

# **On the Mechanical Modeling and Analysis of the Dynamical Fiber Pullout Mechanism Taking into Account the Damage and Viscoelasticity of the Bond**

## **Zur mechanischen Modellierung und Analyse des dynamischen Faserauszugs unter Einbeziehung von Schädigung und Viskoelastizität des Verbundes**

Von der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)  
genehmigte

### **Dissertation**

vorgelegt von

Aussama Azzam (M.Sc.)

geboren am 24. März 1977 in Damaskus

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd W Zastrau  
Technische Universität Dresden

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Kai Willner  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 2. Oktober 2015

Tag der Verteidigung: 16. Dezember 2015

## **Abstract:**

Textile reinforcement concrete (TRC) is a new building material in increasing usage in modern engineering applications. The experimental investigations of TRC reveal a multiple cracking behavior which corresponds to concrete cracking and fiber pullout mechanisms.

The aim of the presented research work is the mechanical analysis of the fiber pullout mechanism under dynamical loading conditions. Appropriate constitutive material models are proposed for the matrix-fiber interface taking into consideration two main mechanical characteristics, damage behavior and rate-dependent effects. These material models are the elastic damage model, the viscoelastic model and two developed viscoelastic damage material models.

Moreover, an analytical model of the fiber pullout mechanism is provided, where the governing differential equation of motion is formulated and closed analytical solutions are derived under a dynamical excitation of a harmonic pullout displacement function at the fiber tip. These analytical solutions are derived with respect to two material models of the interface, the elastic damage and the viscoelastic material models.

Furthermore, the dynamical responses are also sought for the case of a linearly increasing pullout displacement function of a definite velocity. For the latter dynamical loads a numerical DISCRETE MODEL with an iterative solving scheme is formulated for the pullout problem to solve the corresponding nonlinear differential equation of motion. Moreover, comparisons between the obtained results regarding the different proposed material models of the interface are provided. The elastic damage model can be used with a dynamical increasing factor (*DIF*) on the bond strength and the stiffness of the interface with respect to the shear slip rate. On the other hand, the developed viscoelastic damage material models characterize the rate-dependent effects of the dynamical pullout through the viscous and the viscoelastic parts of the corresponding constitutive relations of these models.

The second part of this doctoral thesis deals with the mechanical analysis of the uniaxial tensile behavior of TRC specimen under dynamical tensile loading. A corresponding analytical model is firstly formulated. Furthermore, a tested TRC tensile specimen and the corresponding fiber crack bridging behavior (cracked stage) are also analyzed by means of the Finite Element modeling approach by conducting 3-dimensional heterogeneous models.

**Keywords:** fiber pullout, dynamical loads, damage behavior, rate-dependent effects

## **Kurzfassung:**

Textil bewehrter Beton (Textilbeton) ist ein neues Baumaterial mit zunehmender Verwendung in modernen Ingenieur Anwendungen. Die experimentellen Untersuchungen an Textilbeton zeigen Mehrfachrissbildung, die zu Betonriss- und Faserauszugsmechanismen korrespondieren. Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die mechanische Untersuchung des Faserauszugsmechanismus unter dynamischer Belastung. Hierzu werden geeignete Materialmodelle für das Matrix-Faser-Interface vorgeschlagen, die zwei mechanische Phänomene, nämlich das Schädigungsverhalten und den Dehnraten-Effekt, berücksichtigen. Diese Materialmodelle sind das elastische Schädigungsmodell, das viskoelastische Modell und zwei entwickelte viskoelastische Schädigungsmodelle.

Zudem wird ein analytisches Modell zum Faserauszugsmechanismus bereitgestellt, wobei die beschreibende Bewegungsgleichung aufgestellt und geschlossene, analytische Lösungen unter dynamischer Erregung durch eine harmonische Auszugsverschiebung am Faserende gefunden werden. Diese analytischen Lösungen werden für zwei Materialmodelle, das elastische Schädigungsmodell und das viskoelastische Modell, hergeleitet.

Außerdem wird die dynamische Antwort für den Fall einer linear ansteigenden Auszugsverschiebung mit konstanter Geschwindigkeit gesucht. Zu dieser dynamischen Belastung wurde für die numerische Lösung der entsprechenden nichtlinearen Differentialgleichung ein diskretes Modell (DISCRETE MODEL) entwickelt und mit einem iterativen Lösungsverfahren gelöst. Darüber hinaus wurde ein Vergleich zwischen den Ergebnissen, die bei Verwendung der unterschiedlichen vorgeschlagenen Materialgesetze für das Interface erhalten wurden, durchgeführt. Das elastische Schädigungsmodell kann zum einen mit einem von der Schlupfrate abhängigen dynamischen Vergrößerungsfaktor (*DIF*) für die Verbundfestigkeit bzw. die Steifigkeit des Interface verwendet werden. Zum anderen werden die Dehnraten Effekte durch die viskosen und viskoelastischen Anteile in den entwickelten viskoelastischen Schädigungsmodellen abgebildet.

Der zweite Teil dieser Dissertation behandelt die mechanische Untersuchung des uniaxialen Zugverhaltens von Textilbeton unter dynamischer Zugbelastung. Ein zugehöriges analytisches Modell wird zuerst formuliert. Zudem werden der Mehrfachrissbildungszustand und der Faserrissüberbrückungsmechanismus an einem Textilbetonprobekörper mittels einer Finite-Elemente-Analyse an einem dreidimensionalen, heterogenen Modell untersucht.

**Schlüsselworte:** Faserauszug, dynamische Belastung, Schädigung