

**Numerische Modellierung des Tragverhaltens mineralisch gebundener
Carbonfaserbewehrung**

**Numerical simulation of the load-bearing behavior of mineral-impregnated
carbon fiber reinforcement**

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

DISSERTATION

vorgelegt von

M. Sc. Kai Zernsdorf

geboren am 03.03.1993 in Frankfurt am Main

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing E.h. em. Manfred Curbach
Prof. Dr.-Ing. Thomas Bösche
Prof. Dr.-Ing. Klaus Holschemacher

Eingereicht am: 10. Juni 2025

Verteidigt am: 18. August 2025

Kurzfassung

Die mineralisch gebundene Carbonfaser-(MCF)-Bewehrung ist ein neuartiger Verbundwerkstoff, der aus einer Vielzahl unidirektional ausgerichteter Carbonfilamente besteht, die durch einen Pultrusionsprozess zu Bewehrungsstäben verarbeitet werden. Die Filamente werden kraftschlüssig mit mineralischen Tränkungsmatrices verbunden und in speziell entwickelte Feinbetonmatrix eingebettet, wodurch hochtragfähige, temperaturbeständige Carbonbetonstrukturen entstehen.

Die optimale Nutzung dieses Materials setzt eine detaillierte Charakterisierung seines linearen und nicht-linearen Verhaltens sowie eine präzise Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Bewehrung und Feinbetonmatrix voraus. In dieser Arbeit wird ein Mehrskalmodell auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) vorgestellt, mit dem das Tragverhalten, die Verformung und die Rissbildung von MCF-bewehrten Betonstrukturen simuliert werden kann.

Auf der Mikroskala wurde ein diskretes Modellierungskonzept unter Verwendung repräsentativer Volumenelemente (RVEs) entwickelt, das die stochastische Filamentverteilung, die anisotrope Schädigungsentwicklung in der mineralischen Matrix sowie die nichtlineare Interaktion zwischen Filamenten und Matrix berücksichtigt. Das RVE wurde anhand experimenteller Spannungs-Dehnungs-Daten nach WILHELM [127] kalibriert und validiert. Es ermöglicht die Abbildung schädigungsmechanischer Prozesse in der mineralischen Bewehrung sowie die Quantifizierung ihres Einflusses auf das Tragverhalten der MCF-Bewehrung.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit ist die Modellierung des Verbundverhaltens zwischen MCF-Bewehrung und Beton. Hierbei wird ein analytisches Verbundspannungsmodell entwickelt und mithilfe nichtlinearer Federelemente in das kommerzielle Finite-Elemente-Programm ANSYS implementiert. Die anschließende Validierung erfolgt mithilfe experimenteller Pull-out-Tests.

Auf der Strukturebene wird das Verhalten MCF-bewehrter Betonstrukturen unter Zug- und Biegebeanspruchung simuliert. Dabei wird das validierte Verbundmodell in Kombination mit den ermittelten Eigenschaften der MCF-Bewehrung eingesetzt. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen, das Trag-, Verformungs- und Rissbildungsverhalten von MCF-bewehrten Betonstrukturen künftig realitätsnah zu prognostizieren. Darüber hinaus liefert die Arbeit Ansätze zur Berücksichtigung des nichtlinearen Verbundverhaltens in numerischen Simulationen und bildet damit die Grundlage für die Weiterentwicklung sowie die breite Anwendung dieses innovativen Verbundwerkstoffs.

Abstract

Mineral-impregnated carbon-fiber (MCF) reinforcement represents a novel composite material comprising unidirectionally aligned carbon filaments bonded by a mineral-based impregnation matrix. The reinforcement is embedded in high-performance fine-grained concrete to form structurally efficient and thermally robust reinforced concrete structures.

To fully exploit the potential of MCF reinforcement, it is essential to characterize its elastic and inelastic behavior and to model the complex interactions between the reinforcement and the surrounding concrete matrix with high fidelity. This study presents a multiscale approach based on the finite element method (FEM) to simulate the load-bearing behavior, deformation, and crack propagation of MCF-reinforced concrete structures.

At the microscale, a discrete modeling approach using representative volume elements (RVEs) was developed to reflect the stochastic filament distribution, anisotropic damage evolution in the mineral matrix, and the nonlinear interaction between filaments and matrix. The RVE was calibrated and validated against experimental stress-strain data reported by WILHELM [127].

At the mesoscale, an analytical bond stress-slip relationship was integrated into the commercial FEM software ANSYS utilizing nonlinear spring elements. The model was validated through pullout tests.

At the structural scale, tensile and bending simulations of MCF-reinforced concrete elements were performed using the calibrated material models. The simulation results demonstrate the capacity of the model to predict stiffness degradation, crack initiation and propagation as well as load-bearing capacity.

The findings provide key insights into the mechanical performance of MCF-reinforced concrete and establish a validated computational framework that facilitates the future design and optimization of this innovative reinforcement material in structural concrete applications.