

# Bestimmung der zentrischen Nachrisszugfestigkeit von UHPFRC mithilfe gekerbter 3-Punkt-Biegezugversuche

## Tensile Stress-Strain Relationship for UHPFRC based on notched 3-point-bending tests

Empelmann, M.; Oettel, V.; Matz, H.

### Abstract

Both the tensile strength and the post-cracking tensile strength of fibre reinforced concrete are generally determined indirectly by bending tests. For this purpose, a force-deformation curve has to be converted into a tensile stress-strain curve. For ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) there is currently no regulated conversion procedure due the lack of valid standards and guidelines. To analyse the tensile stress-strain behaviour of UHPFRC, notched 3-point-bending tests according DIN EN 14651 were carried out at iBMB, Division of Concrete Construction. A conversion procedure for UHPFRC based on the Model Code 2010 was developed taking into account the test results. The finite element method (FEM) was applied for validation.

### 1. Einleitung

Ultrahochfesten Betonen (UHPC) werden aufgrund der spröden Versagenseigenschaften meist Stahlfasern beigemischt. Hierdurch entstehen ultrahochfeste Faserbetone (UHPFRC), die infolge der üblicherweise eingesetzten hohen Fasergehalte hohe Nachrisszugfestigkeiten aufweisen. Diese sollten bei der Bemessung von UHPFRC-Bauteilen aus Gründen der verbesserten Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden. Zur Bestimmung der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung von UHPFRC wurden gekerbte 3-Punkt-Biegezugversuche nach DIN EN 14651 (15/15/55 cm) /1/ aus ultrahochfestem Feinkornbeton mit unterschiedlichen Fasergehalten durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, eine aus 3-Punkt-Biegezugversuchen abzuleitende Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für UHPFRC in Anlehnung an den Model Code 2010 /2/ zu entwickeln.

### 2. Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Insgesamt wurden sechs Versuchsserien aus der UHPC-Feinkornmischung M3Q mit variierendem Stahlfasergehalt (0,00 bis zu 2,50 Vol.-%) untersucht. Die Prüfvorrichtung, der Versuchsaufbau und die Messtechnik wurden entsprechend /1/ ausgeführt. Neben der Kraft  $F$  und der Durchbiegung  $\delta$  wurde die Risshöhe  $h_{cr}$  manuell 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.

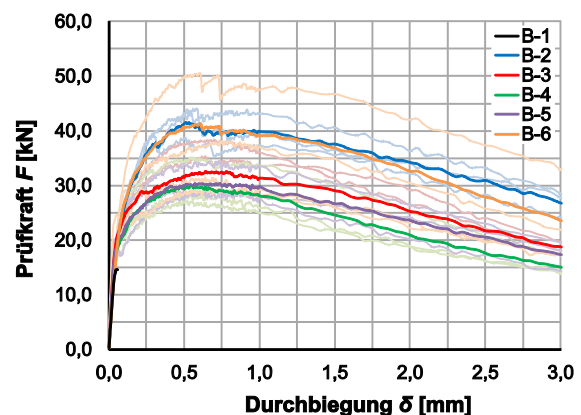


Bild 1: Last-Durchbiegungs-Diagramm der gekerbten 3-Punkt-Biegezugversuche

### 3. Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung

Damit eine Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für UHPFRC aufgestellt werden kann, müssen zunächst die Durchbiegungen  $\delta$  mit den entsprechenden Rissbreiten (CMOD) und Dehnungen  $\varepsilon$  verknüpft werden. Angaben zur Herleitung der folgenden Zusammenhänge sind /3/ zu entnehmen.

- $\delta \approx 0,05 \text{ mm}$  entspricht  $\varepsilon_{el} = f_{ct}/E_c$
- $\delta_1 = 0,47 \text{ mm}$  (CMOD<sub>1</sub> = 0,5 mm) entspricht  $\varepsilon_{FTS} = 0,5/l_{cs}$
- $\delta_3 = 2,17 \text{ mm}$  (CMOD<sub>3</sub> = 2,5 mm) entspricht  $\varepsilon_{FTu} = 2,5/l_{cs}$

Die Länge  $l_{cs}$  wird im Model Code 2010 /2/ als „structural characteristic length“ bezeichnet und kann für Faserbetone, die einer Biegebeanspruchung ausgesetzt sind, mit der Balkenhöhe  $h_{sp} = 125 \text{ mm}$  gleichgesetzt werden. Für die Zugspannungen im gerissenen Zustand II wurde analog zu /2/ die Prüfkraft  $F$  in eine Biegezugfestigkeit umgerechnet und anschließend mittels eines Faktors  $\beta$

die zentrische Nachrisszugfestigkeit bestimmt. Hierbei konnten bekannte Faktoren für normal- und hochfesten Beton aus dem Model Code 2010 nicht übernommen werden, da der Faktor  $\beta$  von der Risshöhe  $h_{cr}$  sowie dem Spannungsverlauf abhängt. Bei der Herleitung der auf UHPFRC angepassten Faktoren wurden die in Bild 2 dargestellten Spannungsverläufe angenommen, welche sich aus den gemessenen Risshöhen  $h_{cr,m,1} = 78 \text{ mm}$  und  $h_{cr,m,3} = 116 \text{ mm}$  ergaben.

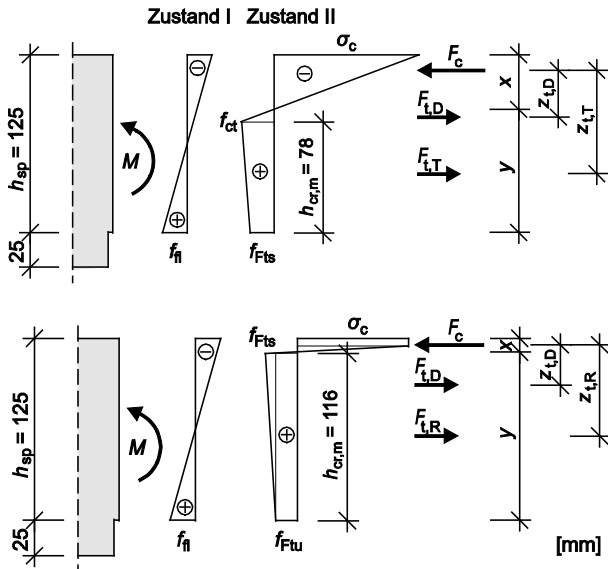


Bild 2: Spannungsverläufe für  $\delta_1$  (oben) und  $\delta_3$  (unten)

Über Gleichgewichtsbetrachtungen der Momente im Zustand I und II wurden die Faktoren  $\beta_1$  und  $\beta_3$  bestimmt. Die  $\beta$ -Faktoren ergeben sich zu:

$$\beta_1 = 0,37 \quad (1)$$

$$\beta_3 = 0,54 - 0,20 \cdot f_{R,1}/f_{R,3} \quad (2)$$

Mit den hergeleiteten  $\beta$ -Faktoren ist es möglich die Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für UHPFRC aus der Last-Durchbiegungs-Kurve zu bestimmen (Bild 3).

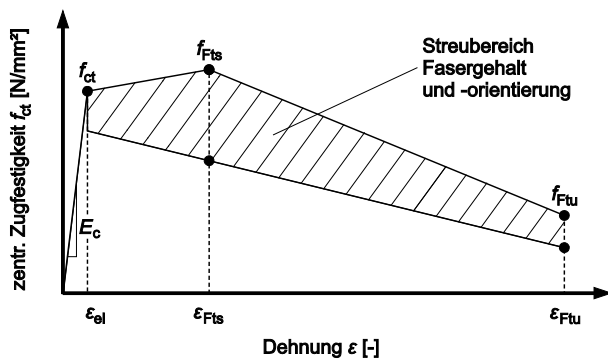


Bild 3: Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung

## 4. Validierung mit der FEM

Zur Validierung des Ansatzes wurden die Biegezugversuche mit der 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 FEA [4] verwendet. 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 sehr gute Übereinstimmung sowohl des Traglastniveaus als auch der Verformungen im abfallenden Ast erzielt wird.

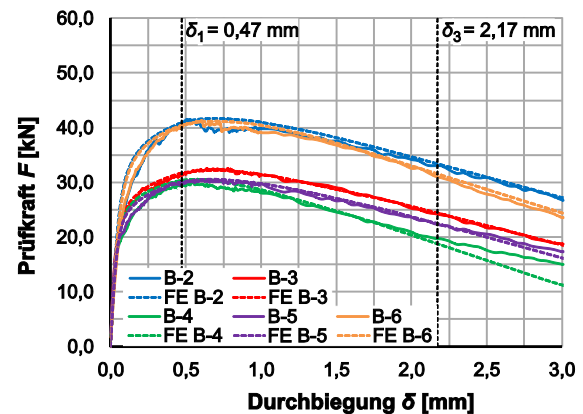


Bild 4: Nachrechnung der einzelnen Versuchsserien

## 5. Fazit

Mithilfe der hergeleiteten Dehnungen  $\epsilon_{el}$ ,  $\epsilon_{Fts}$  und  $\epsilon_{Ftu}$  sowie den Umrechnungsfaktoren  $\beta_1$  und  $\beta_3$  können aus gekerbten 3-Punkt-Biegezugversuchen Zugspannungs-Dehnungs-Beziehungen abgeleitet und somit das Tragverhalten von UHPFRC bei der Bemessung berücksichtigt werden.

## 6. Literatur

- /1/ DIN EN 14651: Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung der Biegezugfestigkeit, 2007.
- /2/ fib MC10: Model Code 2010 for Concrete Structures, 2013.
- /3/ Oettel, V.; Matz, H.; Empelmann, M: Bestimmung der zentrischen Nachrisszugfestigkeit von UHPFRC mithilfe gekerbter 3-Punkt-Biegezugversuche. In: Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 4, S. 255–264.
- /4/ DIANA Finite Element Analysis: User's Manual – Release 9.4. First Edition, Delft 2010.