

# Analyse und Beschreibung des dynamischen Zugtragverhaltens von ultrahochfestem Beton



Verfasser: Oliver Millon

# Kurzfassung

Der Schutz von Bauwerken, insbesondere der kritischen Infrastruktur, gewinnt in heutiger Zeit aufgrund der steigenden Tendenz des Eintretens von extremen Einwirkungen zunehmend an Bedeutung. Im Bereich des Hochbaus und des Ingenieurbaus sind Konstruktionen aus Beton elementar. Jedoch ist die Schutzwirkung von Konstruktionen aus Normalbeton und hochfestem Beton begrenzt und kann beispielsweise vorrangig nur durch Vergrößerung der Bauteildimensionen erreicht werden. Dadurch gelangt die Anwendung von faserbewehrten Betonen in den Mittelpunkt der Betrachtungen. Der mit Stahlfasern bewehrte ultra-hochfeste Beton (UHPC) ist eine Möglichkeit, den gestiegenen Erfordernissen des baulichen Schutzes gerecht zu werden. Aufgrund der verwendeten Komponenten ist der UHPC zwar vergleichsweise teuer, zeigt jedoch auch bei dynamischer Belastung eine gegenüber den standardisierten Betonen deutlich verbesserte Leistungsfähigkeit.

Neben der Erarbeitung einer Möglichkeit zum ökonomischen Einsatz des UHPC in Abhängigkeit vom Belastungsszenario wird mit dieser Arbeit eine wesentliche Lücke in der Charakterisierung des ultra-hochfesten Grobkornbetons „B4Q“ geschlossen, indem das Zugtragverhalten analysiert und mit Hilfe mathematischer Formulierungen von quasi-statischer bis zu hochdynamischer Zugbelastung beschrieben wird. Das Verhalten von Beton bei Zugbelastungen gilt aufgrund der Heterogenität und des starken Einflusses von Gefügestörungen als kritisch. Daher wurde in dieser Arbeit der Fokus auf derartige Belastungen gerichtet, die zum Zugversagen führen.

Die vorliegende Arbeit stellt die Ergebnisse einer systematischen Analyse des Zugtragverhaltens mit Hilfe von experimentellen und numerischen Methoden dar. Ein zentrales Ergebnis ist ein mesomechanischer Modellansatz, der den Spannungs-Rissöffnungs-Verlauf von einaxial auf Zug beanspruchten UHPC berechnen kann. Dabei wird das Verhalten des nicht bewehrten Betons sowie des Fasermaterials separat analysiert und mathematisch beschrieben sowie das Verhalten beider im Modellansatz als Verbundwerkstoff zusammengeführt.

Dem Modellansatz zur Berechnung des quasi-statischen Zugtragverhaltens lagen Ansätze zugrunde, die bereits bei Faserbetonen mit normaler und hoher Festigkeit angewendet werden. Diese Ansätze wurden an den Referenz-UHPC angepasst und schließlich zu einem dynamischen Modellansatz zur Anwendung bei hohen Verzerrungsraten weiterentwickelt.

Eine wichtige Grundlage der Modellentwicklung ist die Analyse von Verformungsmechanismen, die an dynamisch belasteten Bauteilen mit Hilfe von computertomografischen Analysen ermittelt wurden. Es zeigte sich, dass unabhängig vom Belastungsszenario und der Verzerrungsrate sowohl bei quasi-statischer als auch bei hochdynamischer Belastung die gleichen Versagensmechanismen auftreten. Das Verbundversagen zwischen den Stahlfasern und dem umgebenden Beton wurde als der wesentliche Versagensmechanismus identifiziert, der in dem Modellansatz berücksichtigt worden ist.

Der Modellansatz wurde für quasi-statische Belastungen mittels einaxialer Zugversuche validiert. Die Erweiterung des Modellansatzes im Hinblick auf seine Anwendbarkeit bei hochdynamischen Zugbelastungen erfolgte durch die verzerrungsratenabhängige Beschreibung wesentlicher Modellparameter, wie der Zugfestigkeit des bewehrten und nicht bewehrten Betons  $f_{ct}$  bzw.  $f_{ct,m}$ , der Bruchenergie des nicht bewehrten Betons  $G'_{f,m}$  und der Verbundfestigkeit zwischen Stahlfasern und Beton  $\tau_{fb}$ . Die dazugehörigen Formulierungen sind anhand experimenteller Untersuchungen erarbeitet worden.

Die Validierung des dynamischen Modellansatzes erfolgt für den Referenz-UHPC anhand von Hopkinson-Bar-Spallationsversuchen und wird durch den Nachweis der Erhaltung von Impuls und Energie für ein definiertes Kontrollvolumen geführt. Sowohl für quasi-statische als auch für hochdynamische Belastungen wird gezeigt, dass die spezifische Bruchenergie, abgeleitet aus dem Modellansatz, eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen aufweist.

Darauf aufbauend wird dargestellt, dass eine Anwendbarkeit des Modellansatzes für hochdynamische Zugbelastungen für Materialvariationen bezüglich der Fasergeometrie und des Fasergehaltes für den UHPC möglich ist. Wesentlich ist die Ermittlung eines materialspezifischen Datensatzes an Eingangsparametern für den Modellansatz, der im Rahmen der Arbeit für die betrachteten Varianten experimentell ermittelt worden ist.

Die Anwendung des Modellansatzes für weitere Varianten von Stahlfaserlängen und Stahlfasergehalte erfolgte durch eine analytische Studie. Es wurden die spezifischen Zugspannungs-Rissöffnungs-Verläufe bei hochdynamischer Zugbelastung berechnet sowie die dynamische Bruchenergie und die dynamische Zugfestigkeit ermittelt. Alle Ergebnisse sind in einer Leistungsfähigkeitsmatrix für den Grobkorn-UHPC B4Q zusammengefasst und durch die Materialkosten ergänzt.

Diese Matrix bietet eine Anwendungsmöglichkeit im baulichen Schutz. In Abhängigkeit vom Belastungsszenario, gegen das ein Bauwerk einen möglichst großen Widerstand aufweisen soll, kann ein UHPC ausgewählt werden, der im Hinblick auf Leistungsfähigkeit und Kosten die beste Konfiguration vorweist.

# Analysis and description of the dynamic tensile behavior of ultra-high performance concrete



Verfasser: Oliver Millon

# Abstract

The steady growth of the occurrence of extreme loading scenarios resulting from natural and man-made events has led to an increasing importance of the protection of building constructions, especially the critical infrastructure against these hazards during the last decades. Since concrete-structures are elementary elements in most fields of civil engineering, the increase of the performance of this kind of material has been shifted into the focus of the concrete research. In case of an extreme loading scenario, the protection-function of structures made of conventional and high-performance concrete shows limited effects. A building protection can often only be realized through an increase of the exposed building elements' dimensions. With regard to this fact, the application of fiber reinforced concrete, showing improved properties regarding strength, stiffness and energy absorption capacity, becomes an important option for the realization of protective structures. Steel fiber reinforced ultra-high performance concrete (SFR-UHPC) might be one possibility to comply with the growing requirements of safe constructions. Due to the use of high cost components, the UHPC is an expensive material; however, compared to standardized concretes, it has strong performance properties even under dynamic loading.

Besides the determination of possibilities of an economical application of UHPC in dependence of the loading scenario, this thesis closes an essential gap in the characterization of the ultra-high performance concrete "B4Q". Since the material heterogeneity and the strong influence of disturbances in the material composition have a strong impact on the failure of concrete under tension, this loading is considered to be critical. Consequently, the tensile behavior of the UHPC was considered with regard to quasi-static up to dynamic loading resulting in a stress-crack opening relation.

The results of a systematic analysis of the tensile behavior through experimental and numerical methods are presented. A final result is a mesoscopic model approach which calculates the tensile stress crack-opening history of the reference-UHPC. For this model, the behavior of the not reinforced concrete as well as the behavior of the fiber-reinforcement is analyzed and mathematically described separately and then combined to a model approach representing the behavior of the composite material.

The dynamic material model is based on a quasi-static approach which was an advancement of existing material models developed for normal and high-strength concretes in the past. The approach was adapted to fulfill the requirements of the reference-UHPC. An important basis of the material model is the analysis of the damage mechanisms which were evaluated on dynamically loaded structural elements through microscopic analysis and computer tomography. It was found that independent of the strain rate, identic mesoscopic failure mechanisms occur. The failure of the bond between steel-fibers and the surrounding concrete-matrix was identified as the essential failure mechanism which is responsible for the experimentally observed increase of the fracture energy. Consequently, this behavior has to be depicted through the model approach.

The model approach was validated for quasi-static loading through uni-axial tensile tests. The development of the dynamic model approach for its application to high strain rate tensile loading is accomplished by the consideration of the dynamic increase of essential model properties. A mathematical description of the dynamic increase in dependence on the strain rate is the foundation carried out for the tensile strength of the fiber-reinforced UHPC  $f_{ct}$  and the not reinforced UHPC  $f_{ct,m}$  as well as the fracture energy of the not reinforced material  $G'_{f,m}$  and the bond strength between steel-fibers and matrix  $\tau_b$ . The formulations have been determined through experimental studies for each property.

The validation of the dynamic model approach is accomplished for the reference-UHPC through spall-tests carried out on the Hopkinson-bar and the evidence of the conservation of the kinetic energy and the momentum for a control-volume consisting of the fragmented specimen and a part of the incident bar. For quasi-static loading as well as for high strain rate tensile loading, it is shown that the specific fracture energy derived from the model approach represents the value of the fracture energy determined in the experiments well.

Based on this finding, the applicability of the dynamic model approach to material variations regarding fiber content and fiber length is shown as well. Essential part is a specific data-set of material properties used in the model approach. Beside for the reference-UHPC, this data set has been determined experimentally as well through uniaxial tension tests not only for the reference-UHPC, but also for one variation of fiber content, two variations of fiber length and one variation of matrix compressive strength.

The application of the dynamic model approach for further variation of fiber-lengths and fiber contents was accomplished by an analytical study. The specific stress-crack-opening histories were determined, as well as the specific fracture energy and the tensile strength. All results are summarized in a performance matrix and complemented by material costs, which depend strongly on the steel-fiber content.

This matrix offers the possibility of application in the field of protective structures. In dependence on the loading scenario against which a building structure is supposed to have the highest possible resistance, the UHPC with the best configuration regarding material performance and costs can be chosen.