



Doctoral Thesis

## Micro-fiber cement pullout tests, uniaxial tensile tests and material scaling

**Author(s):**

Rieger, Carsten

**Publication Date:**

2010

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006342957> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH N° 19396

# **Pullout Tests, Micro-Fiber Cement Uniaxial Tensile Tests and Material Scaling**

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Sciences  
(Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

CARSTEN RIEGER

Dipl.-Ing., TU Darmstadt

born 19<sup>th</sup> November 1978

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. dr.ir. Jan G.M. van Mier (examiner)  
Institut für Baustoffe, D-BAUG, ETH Zürich

Prof. Dr. Viktor Mechtcherine (co-examiner)  
Institut für Baustoffe, TU Dresden

Prof. Dr. Peter Marti (co-examiner)  
Institut für Baustatik und Konstruktionen, D-BAUG, ETH Zürich

2010

# Summary

This thesis presents the results from investigations on micro-fiber reinforced cement, obtained from pullout experiments and uniaxial tensile tests.

The micro-fibers used were produced by cutting fibers from a fine steel wire, which ensured a straight geometry of the fiber. The fibers were produced at the Institute for Building Materials at ETH Zurich.

After an overview of preliminary investigations on the bending behavior of specimens containing cut fibers in comparison to industrially produced micro-fibers, this study is focused on the single fiber pullout behavior and uniaxial tensile tests.

Single fiber pullout tests were performed with two different wire types: an un-annealed and an annealed wire, which was heat-treated at wire production. Compared to the un-annealed one, the annealed wire shows a lower strength but a much larger strain capacity. These two wire types were then embedded in cement matrices with different w/c-ratios and with varying lengths. In order to perform these tests in an environmental scanning electron microscope (ESEM) a micro tensile test device was developed. The in-situ tests in ESEM allow to measure the fiber slip from the ESEM images. By comparing the displacement measured from the ESEM pictures to the displacement measured with the LVDT mounted on the device the pullout start can be identified and the elastic deformation of the free fiber length can be identified. The results of the pullout tests show that for lower w/c-ratios larger pullout strengths can be obtained, whereas the pullout work, which is defined as the area under the load displacement diagram from peak-load, increases with increasing w/c-ratio. For the annealed wire both the pullout load and the pullout-work basically remained constant for all w/c-ratios and all embedded lengths, which results from the wire behavior. The un-annealed wire shows differences both for different w/c-ratios as well as for different embedded lengths. For 2mm embedded length a clear decrease in the maximum pullout-load can be observed with increasing w/c-ratio whereas for 3mm and 4mm the values stay constant. The pullout-work per mm embedded length was observed to increase with increasing embedded length. A possible explanation for this was found in longitudinal sections of the pullout specimens and the pulled-out wire. Close to the surface a larger porosity was observed for all specimens.

This surface effect is relatively larger for small embedded lengths. For larger  $w/c$ -ratios a de-bonding can be observed between fiber and matrix and due to the porous matrix cracks occur in the matrix close to the fibers. This leads to cement particles sticking to the fiber and may result in an interlock during fiber pullout.

A second focus was the behavior of micro-fiber reinforced cement subjected to uniaxial tension. The tests were performed on dogbone-shaped specimens with freely rotating supports. Apart from tests on specimens containing micro-fibers the size effect phenomenon was investigated by scaling the cement grains and the fibers as well as the specimen size. Furthermore, the whole test set-up was scaled, including the hinges that allowed for free rotation of the loading platens. For comparison reasons tests on specimens with different sizes made of identical material were performed. The scaled material was tested with  $w/c=0.2$  and  $0.3$  whereas the identical material was tested only with  $w/c=0.2$ . The results show that the size effect was not only affected by the varying size of the structure, but also by scaling of the material itself. The scaling factor in this case is different from the scaling factor used for identical material, because the area of the interface between fiber and matrix is the important factor for fiber-reinforced materials. Although the size effect could be diminished, the results with the scaled material still show a size effect which can be explained with the hydration products that show the same size for small cement grains as well as for large cement grains. This affects the interface between fiber and matrix which is an important factor for the fiber bond. However, these results show, that apart from the change of structural size, the micro-structure of the material itself has a large influence on the size effect.

# Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Ergebnisse von Untersuchungen an mikrofaser-verstärktem Zementstein gezeigt. Diese wurden anhand von Faserauszugversuchen und uniaxialen Zugversuchen ermittelt.

Die verwendeten Mikro-Fasern wurden produziert, indem Stücke von einem Feindraht abgeschnitten wurden. Durch dieses Verfahren wurde sichergestellt, dass die Fasern eine glatte Oberfläche und gerade Enden aufwiesen. Die Fasern wurden am Institut für Baustoffe an der ETH Zürich produziert.

Nach einem Überblick über Voruntersuchungen zum Biegeverhalten von Zementstein-Proben mit selbst geschnittenen Fasern im Vergleich zu industriell gespannten Mikro-Stahlfasern konzentriert sich diese Arbeit auf Einzelfaser-Auszugversuche und uniaxiale Zugversuche.

Die Einzelfaser-Auszugversuche wurden mit zwei verschiedenen Draht-Typen durchgeführt: Einmal mit ungeglühtem Draht und mit geglühtem Draht, der bei der Faserproduktion erhitzt wurde. Verglichen mit dem ungeglühten Draht hat der geglühte Draht eine geringere Zugfestigkeit, aber ein viel höheres Dehnungsvermögen. Diese beiden Draht-Typen wurden in Zementstein mit verschiedenen  $w/z$ -Werten und in verschiedenen Längen eingebettet. Um die Zugversuche in einem Elektronenmikroskop (ESEM) durchzuführen, wurde eine Mikro-Zugbühne entwickelt. Bei in-situ-Versuchen im ESEM kann der Faserauszug anhand von ESEM-Bildern gemessen werden. Durch Vergleichen der Drahtverschiebung aus den ESEM-Bildern mit der Verschiebung, die an der Zugbühne mit einem Wegaufnehmer gemessen wurde, kann der Start des Faserauszugs bestimmt und die elastische Verformung des freien Drahtes identifiziert werden. Die Ergebnisse der Auszugversuche zeigen, dass für kleinere  $w/z$ -Werte höhere Auszugskräfte erreicht werden. Im Gegensatz dazu steigt die Auszugsarbeit, die als die Fläche unter dem Last-Verschiebungsdiagramm von der Maximalkraft an definiert ist, mit höherem  $w/z$ -Wert an. Beim geglühten Draht bleiben die Auszugskraft und die Auszugsarbeit sowohl bei allen  $w/z$ -Werten als auch bei allen Einbindelängen konstant. Dies kann durch das Drahtverhalten erklärt werden kann. Der ungeglühte Draht zeigt sowohl bei unterschiedlichen  $w/z$ -Werten als auch bei verschiedenen Einbindelängen Unterschiede: Bei 2 mm Einbindelänge kann ein klarer Abfall der Auszugskraft mit steigendem  $w/z$ -Wert festgestellt werden, während bei 3 und 4 mm

die Werte konstant bleiben. Die Auszugsarbeit pro mm Einbindelänge wird mit steigender Einbindelänge grösser. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten wurde an Längsschliffen von Auszugsproben und am ausgezogenen Draht gefunden. Nahe der Oberfläche wurde eine erhöhte Porosität an allen Proben festgestellt. Dieser Randeffect ist, relativ gesehen, grösser bei kleineren Einbindelängen. Bei grösseren  $w/z$ -Werten kann ein Ablösen nicht nur zwischen Faser und Matrix festgestellt werden, sondern auch in der porösen Kontaktzone nahe der Faser. Dies führt dazu, dass Zementpartikel an der Faser haften bleiben und zu einer Verkantung während des Auszugversuchs führen.

Ein weiterer Fokus wurde auf Zugversuche an mit Mikro-Stahlfasern verstärktem Zementstein gelegt. Die Zugversuche wurden an Schulterproben mit frei drehbarer Lagerung durchgeführt. Neben den Zugversuchen an Proben mit Mikro-Stahlfasern wurde der Massstabseffekt untersucht, indem die Ausgangsmaterialien, wie Zementkörner und Fasern, gleich wie die Probengeometrie skaliert wurden. Des weiteren wurde die gesamte Aufhängung der Proben, inklusive der Gelenke und Belastungsplatten skaliert. Zum Vergleich wurden Proben in unterschiedlicher Grösse aus dem gleichen Material hergestellt. Das skalierte Material wurde mit  $w/z$ -Werten 0.2 und 0.3 hergestellt; die Proben aus dem gleichen Material wurden nur mit  $w/z=0.2$  hergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Massstabseffekt nicht nur durch die unterschiedliche Grösse der Proben sondern auch durch das unterschiedliche Material beeinflusst wird. Der Skalierungsfaktor ist für die Proben aus skaliertem Material ein anderer als für die Proben aus gleichem Material, weil die Kontaktzone zwischen Faser und Matrix die massgebende Grösse für faserbewehrte Materialien ist. Obwohl der Massstabseffekt vermindert werden konnte, zeigen die Ergebnisse mit skaliertem Material noch immer einen Massstabseffekt. Dieser kann dadurch erklärt werden, dass die Reaktionsprodukte die gleiche Grösse bei kleinen wie bei grossen Zementkörnern aufweisen. Die Hydratationsprodukte beeinflussen die Kontaktzone zwischen Faser und Matrix, die ein wichtiger Faktor für den Faserverbund ist. Diese Ergebnisse zeigen jedoch, dass neben den Unterschieden in der Probengrösse auch die Mikro-Struktur des Materials selbst einen grossen Einfluss auf den Massstabseffekt hat.