

# **Mineral-impregnated carbon fiber (MCF) reinforcements based on geopolymer**

## **Geopolymerimprägnierte Carbonfaserbewehrungen**

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

### **DISSERTATION**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jitong Zhao aus Xi'an, China

eingereicht am 12.04.2023

Tag der mündlichen Prüfung: 20.11.2023

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine

Prof. Dr. Flávio de andrade Silva (Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro)

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Stephan (TU Berlin)

## **Abstract**

Carbon fiber (CF)-reinforced concrete composites hold promise as a material class for constructing lightweight, durable, and sustainable structures. State-of-the-art carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) reinforcement comprises infinite multifilament bundles embedded in a polymeric matrix, ensuring adequate load transfer and process robustness, yet it undergoes considerable degradation under elevated temperatures or harsh service conditions. Instead, the success of mineral-impregnated carbon fibers (MCFs) stems from their structural flexibility, inherent heat resistance, and outstanding compatibility with cementitious substrates. Geopolymers (GPs) have recently emerged as a viable coating alternative due to a unique combination of many advantages, e.g., sustainability, source diversity, long early-age processing time, synthesis by controlled low-temperature activation and a wide range of temperature resistance.

This work aims to develop and test fast-setting MCF composites and associated processing technologies, which hold significant importance for industrial applications and structural fire safety. As a result of the novelty of mineral impregnation technology, challenges regarding the process chain and mixture must be mastered to explore the full material potential before the technology is translated to critical markets. Consequently, the introductory chapter offers a comprehensive review of fiber-reinforced geopolymer (FRG) systems in response to temperature influences. The development concept is grounded in a systematic investigation of several interrelated, critical processing aspects of GP impregnation, focusing on processing quality and strength evolution. This investigation is conducted alongside an automated and continuous impregnation technology.

Findings from numerous experiments revealed that targeted thermal curing profoundly influenced the mechanical properties and microstructure of the GP matrices and resulting MCFs. Hereby, rapid setting and high early-age strength of MCF, comparable to conventional CFRPs, were achieved within the first several hours of heat curing. The ability of aluminosilicate particles to penetrate a dense fiber bundle was studied by applying fly ash (FA) with a systematically varied particle size distribution. Thereby, the max. particle size close to the same range of diameter of individual filament proved to be the most efficient, improving both the mechanical performance of MCF and its bond to concrete. Furthermore, an experimental campaign on the role of fiber sizing agents in processing quality and final composite performance was conducted. The respective impregnation quality and quantity were comprehensively explained by varied yarn spreading behavior and wettability, resulting in apparent differences in filament-matrix morphology and mechanical performance of MCF. To achieve high shape stability, packing density, and tailor-bond characteristics, the effect of surface profiling and prototypical winding technology on MCF was investigated.

Finally, the bond quality of the MCF was validated through yarn pull-out tests in GP concrete at elevated temperatures and compared with available CFRP. These tests generated parameters

## Abstract

related to bond behavior, which were then used to construct a three-dimensional numerical model. Based on proper parametric calibrations, good agreement between numerical and experimental characterizations was achieved to predict the material's performance for future applications.

## **Kurzfassung**

Der Verbundwerkstoff Carbonbeton ist eine vielversprechende Materialklasse für den Bau von leichtgewichtigen, langlebigen und nachhaltigen Strukturen. Hochmoderne Bewehrungen aus Carbonfaser-verstärkte Kunststoffen (CFK) werden durch die Imprägnierung von Endlosfaserbündeln mit einer Polymermatrix hergestellt, was ausreichende Lastübertragungskapazität und Prozessrobustheit gewährleistet, und jedoch durch hohe Temperaturen oder raue Umgebungen erheblich zerstört wird. Stattdessen resultiert der Erfolg mineralimprägnierter Carbonfasern (MCFs) aus ihrer strukturellen Flexibilität, inhärenten Wärmebeständigkeit und hervorragenden Kompatibilität mit zementären Substraten. Geopolymere (GPs) haben sich kürzlich als praktikable Beschichtungsalternative herausgestellt, aufgrund einer einzigartigen Kombination vieler Vorteile, wie Nachhaltigkeit, Quellenvielfalt, ausreichendes Verarbeitungsfenster, Synthese durch kontrollierte thermische Aktivierung bei niedrigen Temperaturen und eine breite Palette von Hitzebeständigkeit.

Die vorliegende Arbeit zielt auf die Entwicklung und Erprobung schnell abbindender MCF-Verbundwerkstoffe und zugehöriger Verarbeitungstechnologien ab, was für industrielle Anwendungen und den baulichen Brandschutz von großer Bedeutung ist. Aufgrund der Neuartigkeit der mineralischen Imprägniertechnologie müssen Herausforderungen in Bezug auf die Prozesskette und Mischung gemeistert werden, um das volle Materialpotenzial zu erkunden, bevor die Technologie auf Schlüsselmärkte übertragen wird. Dementsprechend zeigt ein einleitendes Kapitel einen umfassenden Überblick über faserverstärkte Geopolymer (FRG)-Systeme unter Temperatureinwirkung. Das Entwicklungskonzept baut auf einer systematischen Untersuchung mehrerer zusammenhängender, wichtiger Verarbeitungsaspekte der GP-Imprägnierung in Bezug auf Verarbeitungsqualität und Festigkeitsentwicklung von der Mikro- bis zur Makroskala und in Verbindung mit einer automatisierten und kontinuierlichen Fertigungstechnologie auf.

Ergebnisse zahlreicher Experimente zeigten, dass gezielte Wärmehärtung die mechanischen Eigenschaften und Mikrostruktur der GP-Matrizen und resultierenden MCFs nachhaltig beeinflusst. Hierdurch wurde eine schnelle Aushärtung und hohe Festigkeit im Frühstadium von MCF erreicht, vergleichbar mit konventionellen CFRPs, innerhalb der ersten Stunden der Wärmebehandlung. Die Eindringfähigkeit von Aluminosilikatpartikeln in ein dichtes Faserbündel wurde durch die Anwendung von Flugasche (FA) mit systematisch variiertem Partikelgrößenverteilung untersucht. Dabei erwies sich die maximale Partikelgröße, die nahe dem Durchmesser einzelner Filamente liegt, als am effizientesten und verbesserte sowohl die mechanische Leistung von MCF als auch seine Bindung an Beton. Darüber hinaus wurde eine experimentelle Kampagne zur Rolle des Faserschlichtemittels auf die Verarbeitungsqualität und die endgültige Verbundleistung durchgeführt. Die jeweilige Imprägnierqualität und -quantität wurde umfassend durch ein unterschiedliches Spreizungsverhalten und Benetzbarkeit des Garns erklärt, was zu deutlichen Unterschieden in der Filament-Matrix-Verteilung und mechanischen Eigenschaft von MCF führte. Zur Verbesserung der Formstabilität, Packungsdichte und gezielten Abstimmung

## Kurzfassung

der Verbundeigenschaften im Beton wurde der Effekt der Oberflächenprofilierung und prototypischen Wickeltechnik auf MCF untersucht.

Schließlich wurde die Verbundqualität der MCF durch den Garnauszugversuch in GP-Beton bei erhöhten Temperaturen validiert und mit einer verfügbaren CFK verglichen. Diese Tests generierten auf das Verbundverhalten bezogene Parameter, die dann zur Konstruktion eines dreidimensionalen numerischen Modells verwendet wurden. Durch angemessene parametrische Kalibrierungen wurde eine gute Übereinstimmung zwischen numerischen und experimentellen Charakterisierungen erreicht, um die Leistung des Materials für zukünftige Anwendungen vorherzusagen.