

# **Numerical modeling of steel fiber reinforced concrete composite exposed to high loading rate**

## **Numerische Modellierung von Stahlfaserbeton-Verbundwerkstoffen unter hohen Belastungsraten**

**vorgelegt an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)**

### **Dissertation**

vorgelegt von  
Ammar Siddig Ali Babiker M.Sc.  
aus Sennar, Sudan

Gutachter  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser

Eingereicht am: 30.11.2020  
Verteidigt am: 25.03.2021

## ABSTRACT

This study investigates the behavior of plain and steel fiber-reinforced concrete (SFRC) exposed to quasi-static and dynamic loadings. However, the most significant effort has been directed to the investigation of plain and fiber-reinforced concrete under dynamic loading. Previous research has shown that the addition of steel fibers to the cementitious materials can significantly enhance many of the desired engineering properties of hardened concrete, such as fracture toughness, flexural strength, fatigue resistance, thermal shock as well as splitting. Many experimental and numerical studies indicate that the strength of such composites is rate dependent, i.e., it is profoundly affected by increasing the dynamic loading. This concept applies to the composite components, including concrete, reinforcing fibers as well as the bond interaction between them. The phenomenon is widely known as the strain-rate effect.

In this research, numerical investigations were performed to systematically analyze the effect of adding steel fibers into the concrete matrix and to investigate the loading rate dependent on such material. Three numerical programs were conducted. In the first program, the bond behavior between the steel fiber and adjacent concrete matrix was studied using various approaches in LS-DYNA finite element software. The results were compared with the available experimental data in the field.

In the second program, the impact behavior of plain and steel fiber-reinforced concrete slabs was investigated. The models were developed and calibrated. Their quality, reliability, and limitations were assessed by conducting a series of numerical case studies. The computed results were verified by comparison with the available experimental data.

The dynamic behavior of plain and steel fiber-reinforced concrete was investigated in the third program, including both compressive and tensile behavior. This part aimed to study the contribution of steel fibers to the global strength or rather a resistance behavior of fiber-reinforced concrete under dynamic loading with little attention to the effect of steel fibers on the crack development of the fiber-reinforced concrete. Moreover, the contribution of the material effect and its capabilities to capture the dynamic behavior of plain and fiber-reinforced concrete is of interest. The particular focus herein goes to the proposed concrete material model. It is demonstrated that the proposed concrete model can well capture the compressive and tensile dynamic behavior of plain concrete and fiber-reinforced material and can realistically predict the experimental results.

Numerical case studies followed, including mesh size-dependent, fiber content, fiber aspect ratio, concrete strength class, and loading rate. The most influencing parameters were identified and analyzed, and the conclusion was drawn. It was shown that the previously mentioned parameters are actively involved in the overall behavior of the materials and can play an essential role in it.

# KURZFASSUNG

In dieser Arbeit wird das Verhalten von Normal- und Stahlfaserbeton (engl. steel fiber reinforced concrete (SFRC)) unter quasi-statischer und dynamischer Belastung untersucht. Der Fokus der Arbeit liegt dabei auf den Untersuchungen unter dynamischer Belastung. Frühere Forschungen haben gezeigt, dass die Zugabe von Stahlfasern viele der gewünschten technischen Eigenschaften des erhärteten Betons, wie Bruchzähigkeit, Biegefestigkeit, Ermüdungsfestigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit sowie Rissbildung, erheblich verbessern kann. In diesem Zusammenhang weisen viele experimentelle und numerische Studien darauf hin, dass die Festigkeit solcher Verbundwerkstoffe ratenabhängig ist, d.h. sie wird durch die Erhöhung der dynamischen Belastung stark beeinflusst. Dieser Effekt gilt sowohl für die Verbundwerkstoffkomponenten Beton und Stahlfasern als auch für die Verbundwechselwirkung zwischen ihnen. Das Phänomen ist allgemein als Dehnraten-Effekt bekannt.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden numerische Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss der Zugabe von Stahlfasern in die Betonmatrix systematisch zu analysieren und die Abhängigkeit dieses Materials von der Belastungsrate zu untersuchen. Es wurden drei numerische Studien durchgeführt. In der ersten Studie wurde das Verbundverhalten zwischen Stahlfaser und der angrenzenden Betonmatrix mit verschiedenen Ansätzen mit der Finite-Elemente-Software LS-DYNA untersucht. Die Ergebnisse wurden mit zur Verfügung stehenden experimentellen Daten verglichen.

In der zweiten Studie wurde das Verhalten von unverstärktem und stahlfaserverstärkten Betonplatten unter Impakt-Belastung untersucht. Die Modelle wurden entwickelt und kalibriert. Die Qualität und Zuverlässigkeit der Modelle wurden in einer Reihe von numerischen Fallstudien bewertet. Die berechneten Ergebnisse wurden durch Vergleich mit den zur Verfügung stehenden experimentellen Daten verifiziert.

Das dynamische Verhalten von unverstärktem Beton und faserverstärktem Beton wurde in der dritten Studie untersucht, wobei sowohl das Druck- als auch das Zugverhalten untersucht wurden. Diese Untersuchungen zielten darauf ab, den Beitrag der Stahlfasern zur globalen Festigkeit bzw. zum Widerstandsverhalten von unverstärktem und faserverstärktem Material unter dynamischer Belastung zu untersuchen, wobei dem Einfluss der Stahlfasern auf die Rissentwicklung des faserverstärkten Betons wenig Beachtung geschenkt wurde. Darüber hinaus sind der Beitrag des Materialeffekts und seine Fähigkeit, das dynamische Verhalten von glattem und faserverstärktem Beton zu erfassen, von Interesse. Der Schwerpunkt liegt hier auf dem vorgeschlagenen Materialmodell für den Beton. Es wird gezeigt, dass das vorgeschlagene Betonmodell das druck- und zugdynamische Verhalten des unverstärkten und des faserverstärkten Betons gut abbilden und die experimentellen Ergebnisse realistisch vorhersagen kann.

Schließlich folgten numerische Fallstudien zur Abhängigkeit der Ergebnisse von der Netzgröße, dem Fasergehalt, dem Verhältnis von Faserlänge zu -durchmesser, der Betonfestigkeit und der Belastungsrate. Die Parameter mit dem größten Einfluss wurden identifiziert und analysiert, und eine Schlussfolgerung wurde gezogen. Es wurde gezeigt, dass die zuvor genannten Parameter aktiv am Gesamtverhalten der Materialien beteiligt sind und eine wesentliche Rolle dabei spielen können.