

Zugspannungs-Dehnung-Beziehung für UHPFRC

Tensile Stress-Strain Relationship for UHPFRC

Oettel, V.; Empelmann, M.

Abstract

In order to analyse the tensile stress-strain behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHP-FRC), the iBMB, Division of Concrete Construction has conducted 4-point bending tests with standard bending beams (15/15/70 cm) made of UHPFRC-mortar or UHP-FRC-concrete which differed in fibre slenderness and fibre content. A tensile stress-strain relation for UHPFRC based on the DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ /1/ was derived from the experimental results and finally validated by finite element analysis.

1. Einleitung

Dem spröden Versagen von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton (UHPC) kann durch die Zugabe von Stahlfasern wirksam entgegengewirkt werden. Die derzeit eingesetzten ultrahochfesten Faserbetone (UHPFRC) weisen in der Regel sehr hohe Fasergehalte auf, die zu einem sogenannten überkritischen Zugtragverhalten führen. Zur Bestimmung der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung von UHPFRC wurden am iBMB, Fachgebiet Massivbau 4-Punkt-Biegezugversuche an Standard-Biegebalken (15/15/70 cm) aus ultrahochfestem Fein- und Grobkornbeton mit unterschiedlichen Faserschlankeiten und -gehalten durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ /1/, für UHPFRC einen ähnlichen Ansatz zur Beschreibung der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung wie für normalfesten Faserbeton nach /1/ zu erhalten.

2. Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Insgesamt wurden zehn Versuchsserien aus der UHPC-Feinkornmischung M3Q oder der UHPC-Grobkornmischung B5Q mit variierendem Stahlfasergehalt (1,00 bis zu 2,50 Vol.-%) untersucht. Die Prüfvorrichtung, der Versuchsaufbau und die Messtechnik wurden entsprechend /1/ ausgeführt. Neben der Kraft F und der Durchbiegung δ wurde die Risshöhe h_{cr} manuell bei einer Durchbiegung δ von 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm und 3,5 mm gemessen. Die Last-Durchbiegungs-Kurven der einzelnen Versuchsserien können Bild 1 entnommen werden. Hierbei stellen die jeweils helleren Linien jeder Farbe die Einzelergebnisse und die dunkleren den Mittelwert der Versuchsserie dar.

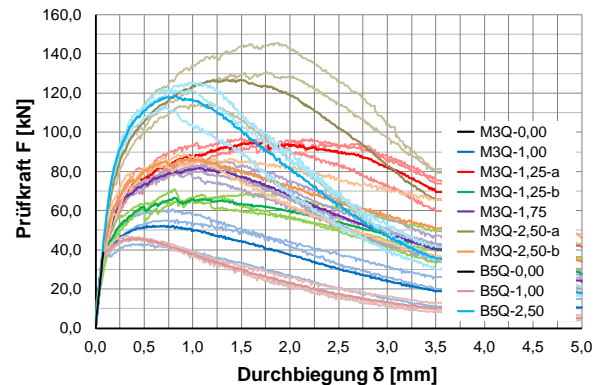


Bild 1: Last-Durchbiegungs-Diagramm der Biegezugversuche

3. Herleitung einer Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung

Damit eine Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für UHPFRC aufgestellt werden kann, müssen zunächst die Dehnungen bei den jeweiligen Durchbiegungen bekannt sein. Dazu wurde ein mechanischer Zusammenhang zwischen Dehnung ϵ , Durchbiegung δ und Rissprozess-zonenlänge hergestellt. Angaben zur genauen Herleitung des Zusammenhangs zwischen Dehnung ϵ und Durchbiegung δ sind /2/ zu entnehmen. Aus der Herleitung ergaben sich folgende Zusammenhänge:

- $\delta = 0,1$ mm entspricht $\epsilon = f_{ctm}/E_{cm}$
- $\delta = 0,5$ mm entspricht $\epsilon = 3,50$ ‰
- $\delta = 3,5$ mm entspricht $\epsilon = 25,0$ ‰

Für die Zugspannungen im gerissenen Zustand II wurde analog zu /1/ die Prüfkraft F in eine Biegezugfestigkeit umgerechnet und anschließend mittels eines Faktors β die zentrische Nachrisszugfestigkeit bestimmt. Hierbei konnten die Umrechnungsfaktoren β_{Li} der DAfStb-Richtlinie nicht ohne Weiteres auf UHPFRC übertragen werden, da der Faktor β von der Risshöhe h_{cr} und dem Spannungsverlauf in der Druckzone abhängt. Bei der Modifikation des β -Faktors wurde eine dreiecksförmige Druckzonenspannung angesetzt, was dem nahezu linearen Verhalten von UHPFRC unter Druckbeanspruchung bis zum Versagen entspricht (vgl. /3/). In der Zugzone wurde im ungerissenen Bereich eine dreiecksförmige Spannungsverteilung und im gerissenen Bereich verein-

facht ein rechteckiger Spannungsbereich angesetzt. Über Gleichgewichtsbetrachtungen der Momente im Zustand I und II wurde der Faktor β_δ in Abhängigkeit der Durchbiegung δ und der Rissbreite h_{cr} bestimmt. Damit nicht bei jeder Biegebalkenprüfung die Rissbreite h_{cr} gemessen werden muss, wurden die Faktoren β_δ in Korrelation mit der maximalen Prüfkraft F_{max} und der Kraft an der Elastizitätsgrenze F_{el} gebracht. Die β_δ -Faktoren ergeben sich zu:

$$\beta_{0,5} = 0,19 \cdot F_{max}/F_{el} + 0,37 \quad (1)$$

$$\beta_{3,5} = 0,37 \quad (2)$$

Mit den hergeleiteten β_δ -Faktoren ist es möglich die Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für UHPFRC aus der Last-Durchbiegungs-Kurve zu bestimmen (Bild 2).

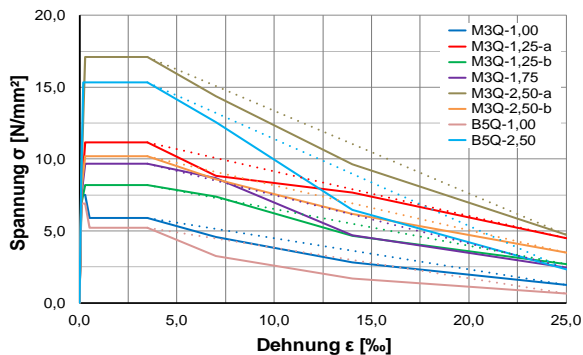


Bild 2: Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung der einzelnen Versuchsserien

4. Validierung der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung mit der FEM

Zur Validierung des Ansatzes wurden die Biegezugversuche mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) unter Verwendung der hergeleiteten Zugspannungs-Dehnungs-Beziehungen nachgerechnet und anschließend die Last-Verformungs-Kurven der FE-Berechnungen mit denen der Versuche verglichen. Hierfür wurde das FE-Programm DIANA [4] verwendet (Bild 3).

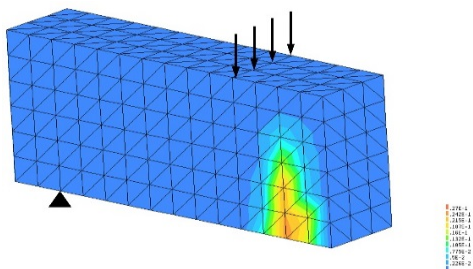


Bild 3: FE-Viertelmodell eines Standard-Biegebalkens

Da die Biegebalken achsensymmetrisch sind, wurden diese zur Reduzierung des Rechenaufwands als Viertelmodell modelliert (Bild 3). Zur Nachrechnung der Biegezugversuche wurden die ermittelten Zugspannungs-Dehnungs-Beziehungen (Bild 2, gepunktete Linien) in DIANA implementiert.

Aus dem Vergleich der Last-Verformungs-Kurven in Bild 4 zeigt sich, dass mit den FE-Berechnungen und der darin implementierten multilinearen Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung eine gute bis sehr gute Übereinstimmung sowohl des Traglastniveaus als auch der Verformungen im abfallenden Ast erzielt wird.

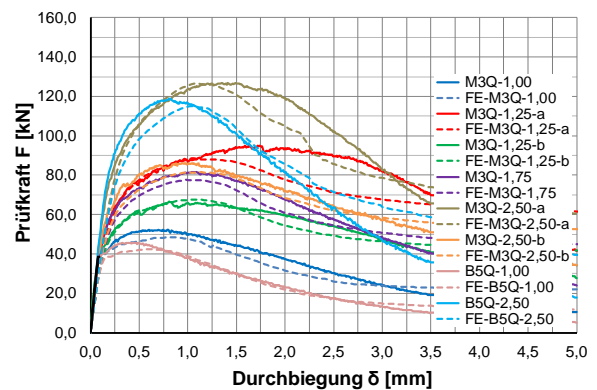


Bild 4: Nachrechnung der einzelnen Versuchsserien

5. Fazit

Mithilfe der entwickelten Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung ist es möglich, unter Annahme der Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte, die ermittelten Zugdehnungen einer Zugspannung zuzuordnen und somit das Zugtragverhalten von UHPFRC bei der Bemessung zu berücksichtigen.

6. Literatur

- /1/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton (2010-03), Berlin, 2009.
- /2/ Oettel, V.; Empelmann, M: Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für UHPFRC in Anlehnung an DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Heft 7, S. 468–478.
- /3/ Schmidt, M. et al: Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 561, Berlin 2008.
- /4/ DIANA Finite Element Analysis: User's Manual – Release 9.4. First Edition, Delft 2010.