerische Bruchdehnung sollte auf 18 % begrenzt werden. Die Untersuchungen an Bodenplatten zeigen, dass selbst Faserbetone mit geringer Nachrisszugfestigkeit im Bereich größerer Rissweiten, eine deutliche Traglaststeigerungen nach Erstrissbildung im Bauteil erzeugen können. Erst ab einer Rissweite von etwa 0,4 mm bieten duktilere Fasern wie Kunststoff- oder Stahlfasern Vorteile. Bei der Herstellung von Makroglasfaserbeton ist besonderes Augenmerk auf den Mischvorgang zu legen. Mit zunehmender Mischzeit werden die Fasern aufgrund ihres grundsätzlich spröden Materialverhaltens und ihrer Zusammensetzung aus Einzelfilamenten geschädigt. Die Wahl des Betonmischers kann einen Unterschied von einer Leistungsklasse bedingen, weshalb die Leistungsfähigkeit von Makroglasfaserbeton immer an Prüfkörpern aus dem zum Einsatz kommenden Betonmischer erfolgen sollte.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden kurzzeitige Belastungen an Bodenplatten unter mittlerer Lasteinleitung untersucht. Andere Belastungsszenarien sollten gesondert betrachtet werden. Die Überführung der Ergebnisse der untersuchten Bodenplatten in ein Berechnungsmodell für beliebige Plattengeometrien und Bodeneigenschaften stellt eine sinnvolle Verwertung der Forschungsergebnisse dar.

Abstract

In structural concrete construction, short fibres in the form of macro fibres are commonly used for the isotropic strengthening of mainly statically indeterminate structures. These fibres are added to fresh concrete with a usual fibre content of about 1 % by volume. Fibres provide hardened concrete the ability to transfer a certain degree of tensile stress in the crack even after crack formation has occurred. The level of the transferable stress generally decreases with increasing crack width. Main applications are therefore concrete floor slabs and industrial floors, where the load-bearing capacity is not limited by the cross-sectional load-bearing capacity due to their high static uncertainty. However, since the interaction between structure and ground is rather complex, it is difficult to provide requirements for the softening behaviour of structural fibre reinforced concretes (FRC) to ensure a ductile load-bearing behaviour of the structure.

The regulations on the acceptance and usage of fibres for structural concrete components are limited to steel fibres by prescriptive specifications such as the German DAFStb-guideline "Steel Fibre Reinforced Concrete". In contrast, performance-driven standards, such as the *fib* Model Code 2010, allow the use of other fibre materials, provided these are compatible with the concrete matrix. At present, short glass fibres may not be considered for the load-bearing capacity of structural concrete elements. However, longer macro glass fibres appear to be suitable for transferring stresses even over larger crack openings while providing concrete floor slabs a higher load-bearing capacity and ductility.

In this thesis the use of macro glass fibres with a length of 36 mm was scientifically investigated in the context of their performance on material and structural level. Based on three- and four-point bending tests, finite element models were developed and the post-crack-performance of the glass fibre reinforced concretes was determined by inverse analyses. In addition, a new approach for the inverse analysis was developed, in which parameters found in the regulations were calibrated for their applicability to macro glass fibre reinforced concrete.

On the structural level, the material behaviour of the macro glass fibre reinforced concrete was investigated by experimental and numerical tests on floor slabs. The material characteristics determined by the inverse analyses were used as input values for the numerical simulation of the slab tests. A subsequent parameter study has shown the influence of the fibre reinforced concretes performance and the soil stiffness on the load-bearing capacity of the investigated floor slabs.

It can be stated that macro glass fibre reinforced concrete within the investigated fibre contents shows a softening material behaviour. The coefficients for transferring the residual flexural strength in the residual tensile strength at ultimate limit state, given in the DAFStb guideline "Steel Fibre Reinforced Concrete" and *fib* Model Code 2010 are too high. Furthermore, the assumed ultimate strain of the glass fibre reinforced concrete should be limited to 18 ‰. In contrast, the numerical investigations on floor slabs show that even fibre reinforced concretes with low residual tensile strength at ultimate limit state can produce significant load increases after initial cracking in the structure. Ductile fibres such as plastic or steel fibres only offer advantages at larger crack widths of more than 0.4 mm.

When producing macro glass fibre reinforced concrete, special attention must be paid to the mixing process. With increasing mixing time, the fibres are damaged due to their basically brittle material behaviour and their composition of single filaments. The choice of a different concrete mixer can make a difference of one FRC-performance class. Hence, the performance of glass fibre reinforced concrete should be tested on samples from the concrete mixer used for the final application.

Within the scope of this work short-term loads on floor slabs under central load application were investigated. Other load scenarios should be considered separately. The transfer of the results of the examined floor slabs into a design model for arbitrary slab geometries and soil properties represents a meaningful utilization of the research results.