

Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton

Zusammenfassung

**École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Institut de structures – Construction en béton**

**Dipl. Ing. Jörg Jungwirth
Prof. Dr. Aurelio Muttoni**

Projekt 00.02, Bericht 00.02.R8 August, 2005

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	<i>Konzept der Versuchsserie</i>	1
1.2	<i>Übersicht der durchgeführten Versuche</i>	2
2	Materialversuche	5
2.1	<i>Werkstoff</i>	5
2.2	<i>Druckversuche</i>	5
2.3	<i>Zugversuch</i>	7
2.4	<i>Biegeversuche</i>	10
2.5	<i>Versuche mit Bewehrungselementen</i>	11
2.6	<i>Erkenntnisse</i>	13
3	Bauteilversuche	15
3.1	<i>Probekörper</i>	15
3.2	<i>Zugelemente</i>	15
3.3	<i>Druckelemente</i>	18
3.4	<i>Erkenntnisse</i>	23
	Literaturverzeichnis	25
	Danksagung	27

1 EINLEITUNG

Durch Optimierung der Betonrezeptur und Zugabe von Stahlfasern wurde von der Zementindustrie ein neuer, sehr leistungsfähiger zementöser Werkstoff, der UltraHochFeste FaserBeton, entwickelt. Die Werkstoffeigenschaften des UHFB und somit das Tragverhalten der aus ihm gefertigten Bauteile, weichen stark von denen des traditionellen Betons ab. Um Aussagen über geeignete Tragsysteme und Konzepte für den Entwurf von statisch effizienten Tragwerken aus UHFB machen zu können, sind zunächst grundlegende Studien seiner speziellen Materialeigenschaften nötig.

Mit den in diesem Bericht dargestellten Versuchen werden das mechanische Materialverhalten und das Tragverhalten vornehmlich axialer belasteter Bauteile aus ultrahochfestem Faserbeton analysiert. Basierend auf die hier gewonnen Erkenntnisse, wird im Rahmen der Forschungsarbeit „Tragwerke aus UHFB“ ein Modell zur Beschreibung des Tragverhaltens von Tragwerken aus UHFB entwickelt.

Bei dem vorliegenden Bericht handelt es sich um eine Kurzfassung der beiden Versuchsberichte ‚Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton – Material‘ [5] und ‚Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton – Bauteile‘ [6].

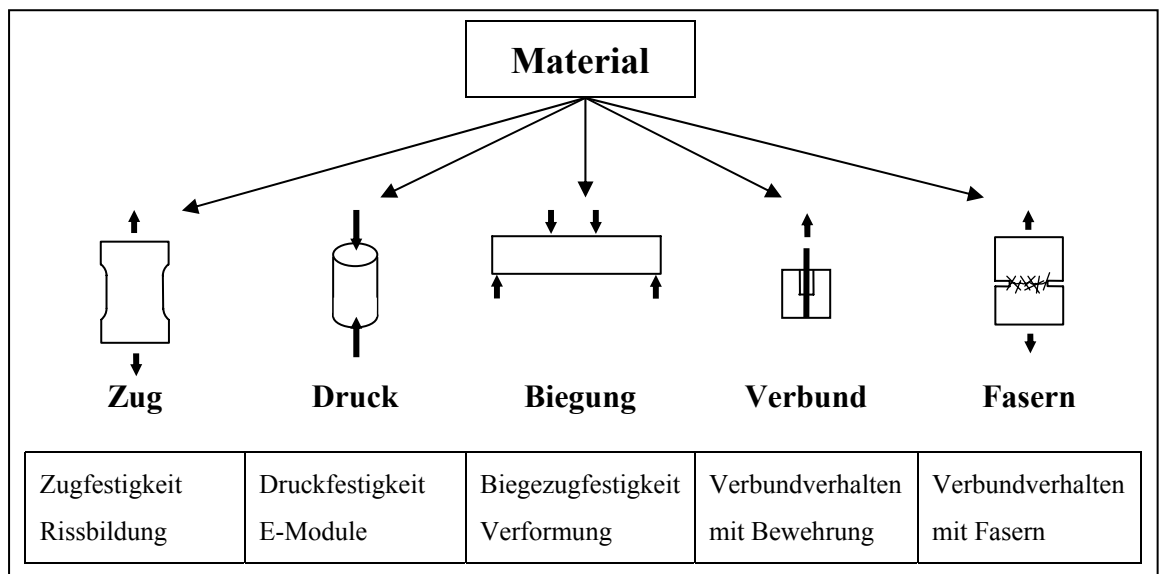
1.1 KONZEPT DER VERSUCHSSERIE

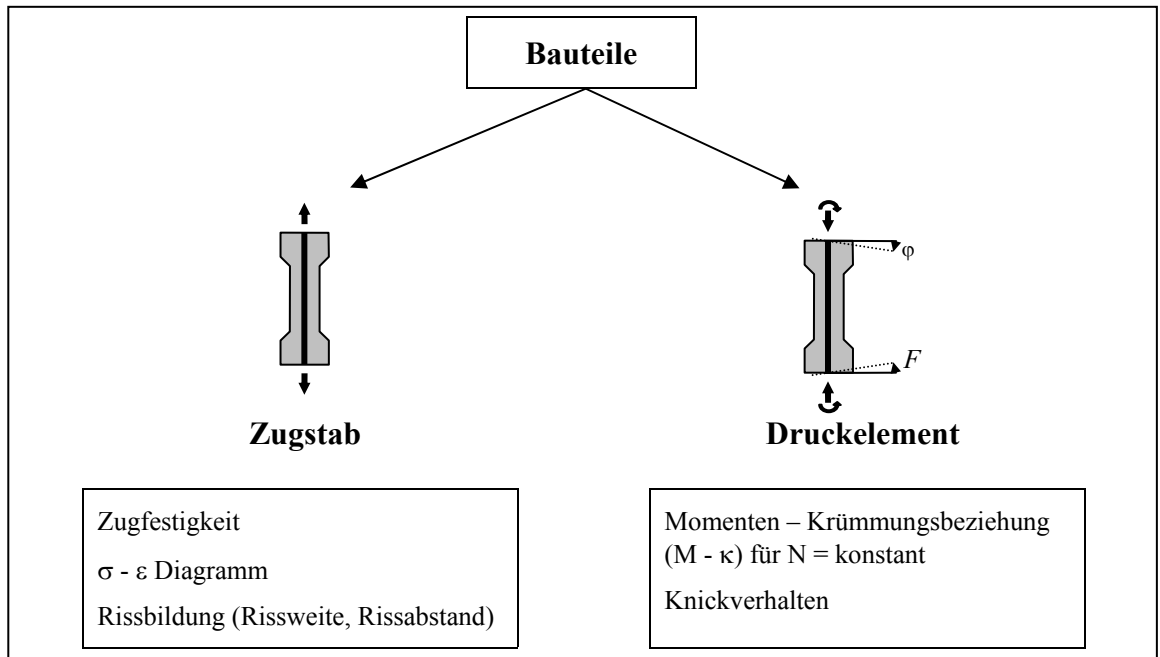
Die Versuche sind in mehrere Versuchsblöcke zusammengefasst. In den einzelnen Versuchsblöcken werden folgende Gesichtspunkte behandelt:

- In einem ersten Versuchsblock wird das Materialverhalten von UHFB untersucht und ergänzende Werkstoffversuche durchgeführt. Ziel ist es, das Materialverhalten zu verstehen, um es folgend modellieren zu können.
- Der zweite Versuchsblock beschäftigt sich mit Bauteilen aus UHFB. Hier werden Druck- und Zuelemente untersucht, welche unbewehrt, mit Stabstahl bewehrt oder vorgespannt ausgeführt sind.

Folgend sind die einzelnen Versuchsblöcke schematisch dargestellt:

VERSUCHSBLOCK: MATERIAL => VERSUCHSBERICHT TEIL 1





1.2 ÜBERSICHT DER DURCHFÜHRTEN VERSUCHE

Um eine geeignete Basis für die Modellierung des Tragverhaltens von Bauteilen aus UHFB zu etablieren, ist es zunächst nötig das ermittelte Materialverhalten mit einem vereinfachten Ingenieurmodell zu beschreiben. Dies sollte sich auf wenige, leicht zu ermittelnde Parameter stützen.

Zur Ermittlung dieser Parameter werden Zug-, Druck- und Biegeversuche durchgeführt. Ergänzt werden diese durch Ausziehversuche, Versuche zur Untersuchung des Verbundes zwischen UHFB und den eingelagerten Stahlfasern bzw. verschiedenen Bewehrungselementen (Bewehrungsstahl und Spannlitzen). Mit Versuche an Prismen 40 x 40 x 160 mm, welche bei allen Mischchargen durchgeführt werden, wird die gleich bleibende Qualität des Betons überprüft.

In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Versuche schematisch zusammengefasst.

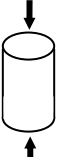
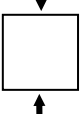
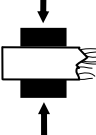
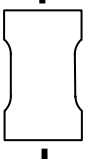
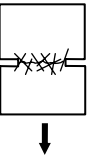
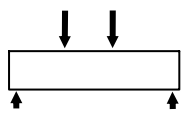
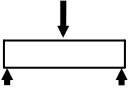
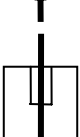
	Schema	Abmessungen	Anzahl	Parameter	Zielsetzung
Druck		Ø70 mm x 140 mm	2 x 4 Σ = 8	Faserbewehrt / Unbewehrt	Druckfestigkeit σ - ε Diagramm E-Modul Einfluss der Fasern
		100 mm Kantenlänge	18	24 h, 7 d, 28 d	Druckfestigkeit Zeitabhängige Festigkeitsentwicklung Vergleich mit Lieferant
		40 x 40 x ≈80 mm	je 3 Σ = 66	Bei allen Mischerchargen	Druckfestigkeit Überprüfung der einzelnen Mischerchargen
Zug		700 x 160 x 50 mm	4	Faserbewehrt / Unbewehrt	Zugfestigkeit σ - ε Diagramm Rissbildung Einfluss der Fasern
		500 x 200 x 50 mm	3	-	Rissöffungsverhalten Faserausziehverhalten Verbundverhalten mit Fasern
Biegung		100 x 100 x 400 mm	3	-	Biegezugfestigkeit M-κ Diagramm Rissbildung Relation Zugversuch - Biegeversuch
		40 x 40 x 160 mm	je 3 Σ = 66	Bei allen Mischerchargen	Biegezugfestigkeit Überprüfung der einzelnen Mischerchargen
Verbund		160 mm Kantenlänge	3x3 Σ = 9	Bewehrung Ø12 mm, Ø20 mm Spannstahl Ø15.7 mm	Verbundverhalten mit Bewehrung Krafteinleitungslänge

Tabelle 1: Übersicht der Materialversuche

Basierend auf das ermittelte Materialverhalten wird im zweiten Teil das Tragverhalten von Bauteilen aus UHFB untersucht. Neben der grösseren Dimension der Prüfkörper und dem hieraus folgenden Einfluss auf das Tragverhalten, bedeutet dies auch die Berücksichtigung des Einsatzes von Bewehrungselementen.

Mit den Versuchen wird das Tragverhalten vornehmlich axialer belasteter Bauteile untersucht. Es werden zentrisch belastete Zuelemente getestet, wobei eine unbewehrte Probe, drei Proben mit unterschiedlichen Bewehrungsgraden und eine vorgespannte Probe geprüft werden. Bei druckbelasteten Bauteilen spielt die Exzentrizität der Belastung eine wesentliche Rolle, weshalb Versuchskörper mit einer kombinierten Druck – Biegebelastung getestet werden. Die je drei Elemente

einer Serie sind unbewehrt, bewehrt bzw. vorgespannt und werden jeweils auf drei verschiedene Lastniveaus vorbelastet.

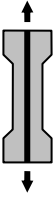
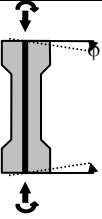
	Schema	Typ	Parameter	Anzahl	Zielsetzung
Zugversuche		bewehrte bzw. vorgespannte Zuelemente 160 x 160 x 1500mm knochenförmig	Bewehrung: 0 4Ø12 4Ø16 4Ø20 4Ø15.7	5	Zugfestigkeit $\sigma - \epsilon$ Diagram Rissbildung (Rissweite, Rissabstand)
Druckversuche		bewehrte bzw. vorgespannte Druckelemente 160 x 160 x 1500mm knochenförmig	Bewehrung: 0 4Ø20 4 Ø15.7 Last N: 0.3, 0.5 und 0.7 F_c	3 x 3 = 9	Momenten – Krümmungsbeziehung (M- κ) für N = konstant Knickverhalten

Tabelle 2: Übersicht der Bauteilversuche

2 MATERIALVERSUCHE

2.1 WERKSTOFF

Die Versuche werden mit dem ultrahochfesten Beton BSI[®]/CERACEM der Firmen SIKA und EIFFAGE durchgeführt, welcher als fertig konfektionierter Premix geliefert wird. Der ultrahochfeste Beton BSI[®]/CERACEM (Spezifizierung BFM – Millau) ist wie folgt zusammengesetzt (Tabelle 3):

Bestandteile	Einheit	Menge
Premix: Zement CEM 1, Mikrosilica, gebrochener Zuschlag aus gebranntem Bauxit 0 - 7 mm	kg/m ³	2355
Stahlfasern: $l_f = 20$ mm, $\varnothing = 0.3$ mm, $f_s > 1250$ MPa	kg/m ³	195
Fliessmittel: Polycarboxylat, Marke Sikacret	kg/m ³	44.6
Wasser	kg/m ³	195

Tabelle 3: Zusammensetzung des ultrahochfesten Beton BSI[®]/CERACEM

Bei den eingesetzten Stahlfasern handelt es sich um glatte, aus einem hochfesten Stahldraht geschnittene Fasern ohne Endhacken. Der gebrochene Zuschlag aus Bauxit besitzt eine hohe Festigkeit und ein grosses E – Modul. Das Fliessmittel ist ein eigens für den ultrahochfesten Beton optimiertes Produkt der Firma SIKA.

Mit seinen grossen Zuschlägen von bis zu 7 mm und den dicken Stahlfasern weist der CERACEM im Vergleich mit anderen UHFB eine sehr grosskörnige und grobe Struktur auf. Der Faseranteil beträgt 2.5 Volumenprozent. Der Wasser / Zementwert liegt bei 0.22 und der Wasser / Bindemittelwert bei 0.19.

UHFB ist sehr sensibel bezüglich der genauen Dosierung der Inhaltstoffe wie auch der akkurat einzuhaltenden Mischprozedur. Der Mischprozess erfolgt gemäss folgendem Schema in dem leistungsfähigen Gleichlauf - Zwangsmischer mit vertikaler Achse Typ Zyklus ZZ 75. Die Bestandteile werden in der dargestellten Reihenfolge hinzugefügt und jeweils mit der angegebenen Dauer gemischt.

Bestandteil	Mischdauer
Premix	1 min
Wasser	3 min
Fliessmittel	5 min
Stahlfasern	3 min

Tabelle 4: Mischprozess des Premixes

Der UHFB ist selbstverdichtend und wird entsprechend ohne Vibrieren oder anderweitiges Verdichten in die Schalung eingebracht. Zur Nachbehandlung werden die Probekörper direkt nach dem Betonieren mit einer Plastikfolie abgedeckt um das Austrocknen zu verhindern. Nach 3 Tagen werden sie ausgeschalt und anschliessend bis zur Versuchsdurchführung in einem Wasserbecken bei 20 °C gelagert. Die Versuche werden, wenn nicht anders erwähnt, nach 28 Tagen durchgeführt.

2.2 DRUCKVERSUCHE

Es werden Druckversuche an zylindrischen Probekörpern durchgeführt. Pro Serie (bewehrt, unbewehrt) werden jeweils 4 Proben getestet. Die Probekörper haben eine Höhe von 140 mm bei 70 mm Durchmesser (Bild 1 a). Die Stirnflächen der Proben werden plan geschliffen, wodurch sich die Höhe um 2 bis 4 mm verringert.

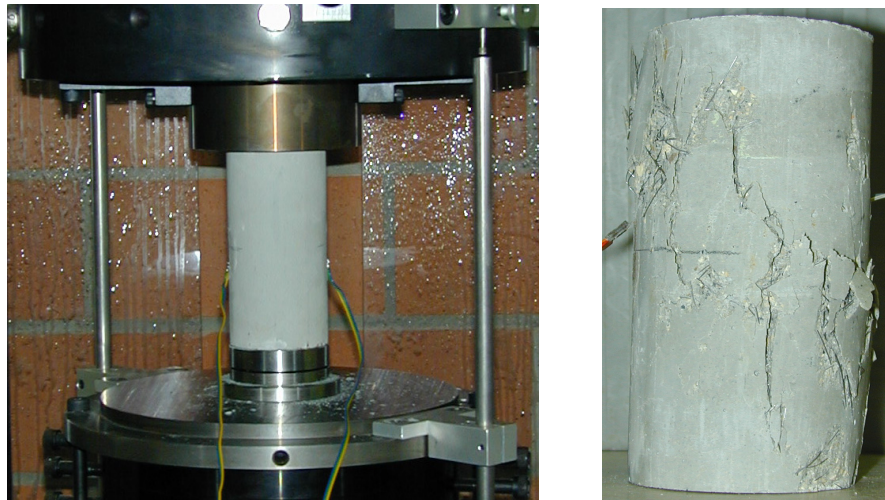


Bild 1 a,b: Versuchsaufbau und geprüfter Druckzylinder mit diagonaler Bruchfuge

Am Bruchbild der Zylinder zeigt sich der Bruchmechanismus von Druckelementen aus UHFB (siehe Bild 1 b). Deutlich sind Längsrisse im mittleren Bereich der Probe zu erkennen. Die Proben versagen ohne Vorankündigung durch Abscheren entlang einer diagonalen Gleitebene. Nach dem Bruch hält die Probe durch die beim Bruch weitgehend intakt bleibenden Fasern kompakt zusammen. Es bilden sich einzelnen Schollen aus, welche untereinander durch die Fasern verbunden sind. Von ihnen kann weiterhin eine gewisse Druckkraft aufgenommen werden.

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm (Bild 2) zeigt im ungerissenen Zustand ein quasi lineares Verhalten mit einem E-Modul von 60 GPa. Kurz vor dem Bruch kommt es zu einer leichten Abnahme der Steifigkeit. Der Druckzylinder versagt bei einer Festigkeit von $f_c = 191$ MPa schlagartig, wobei es zu einem sprunghaften Festigkeitsverlust von rund 20 MPa (ca. 10%) kommt. Anschliessend zeigen die Proben eine grosse Restfestigkeit mit einer fortschreitenden Entfestigung. Bei einer Stauchung von rund 10% weisen die Proben noch eine Restfestigkeit von rund 100 MPa und somit rund 50% der Druckfestigkeit f_c auf.

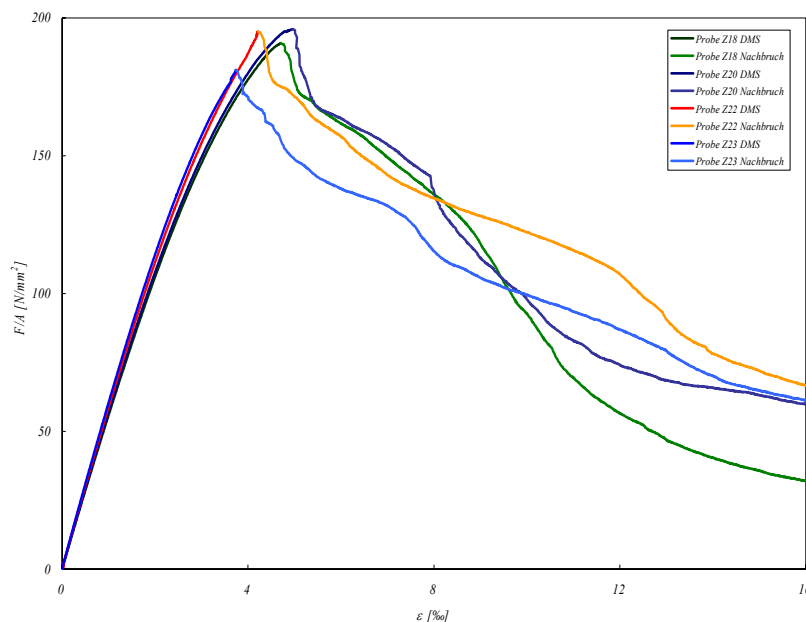


Bild 2: Spannungs – Dehnungsdiagramm der faserbewehrten Druckzylinder (28 Tage), Messlänge 20 mm bis f_c und 140 mm in der Entfestigung.

Bei den Druckversuchen hat sich gezeigt, dass die Faserbewehrung bei Druckbelastung keinen weiteren Einfluss auf das E-Modul hat. Jedoch wird die Festigkeit durch die Fasern erhöht. Die Fasern haben eine umschnürende Wirkung (Mikrobewehrung) womit die Querdehnung behindert wird und sich ein 3-achsiger

Spannungszustand ausbildet. Nach dem Bruch ergibt sich durch die Fasern eine hohe Resttragfähigkeit.

2.3 ZUGVERSUCH

ZUGVERSUCHE MIT KONSTANTEM QUERSCHNITT

Es werden axiale Zugversuche mit beidseitig eingespannten Probekörpern mit konstantem Querschnitt in der Messzone durchgeführt [5]. Die Probekörper sind in der Mitte knochenförmig verjüngt. Sie haben eine Länge von 700 mm, eine Breite von 200 bzw. 160 mm und eine Dicke von 45 mm. Es ergibt sich eine Querschnittsfläche von 8000 mm^2 in der 200 mm langen Messzone (Bild 3). Die Verformungen im Bereich der Messzone werden mit 4 induktiven Wegaufnehmern (LVDTs) und 5 Dehnmessstreifen (DMS) aufgenommen.

Es werden Versuche an faserbewehrten Probekörper durchgeführt. Zusätzlich werden Vergleichsversuche mit nicht faserbewehrten Proben unternommen.

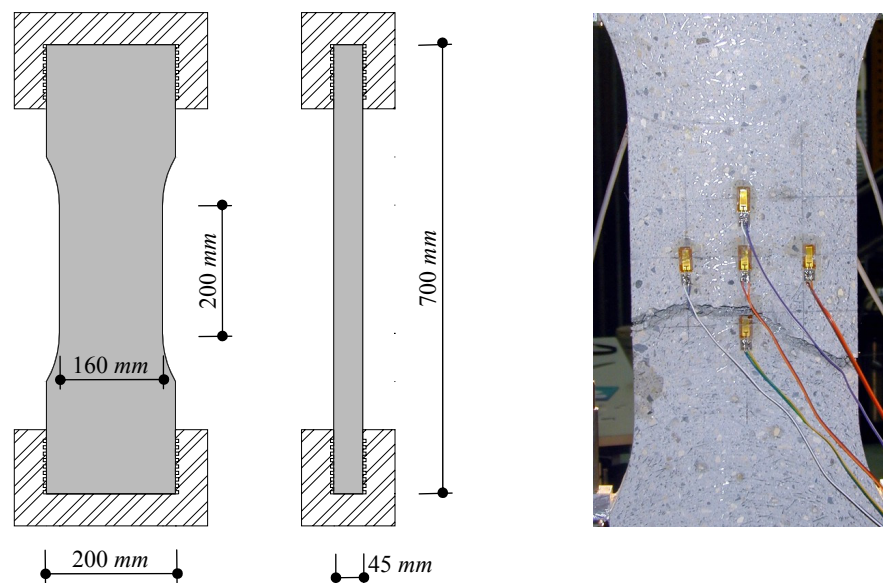


Bild 3 a,b: Zugversuche an verjüngten Proben mit einer konstanten Messzone von 200 mm Länge.

Das beobachtete Rissverhalten der faserbewehrten Probekörper beginnt zunächst mit der Ausbildung vieler sehr feiner Mesorisse mit einem Rissabstand von rund 15 mm. Diese Risse sind mit bloßem Auge teilweise nur sehr schwer zu erkennen. Bei weiterer Belastung schreitet diese multiple Rissbildung fort, bis sich an einer Stelle, meist in der Nähe des Randes beginnend, einer der Risse vergrößert. Sobald der Mesoriss den Querschnitt komplett durchquert, konzentriert sich die weitere Verformung auf diesen Riss und es bildet sich ein Makroriss aus. Der Riss bildet sich nicht perfekt geradlinig aus. Er scheint sich den Weg mit der geringsten Festigkeit zu suchen. Hierbei erfährt er aber keine Ablenkung durch die Zuschläge (vgl. Normalbeton), sondern vielmehr durch Schwachstellen die sich aufgrund der Faserorientierung ergeben.

Das Versagen der nicht faserbewehrten Probe ist hingegen schlagartig und spröde. Es kündigt sich nicht durch eine langsame Rissbildung an, sondern es bildet sich schlagartig ein querschnittsquerender Riss aus.

Der Spannungs-Dehnungsverlauf beider Probetypen zeigt zunächst ein linear elastisches Tragverhalten mit einem E-Modul (Sekantenmodul 0 to $1/3 f_{ct}$) von rund 60 GPa. Bild 4 zeigt den Spannungsverlauf der faserbewehrten Zugproben. Bei einer mittleren Spannung von rund 8.9 MPa tritt ein initialer Riss auf. Für die unbewehrte Probe führt dies direkt zu einem spröden Versagen. Bei den bewehrten Proben wird

ein verfestigendes Verhalten mit einer leichten Spannungserhöhung bis zu einer Dehnung von rund 2.5 ‰ beobachtet. Diese Phase ist gekennzeichnet durch einen sprunghaften Spannungsverlauf wobei Festigkeitswerte von bis zu 9.7 MPa erreicht werden.

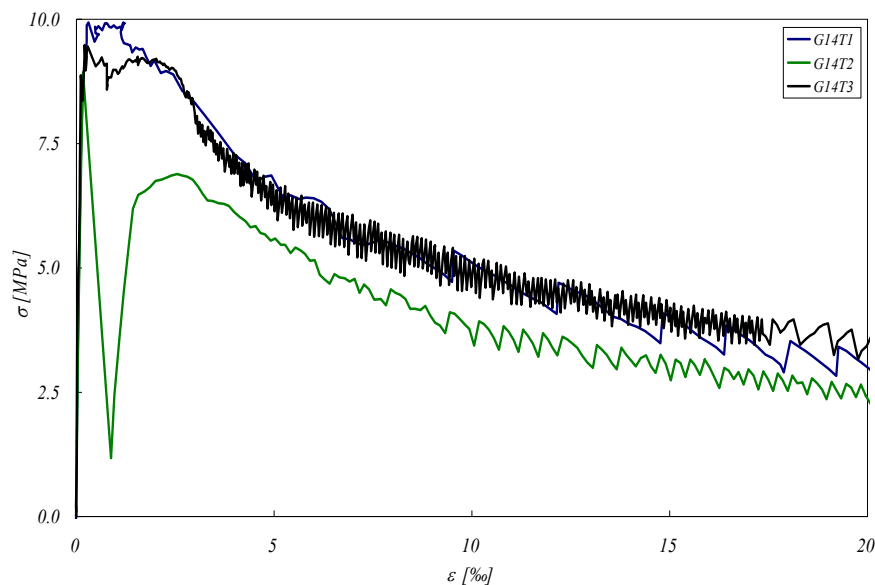


Bild 4: Spannung – Dehnungskurve der Zugversuche (Mittelwert der rissüberspannenden Wegaufnehmer),
Messlänge = 100 mm

Bei einer Dehnung von 2.5 ‰ beginnt sich die Verformung auf einen Riss zu lokalisieren und die Spannung fällt abrupt ab. Die Rissbildung lokalisiert sich auf einen Riss. Bis zu einer Dehnung von 100 ‰ (Messlänge 100 mm) werden die Fasern progressiv ausgezogen. Die Spannung nimmt mit einem ‚hyperbolischen‘ Verlauf ab. Die Rissöffnung bei komplett ausgezogenen Fasern beträgt rund 10 mm.

Die Probe G14T2 weist als „Ausreisser“ einen grossen Spannungssprung direkt nach dem Riss auf. Dieser ergibt sich durch eine schlagartige weite Rissöffnung bei weggesteuerter Versuchsdurchführung. Diese Rissöffnung wird auf eine Materialienhomogenität zurückgeführt, durch die es zu einer asymmetrischen Verformung kommt, welche zu einem anderen Versagensmodus mit niedrigerer Festigkeit führt (grosser Biegespannungsanteil). Im restlichen Verlauf verhält sich die Probe wieder vergleichbar mit den anderen Proben.

ZUGVERSUCHE MIT GEKERBTER PROBE

Um das Rissöffnungsverhalten und den Ausziehprozess der Fasern zu untersuchen, wurden Zugversuche an gekerbten Proben durchgeführt. Die Proben haben eine Länge von 500 mm, eine Breite von 200 mm und eine Dicke von 46 mm bis 48 mm. Sie sind in der Mitte seitlich um jeweils 20 mm mit einem Sägeschnitt eingekerbt (Bild 5 a). Die Versuchskörper sind in die Halterung eingeklebt um mögliche Exzentrizitäten und Rotationen zu vermeiden. Der Versuch wird als beidseitig eingespannter Zugversuch durchgeführt. Die Verformungen im Bereich der Messzone werden mit 4 induktiven Wegaufnehmern (LVDT) und 3 Dehnmessstreifen (DMS) aufgenommen.

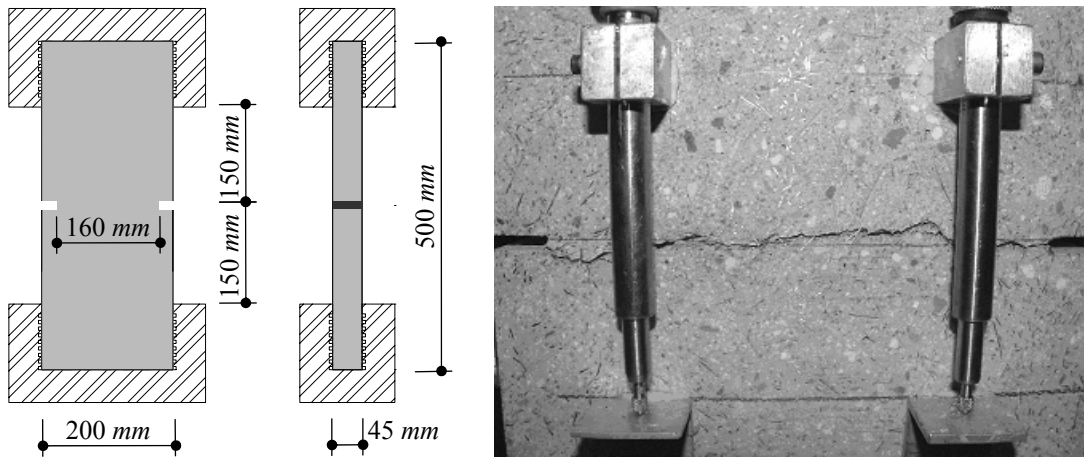


Bild 5 a,b: Probekörper der Faserausziehversuche (Masse in mm) (a) Abmessungen und (b) während des Versuchs.

Durch mehrfache Vorbelastung wird bei einer eingekerbten Zugprobe ein genau definierter Riss in der Matrix ausgebildet. Die Kraftübertragung zwischen den Rissufer erfolgt nun ausschliesslich durch die Fasern. Belastet man diese Probe nun weiter, kann man das Ausziehverhalten der Stahlfasern beobachten (Bild 5 b).

Bei den Belastungszyklen wurde in der Faseraktivierungsphase teilweise die Ausbildung von mehreren sehr feinen Mesorissen visuell beobachtet. Dies ergibt sich durch die Einschnürung der Spannungstrajektorien im Bereich der Einkerbung, wodurch sich eine Auffächerung der Rissbildung ergeben kann. In der relevanten Rissöffnungsphase wurde eindeutig ein einzelner Riss ausgebildet. Bei der Auswertung ist deshalb eventuell eine Multirissbildung in der Belastungsphase zu berücksichtigen.

Bild 6 zeigt die Spannungs–Rissöffnungsdiagramme. Um die genaue Rissöffnung zu ermitteln, wurde von der auf einer Länge von 100 mm gemessenen Verformung die elastische Verformung des ungerissenen Bereiches abgezogen. Bei $\sigma_{fb,u} = 10$ MPa (Mittelwert im Einschnitt) und einer Rissöffnung von $u_{fb,u} = 0.12$ mm wird die Verbundfestigkeit der rissüberbrückenden Fasern erreicht. Für die Rissöffnung zeigt sich ein „hyperbolisch“ entfestigendes Verhalten. Der Verlauf der Spannung weist bei der Rissöffnung markante Sprünge auf, welche auf den Übergang zwischen Aktivierung und Auszug einzelner Fasern zurückzuführen sind (nähere Untersuchung siehe [5]).

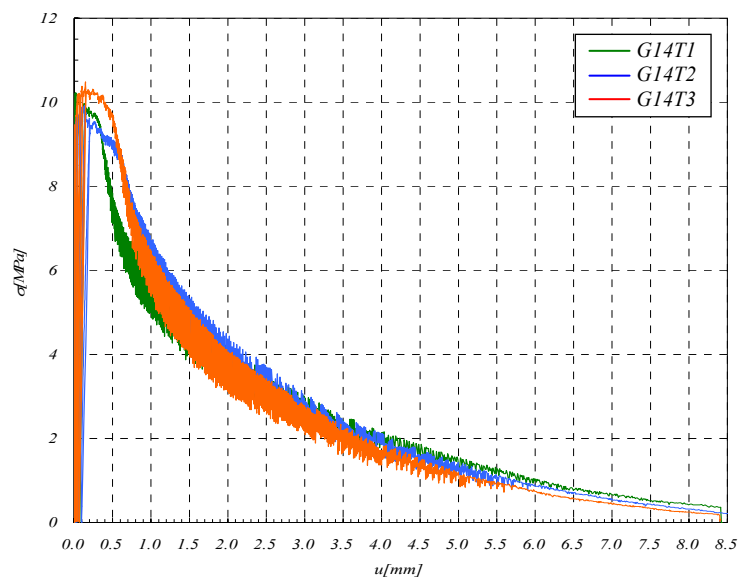


Bild 6: Spannungs Rissöffnungsdiagramm der Zugversuche (inkl. Vergrößerung des Bereiches bis $u = 1.5$ mm)

Beim untersuchten UHFB versagen die Fasern ausschliesslich durch Überschreiten der Verbundspannung zwischen Faser und Matrix. Auch nachdem eine Faser die Haftzugspannung überschritten hat, kann sie weiterhin durch Gleitverbund zur Rissüberbrückung beitragen. Durch ihre glatte Oberfläche können hierbei aber nur sehr geringe Verbundspannungen übertragen werden.

Aus den beobachteten Phänomenen wird gefolgert, dass bezüglich des Verbundverhaltens zwischen Faser und Matrix bei UHFB im Vergleich zu normalen Faserbetonen der Haftreibungsanteil gegenüber dem Gleitreibungsanteil überwiegt. Für die Modellierung ist diese hohe Haftverbundfestigkeit entsprechend zu berücksichtigen.

2.4 BIEGEVERSUCHE

Der Biegezugversuch wird allgemein als Ersatz für den sehr viel schwieriger durchzuführenden axialen Zugversuch genutzt. Mit diesem können sehr einfach Vergleichswerte für verschiedene UHFBe ermittelt werden. Mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren ist es möglich, aus der Biegezugfestigkeit auf eine axiale Zugfestigkeit zu schliessen.

Es werden 3 Probekörper mit den Dimensionen 100 x 100 x 400 mm belastet. Die Proben werden 90 Grad gekippt auf den seitlichen Flächen belastet, um den Einfluss der Inhomogenität, die sich durch den Betoniervorgang ergeben, zu verringern.

Die Versuche werden als 4 Punkt Biegeversuch durchgeführt, um das Versagen nicht an einer diskreten Stelle zu forcieren, sondern konstante Bedingungen über einen grösseren Bereich zu erhalten.

Die Auflager des Versuchsaufbaus haben einen Abstand von 300 mm und sind als verschiebbliche Lager ausgebildet. Die Kräfteinleitung erfolgt über zwei in beide Richtungen gelenkig gelagerte Elemente mit einem Achsabstand von 100 mm. Diese Lasteinleitungselemente bilden das unverschiebbliche Auflager (Bild 7 a,b).

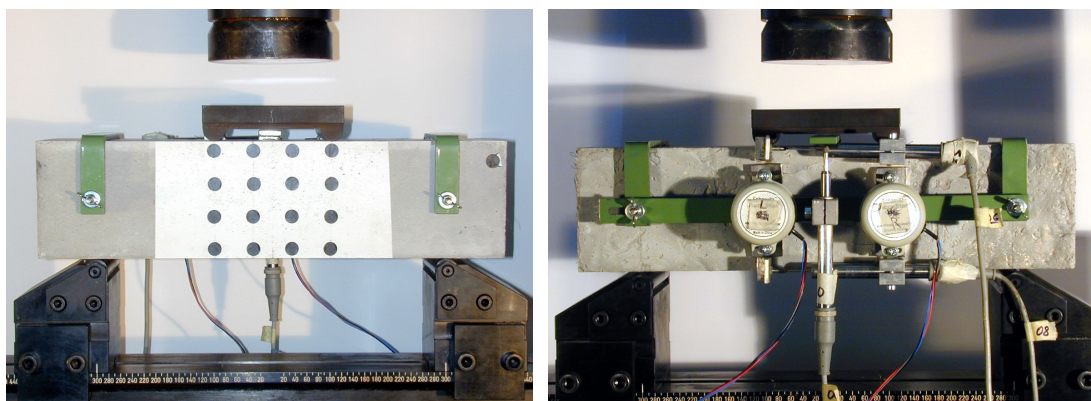


Bild 7 a,b: Foto des Versuchsaufbaus Vorder- und Rückseite

Zu Beginn ist im Bereich des konstanten Biegemomentes auf der Zugseite des Balkens, genauso wie beim zentrischen Zugversuch, eine Multirissbildung zu erkennen. Es folgt eine Lokalisierung der Rissbildung und der Makroriss wächst stark gewunden in Richtung der Druckzone des Balkens. Dies bedeutet, dass die Rissbildung entlang des Bereiches der geringsten Festigkeit (Schwachstellen im Querschnitt) stattfindet.

Bei weit vorgeschrittener Rissöffnung beträgt die Höhe der Druckzone nur mehr wenige Millimeter. Auf der Druckseite der Probe kommt es zu leichten Abplatzungen.

Bild 8 zeigt den Verlauf der Belastung, angegeben als nominelle Biegezugspannung $\sigma_{ct,flex} = 6 \frac{M}{b \cdot h^2}$ aufgetragen über die Durchbiegung. In einer ersten linear elastischen Phase ist der Beton ungerissen. Bei rund 85% der Festigkeit kommt es zur Rissbildung, welche sich im Diagramm durch Abflachen der Kurve widerspiegelt. Beim Erreichen der Biegezugfestigkeit von $f_{ct,flex} = 32$ MPa scheint es, dass sich genauso wie beim axialen Zugversagen ein gewisser Bereich mit annähernd gleich bleibender Spannung einstellt. Dies ist aber aufgrund grosser Sprünge in diesem Bereich, aus nur drei getesteten Proben nicht abschliessend zu beurteilen. Die Biegezugspannung fällt im Bereich der Rissöffnung „hyperbolisch“ ab. Auch hier kann eine Parallele zu dem bei den Zugversuchen beobachteten Verhalten erkannt werden.

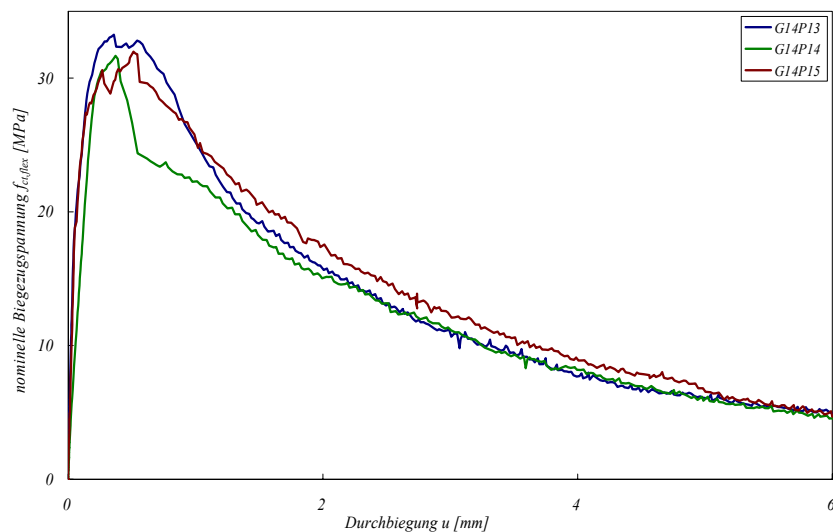


Bild 8: Biegezug – Durchbiegungsdiagramm der Proben G14P13-15

2.5 VERSUCHE MIT BEWEHRUNGSELEMENTEN

Mit Ausziehversuchen von Bewehrungsstäben und Spannritzern wird das Verbundverhalten von UHFB untersucht.

Die Probekörper bestehen aus Würfeln mit 160 mm Kantenlänge, in die ein Bewehrungsstab bzw. eine Spannritze zentrisch einbetoniert ist (Bild 9 a). Die Probe wird durch Zug an der Bewehrung bis zum Versagen der Verbundfuge belastet. Der Schlupf wird als Relativverschiebung zwischen Bewehrungsende und Betonoberfläche ermittelt.

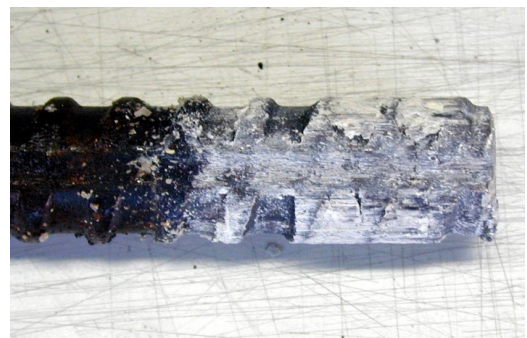
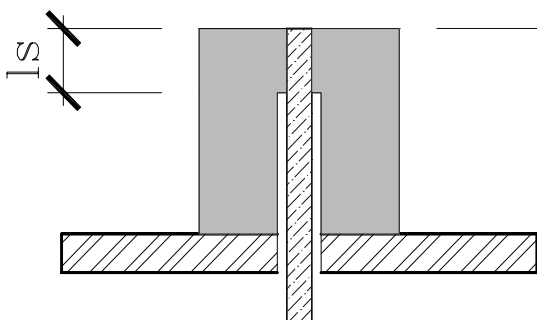


Bild 9 a,b: (a) Probekörper der Ausziehversuche; (b) ausgezogener Bewehrungsstab.

Betrachtet man die ausgezogenen Bewehrungsstäbe, sind zwischen den Rippen die abgescheren Betonstückchen zu erkennen (Bild 9 b).

Bild 10 zeigt die Belastung gegenüber dem Schlupf. Zusätzlich sind jeweils die Fließgrenze und die Zugfestigkeit der Bewehrungsstäbe angegeben.

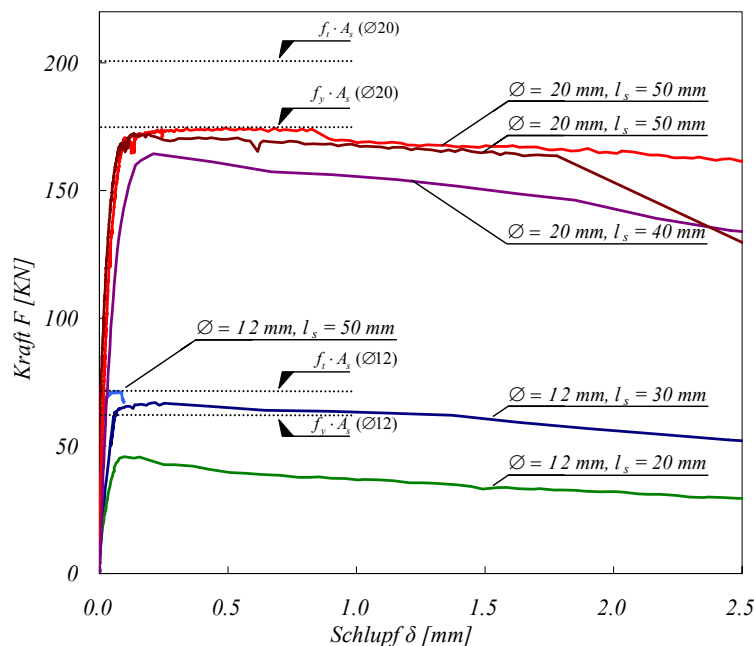


Bild 10: Ausziehversuch der GEWI – Bewehrung (Ø12 mm, Ø20 mm)

Unter der Annahme einer konstanten Verbundspannungsverteilung lässt sich die Verbundfestigkeit aus dem Quotienten von Auszugskraft und nomineller Verbundfläche ermitteln. Diese ergibt sich aus dem Produkt des nominellen Umfangs $U = \varnothing_{\text{nominell}} \cdot \pi$ und der Verbundlänge l_b . Betrachtet man die durch Verbundversagen ausgerissenen Proben, so ergibt sich eine mittlere Verbundfestigkeit von:

$$\tau_b = \frac{F_b}{\varnothing_{\text{nom}} \pi l_b} = 59 \text{ MPa}$$

Im Vergleich mit einem Normalbeton liegt somit die Verbundfestigkeit bei UHFB sehr viel höher.

Aus der mittleren Verbundfestigkeit kann unter Annahme der konstanten Verbundspannungsverteilung die theoretische Verankerungslänge ermittelt werden. Sie gibt die Länge an die benötigt wird um die Kraft in einem Bewehrungsstab bei Erreichen seiner Fließgrenze im Beton zu verankern. Mit $f_s = 550 \text{ MPa}$ ergibt sich:

$$l_b = \frac{f_s \varnothing_s}{4 \tau_b} = 2.4 \cdot \varnothing_s$$

Bei den Spannlitzen versagt der Haftverbund zwischen den glatten Drähten und der Betonmatrix sehr früh (13 MPa). Es folgt eine Phase mit einem relativ grossen Schlupf, in der in erster Linie Gleitreibung vorherrscht. Durch die helixförmige Struktur verdreht sich die Litze bei fortschreitendem Schlupf und verkeilt sich hierdurch.

Für die Rissverteilung, welche bereits durch die Fasern günstig beeinflusst wird, hat der gute Verbund einen positiven Einfluss (geringerer Rissabstand und dadurch kleiner Rissweiten). Für konstruktive Anwendungen bedeutet diese hohe Verbundfestigkeit, dass sehr viel kürzere Verankerungslängen zur Kraftereinleitung von der Bewehrung in den Beton notwendig sind. Betonieretappen, Verbindungen von Fertigteilen, Anschlussbewehrung etc. können sehr viel kürzer und einfacher

(ohne Hacken) ausgeführt werden. Hierbei sind die grossen konzentrierten Querzugkräfte aufgrund der kurzen Lasteinleitungslängen zu berücksichtigen.

2.6 ERKENNTNISSE

Aus den durchgeführten Versuchen haben sich für den verwendeten UHFB folgende Materialkennwerte ergeben (Tabelle 5):

	Einheit	\bar{x}	s	Datengrundlage
f_c	[MPa]	191	5.9	4 Zylinderdruckversuche
$f_{ct,Matrix}$	[MPa]	8.9	0.06	3 Zugversuche
f_{ct}	[MPa]	9.7	0.28	2 Zugversuche
ε_c	[‰]	4.4	0.7	4 Zylinderdruckversuche
$\varepsilon_{ct,Matrix}$	[‰]	0.15	0.03	3 Zugversuche
$\varepsilon_{ct,Lokalisierung}$	[‰]	2.5	-	2 Zugversuche
E	[GPa]	60	4.1	4 Druck + 3 Zugversuche

Tabelle 5: Materialkennwerte des UHFB.

DRUCKVERHALTEN

Das Tragverhalten der betrachteten Zylinderdruckprobe aus UHFB kann wie folgt schematisiert werden (Bild 11):

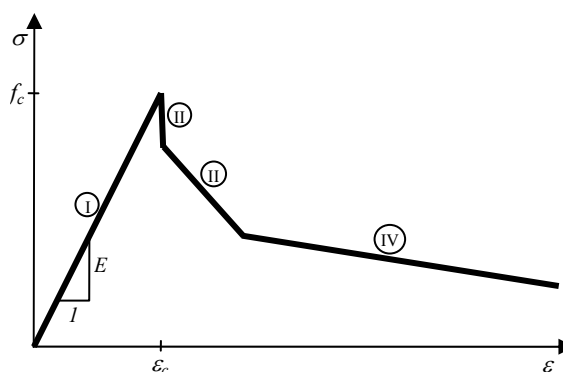


Bild 11: Schematisierte Spannungs – Dehnungskurve des Druckverhaltens der getesteten Druckzylinder aus UHFB

Phase I: Linear - elastische Verformung, Zementmatrix ungerissen

Phase II: Schlagartige Rissbildung, Ausbildung von einzelnen Betonschuppen die untereinander noch mit Fasern verbunden sind – Fasern fangen das Ineinanderschieben der Schollen ab

Phase III: Langsames Zerstoren der Faserbrücken durch Abscheren, Ausreissen und Abplatzen der Zementmatrix an den Fasermündungen.

Phase IV: Zermalmen des restlichen Betons

Der Vergleich verschiedener Druckprobekörpergeometrien hat gezeigt, dass die Homogenität der Matrix und die beigemischten Fasern (umschnürende Wirkung) einen Einfluss auf den Formfaktor zur Umrechnung der Festigkeit verschiedener Probekörperformen haben. Aufgrund der Fasern bildet sich ein dreiaxialer Spannungszustand im gesamten Probekörper und nicht nur im Bereich über den Lasteinleitungsplatten aus. Der Einfluss der Querausdehnungsbehinderung im Lasteinleitungsbereich verliert in Relation zur Festigkeit der gesamten Probe an Gewicht. Folglich hat die Form (Schlankheit) im Vergleich zu Normalbeton einen geringeren Einfluss auf die Festigkeit der Probe.

Bezüglich des Massstabeffekts verschieden grossen Probekörpern kann Grundsätzlich festgestellt werden, dass durch die grössere Homogenität des UHFB trotz seines spröden Verhaltens ein geringerer Massstabeffekt resultiert.

ZUGVERHALTEN

Das Verhalten der in der Versuchsreihe getesteten Zügelemente aus UHFB lässt sich wie folgt schematisch darstellen (Bild 12):

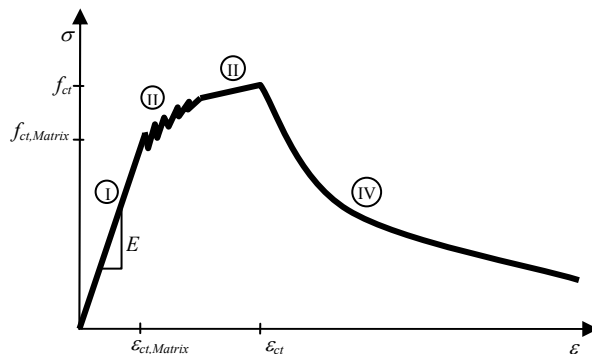


Bild 12: Schematisiertes Verhalten Zugverhalten der getesteten Proben aus UHFB

Phase I: Linear-elastische Verformung, Zementmatrix ungerissen

Phase II: Multirissbildung, verfestigendes Verhalten

Phase III: Öffnung zu Mesorissen, aktivieren der Fasern bis zum Ausriss der Fasern

Phase IV: Öffnen von einem oder mehreren Makrorissen, fortschreitender Ausriss der Fasern

Die Form der Kurve ist grundsätzlich für alle faserverstärkten ultrahochfesten Betone ähnlich. Die Ausbildung der einzelnen Phasen (Steigung, Länge) variiert in Abhängigkeit der Zusammensetzung des jeweiligen UHFB. Bei kleinen Fasergehalten sind Phasen II und III z.T. nicht vorhanden.

Bezüglich der konstruktiven Ausbildung von zugbelasteten Bauteilen aus UHFB lässt sich feststellen, dass es nicht effizient ist, die Fasern zur Aufnahme von Zugbeanspruchungen aus Last oder Eigengewicht einzusetzen. Ihre Aufgabe ist vielmehr eine gute Rissverteilung sicherzustellen und den Werkstoff im Bereich von Spannungskonzentrationen im Tragewerk duktiler zu machen. Dies bedeutet, dass Bauteile aus faserverstärktem ultrahochfesten Beton nur mehr eine statische Bewehrung zur Aufnahme der Zugbeanspruchungen benötigt. Die Funktion der Minimalbewehrung und evt. auch die der Schubbewehrung und der umschnürenden Bewehrung wird durch die Fasern übernommen.

3 BAUTEILVERSUCHE

3.1 PROBEKÖRPER

Für die Zug- und Druckversuche kommen Versuchskörper mit gleicher Geometrie zum Einsatz (Bild 13). Die Versuchskörper weisen im Messbereich einen konstanten Querschnitt auf und sind im Lasteinleitungsbereich erweitert, um eine gute Kräfteinleitung an den beiden Enden sicherzustellen. Die Länge des Messbereichs beträgt 1000 mm, bei einer Gesamtlänge von 1500 mm. Der Querschnitt 160 x 160 mm, ist für den Einbau von bis zu 4 Bewehrungselementen mit einem Achsabstand von 80 mm ausgelegt.

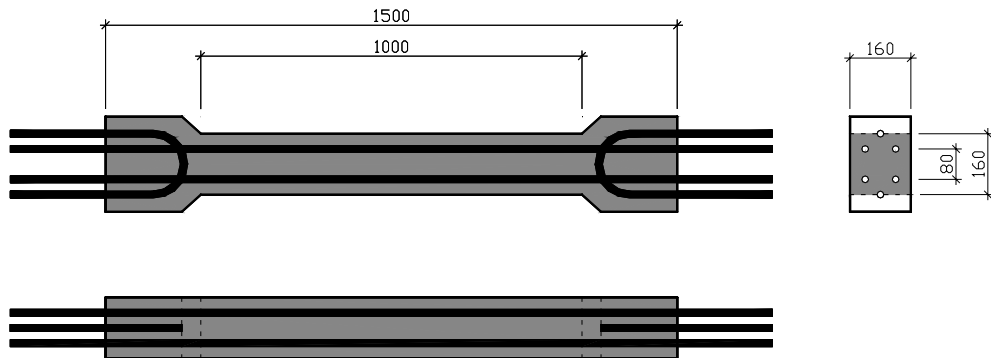


Bild 13: Probekörper für die Zug und Druckelemente

3.2 ZUGELEMENTE

Bei den Zugversuchen werden die Festigkeit, die Verformungseigenschaften und die Rissbildung untersucht.

Für die Versuche wird eine Probe nur mit Fasern bewehrt, bei drei Proben mit schlaffer Bewehrung wird als Parameter der Bewehrungsgrad variiert und eine fünfte Probe wird vorgespannt (hergestellt im Spannbett).

	Bewehrung	A_s	$\rho_s = \frac{A_s}{A_c + A_s}$	$F_s = A_s \cdot f_s$	$\frac{F_s}{F_{ct}}$
	[mm ²]	[mm ²]	[%]	[kN]	[kN]
G20	-	0	0	0	0
G19	4Ø12	452	1.77%	251	1.03
G17	4Ø16	804	3.14%	447	1.84
G18	4Ø20	1256	4.91%	698	2.87
G30	4Ø15.7	600	2.34%	957	3.94

Tabelle 6: Bewehrung für die Zugversuchskörper (F_s = Fliesskraft der Bewehrung, $F_{ct} = A_c \cdot f_{ct}$ = Zugfestigkeit der Faserbewehrung)

Die Versuche werden als beidseitig eingespannte Zugversuche durchgeführt (Bild 14 a). Die Belastung erfolgt weggesteuert. Die mittlere Verformung der gesamten Messzonen wird mit zwei induktiven Wegaufnehmern gemessen (Bild 14 b). Dies erfolgt auf zwei gegenüberliegenden Seiten, um eventuelle Rotationen feststellen zu können. Eine fein aufgegliederte Messung in Abschnitten von 100 mm erfolgt mit Hilfe von 10 Omega - Dehnungsmessern. Hiermit wird die Rissbildung untersucht und es lassen sich lokale Effekte beim Versagen der Probe beobachten.

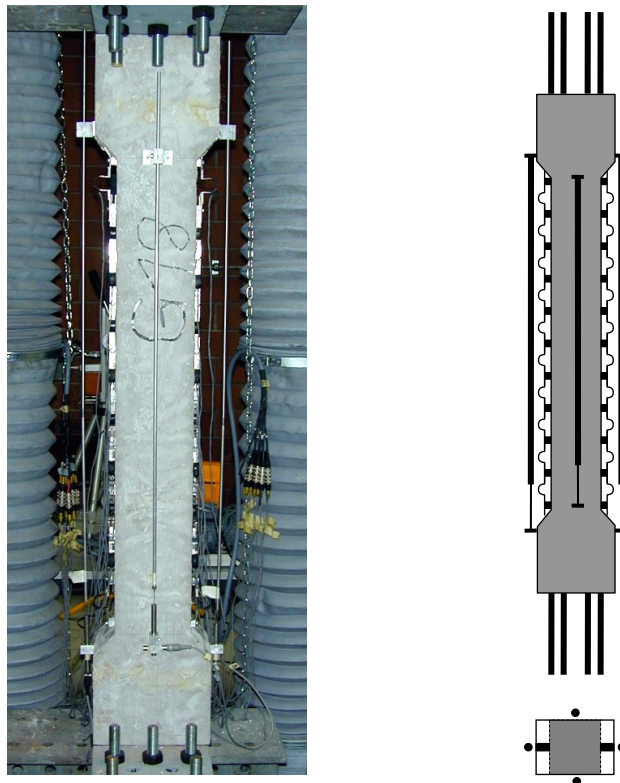


Bild 14 a-c: (a) Versuchsaufbau und (b) Messeinrichtung der Zugversuche an bewehrten Elementen aus UHLFB.

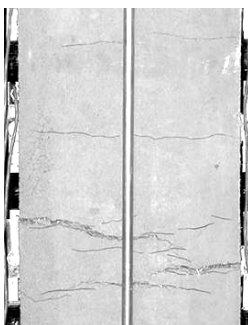
An den Probekörper zeigt sich eine Mehrfachrissbildung (Bild 15 b). Durch Anfeuchten der Proben kann deutlich zwischen einem Netz aus sehr schmalen, fein verteilten Rissen ($s_r = 10 - 15 \text{ mm}$) und einigen grösseren Rissen unterschieden werden (Bild 15 a,c).

In der Bruchfläche des Querschnittes sind die plastisch Verformten und mit Einschnürung gerissenen Bewehrungsstäbe zu erkennen (Bild 15 d). Die Fasern wurden aus der Matrix herausgezogen und stehen hervor.

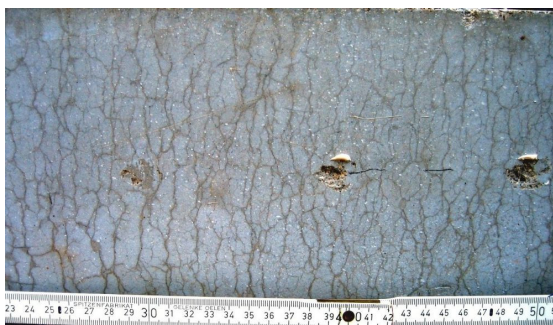
(a)



(b)



(c)



(d)

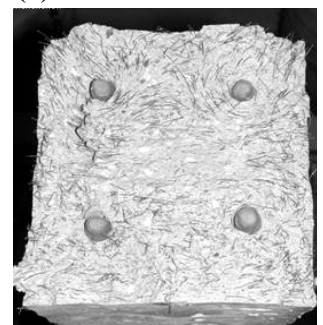


Bild 15 a-d: Rissbild des mit $4\text{Ø}20$ bewehrten Zugelements; (a) befeuchte Probe, (b) direkt sichtbare Risse, (c) Vergrößerung, (d) Querschnitt nach dem Zugversuch.

Bild 16 zeigt die Spannungs–Dehnungsdiagramme der Zugversuche an schlaff bewehrten Bauteilen. Der Verlauf der Kurven zeigt zunächst den ungerissenen linear – elastisch Bereich. Nach Erreichen der Zugfestigkeit der Matrix kommt es zur

mehrfachen Mesorissbildung und in Folge zu einer Abnahme der Steifigkeit der Probe.

Nach Stabilisierung der Mesorissbildung verläuft die Kurve mit einem sehr grossen ‚tension-stiffening‘ - Effekt parallel zur Spannungs-Dehnungskurve des Stahls. Schliesslich wird die Zugfestigkeit des Elements erreicht, die sich als Summe der Stahlflussgrenze und der von der Rissöffnung abhängigen Betonzugspannung ergibt. Durch den direkten Vergleich des modellierten Stahlverlaufes mit den gemessenen Versuchskurven kann deutlich die hohe Beteiligung des UHLFB an der Lastabtragung beobachtet werden.

Das Tragverhalten eines bewehrten Zugelementes aus UHLFB und seine Festigkeiten ergeben sich somit aus der Überlagerung des Tragverhaltens des UHLFB mit dem Verhalten der Bewehrung (Bild 16). Bis zum Erreichen der Bauteilfestigkeit kann diese Überlagerung direkt erfolgen, da beide Materialien ein verfestigendes Verhalten aufweisen. In der entfestigenden Phase der Rissöffnung sind hingegen für die Superposition weitere, die differenzierte Rissbildung berücksichtigende, Betrachtungen anzustellen.

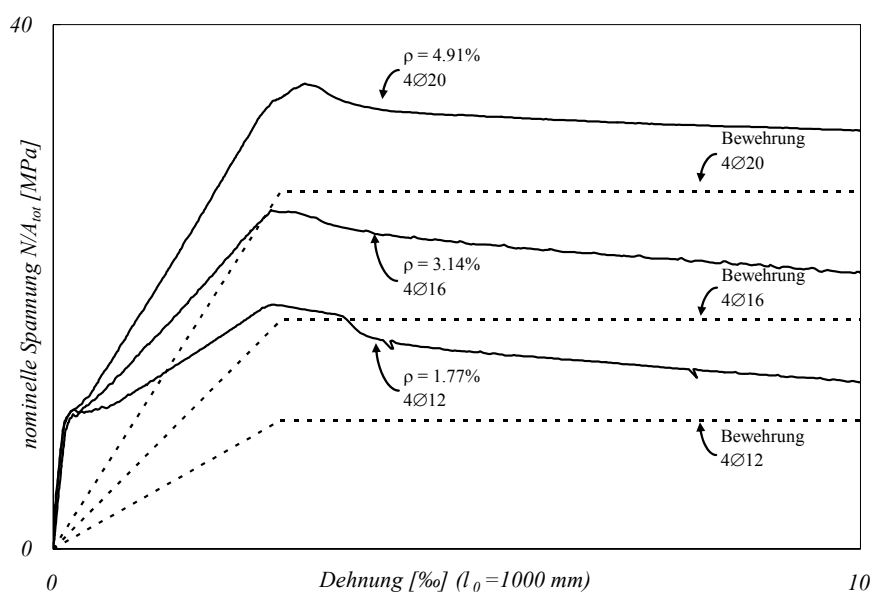


Bild 16: Spannungs – Dehnungskurve der Zugproben

In Tabelle 7 werden die Resultate zusammengefasst. Die Rissbildung tritt bei den bewehrten Proben zwischen 230 und 251 kN ein. Dies bedeutet, dass nach Abzug des durch den Stahl aufgenommenen Anteils, von der Matrix eine Zugspannung $f_{ct,Matrix}$ von 8.6 bis 9.3 MPa aufgenommen wird. Dies liegt im Bereich der bei den Materialversuchen festgestellten Festigkeit von 8.9 MPa. Die Zugfestigkeit der bewehrten Proben wird je nach eingelegter Bewehrung bei 477 bis 909 kN erreicht. Reduziert man diese Festigkeit um die vom Stahl aufgenommene Kraft F_s , so erhält man wiederum den Anteil der durch die Fasern aufgenommenen Spannung σ_t von 8.6 – 8.9 MPa. Dieser liegt etwas niedriger als der bei den Materialversuchen ermittelte Wert von 9.7 MPa. Dies ergibt sich, da bei Erreichen der Fließgrenze des Stahls bereits die Zugfestigkeit des UHLFB überschritten worden ist und nur mehr die Festigkeit im Bereich des Nachbruchverhaltens mobilisiert werden kann.

	F_s [kN]	Rissbildung			Zugfestigkeit			
		F_I [kN]	f_I [MPa]	$f_{ct,Matrix}$ [MPa]	F_t [kN]	f_t [MPa]	σ_{ct} [MPa]	
G19	4Ø12	252	230	9.0	8.6	477	18.6	8.9
G17	4Ø16	447	243	9.5	9.1	662	25.9	8.7
G18	4Ø20	699	251	9.8	9.3	909	35.5	8.6

Tabelle 7: Zusammenfassung der Zugversuche und Berechnung von Vergleichswerten

Mit: F_s : Fließkraft der Bewehrung $F_s = f_s \cdot A_s$
 F_I : gemessene Risskraft
 f_I : $f_I = F_I / A_{tot}$
 $f_{ct,Matrix}$: aus F_I berechnete Matrixfestigkeit $f_{ct,Matrix} = (F_I - \epsilon_I E_s A_s) / A_{c,netto}$
 F_t : gemessene Festigkeit / Spannung des Versuchskörpers
 f_t : $f_t = F_t / A_{tot}$
 σ_{ct} : aus F_t berechneter von dem Verbundwerkstoff (Fasern+Matrix) übernommener Festigkeitsanteil $\sigma_{ct} = (F_t - F_s) / A_{c,netto}$

3.3 DRUCKELEMENTE

Um eine baupraktisch relevante Analyse des Druck-Tragverhaltens zu erhalten, werden die Versuchskörper mit einer kombinierten Druck–Biegebelastung belastet. Bei konstanter Normalkraft wird eine beidseitig symmetrische Rotation auf die Probe aufgebracht. Hiermit kann direkt die Momenten - Krümmungsbeziehungen für verschiedene konstante Normalkraftniveaus und verschiedene Bewehrungsgrade ermittelt werden. Des Weiteren werden die Verformungseigenschaften, die Festigkeit und die Versagensarten untersucht.

Um das Tragverhalten eines Druckelementes umfassend zu beschreiben, sind alle möglichen Kombinationen von Moment M , Normalkraft N und Krümmung κ des Querschnittes zu berücksichtigen. Die Interaktion zwischen den Grössen kann im M - N - κ - Raum dargestellt werden. Es ergibt sich eine räumliche Fläche, welche jede mögliche M - N - κ Kombination für jeweils ein bestimmtes Druckglied darstellt (Bild 17). Aus dieser Fläche im M - N - κ - Raum lassen sich durch Projektion in jeweils eine Ebene das Momenten – Krümmungsdiagramm, das Momenten – Normalkraft– Interaktionsdiagramm und die Rotationskapazität der Stütze jeweils in Abhängigkeit des dritten Parameters ablesen.

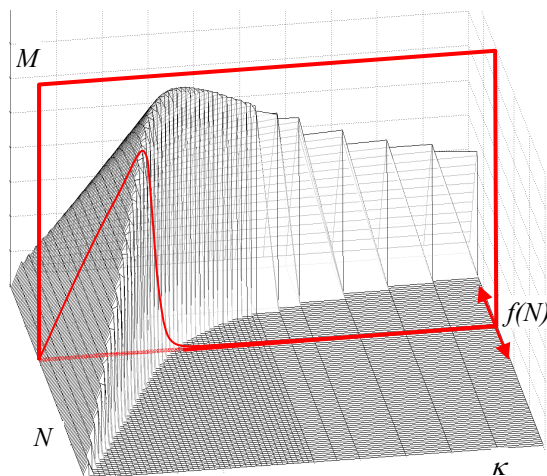


Bild 17a: Schematische Darstellung der Versuche M - N - κ - Raum mit Angabe der Variationsparameter

Die hier durchgeführten Versuche verlaufen aufgrund der konstante Normalkraft und aufgezwungene Randverdrehung in einer klar definierten Ebene im $M-N-\kappa$ – Raum. Sie repräsentieren direkt das $M - \kappa$ - Diagramm für eine bestimmte Normalkraft. Hierdurch kann sehr systematisch durch Variation von N der komplette Bereich untersucht werden.

Mit der hier vorgestellten Versuchsserie werden unbewehrte, bewehrte und vorgespannte Elemente untersucht.

Versuch	Bewehrung	$A_S; A_P$ [mm ²]	$F_S; F_P$ [kN]	P_P [kN]	$\rho = \frac{A_S}{A_C - A_S}$ [%]
Unbewehrt	-	-	-	-	-
Bewehrt	4Ø20	1256	628	-	4.9%
Vorgespannt	4Ø15.7	600	1062	743	-

Tabelle 8: Bewehrung der Probekörpertypen

Pro Typ werden je drei Versuchskörper getestet, welche jeweils auf drei verschiedene Normalkraftniveaus vorbelastet werden. Um ein möglichst gut Abdeckung des gesamten Tragbereiches des Druckelementes zu erreichen, werden die Versuche mit 30%, 50% und 70% der Druckfestigkeit durchgeführt. Die Druckfestigkeit der unbewehrten Probe unter Annahme eines perfekt zentrischen Drucks ergibt sich zu:

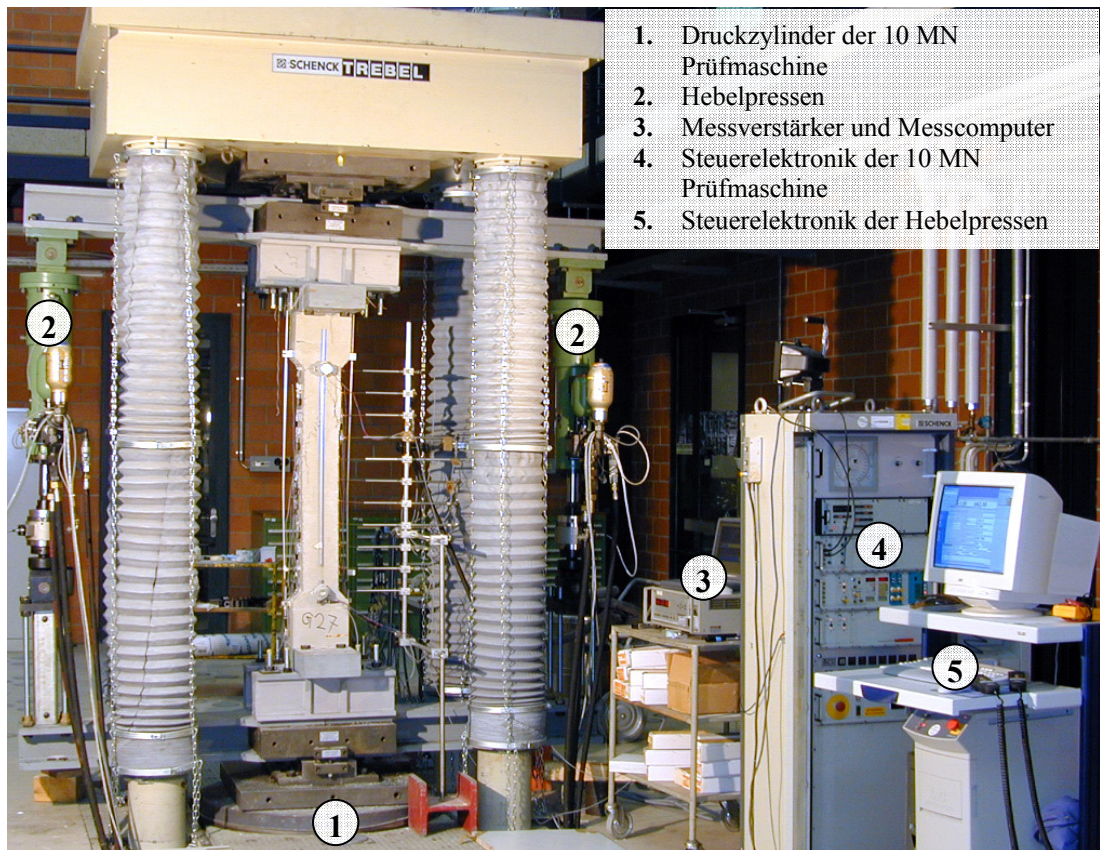
$$F_c = A_c \cdot f_c = 25600 \text{ mm}^2 \cdot 190 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 4864 \text{ kN}$$

Entsprechend werden die Proben wie folgt belastet:

Kriterien	F_c [kN]	$F_S; F_P$ [kN]	F_{res} [kN]	$0.7 F_c$ [kN]	$0.5 F_c$ [kN]	$0.3 F_c$ [kN]
Unbewehrt	4864	-	4864	3500	2500	1500
Bewehrt	4864	628	5492	3500	2500	1500
Vorgespannt	4864	670	4194	3500	2500	1500

Tabelle 9: Festigkeit und Lastniveaus der Probekörpertypen

Die Probekörper sind in einem System mit beidseitigen Hebelarmen welche mit zwei Hydraulikzylindern miteinander verbunden sind montiert (siehe Bild 18). Dieses System ist mittels zweier Kipplager in eine 10 MN Trebel Prüfmaschine der Firma Schenk montiert.



1. Druckzylinder der 10 MN Prüfmaschine
2. Hebelpressen
3. Messverstärker und Messcomputer
4. Steuerelektronik der 10 MN Prüfmaschine
5. Steuerelektronik der Hebelpressen

Bild 18: Versuchstand mit Mess- und Steuertechnik.

Bild 19 zeigt am statischen System die Wirkung der Pressenkräfte auf den Probekörper und die daraus resultierende Normalkraft und Momentenverläufe am reduzierten statischen System. Das Moment zweiter Ordnung setzt sich hierbei aus dem Moment, das sich aufgrund der Exzentrizität am Rand der Messstrecke ergibt und dem Moment aufgrund der Durchbiegung des Probekörpers zusammen.

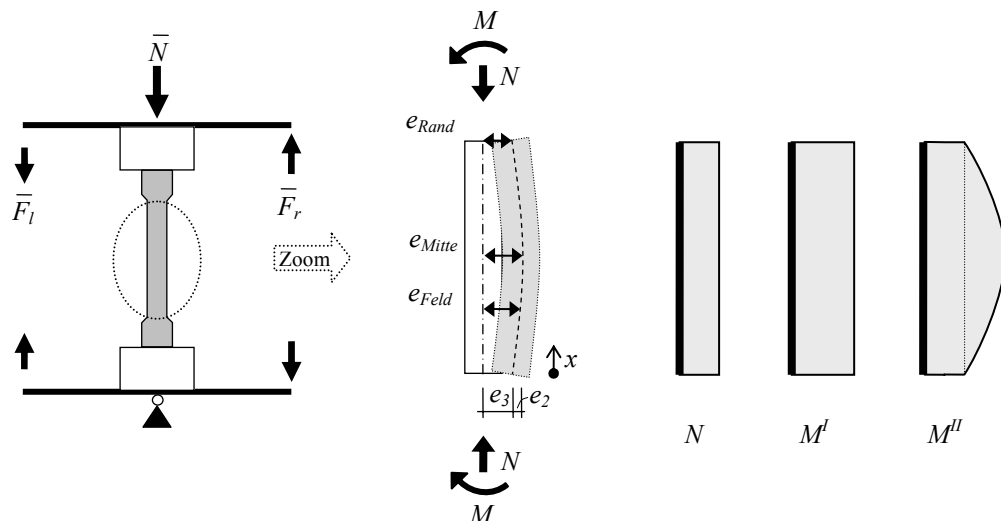


Bild 19: Statisches System bzw. reduziertes statisches System und Schnittkräfte des Versuchsaufbaus. (Momentenverlauf aufgrund Zwangsverdrehung M' , Verformung des Prüfkörpers bzw. Veränderung der Geometrie des Versuchstandes M'')

Mit der gemessenen Normalkraft \bar{N} , den Pressenkräften \bar{F}_l und \bar{F}_r sowie den Exzentrizitäten lassen sich die auf die Probe wirkende Normalkraft N und die Momente wie folgt ermitteln:

$$\begin{aligned}
N &= \bar{N} + (F_l - F_r) \\
M^I &= (F_l + F_r) \cdot a \\
M_{\max}^{II} &= N \cdot e_{\text{Mitte}} = N \cdot (e_2 + e_3) \\
M^{II}(x) &= N \cdot e_{\text{Feld}}(x) = N \cdot (e_2(x) + e_3) \\
M_{\text{Rand}}^{II} &= N \cdot e_{\text{Rand}} = N \cdot e_3
\end{aligned}$$

Die Beziehungen von Verdrehungswinkel, der Dehnung der Randfaser und der Krümmung zeigt Bild 20. Hierbei muss beachtet werden, dass von den Omega – Dehnungsmessern ein $\Delta\varepsilon$ und nicht die absolute Dehnung inklusive der Normalkraftverformung gemessen wird, da sie nach Aufbringen der Axiallast auf Null gesetzt werden. Hierbei ist zwischen der mittleren Krümmung κ_{mean} und der lokalen Krümmung κ_{loc} zu unterscheiden ist.

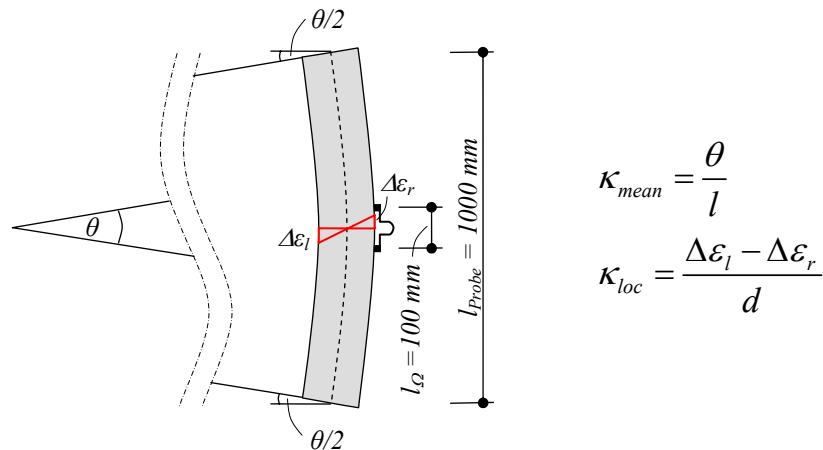


Bild 20: Zusammenhänge zwischen Verdrehungswinkel, Krümmung und Verformung der Randfasern

Die Versuche haben bezüglich des Bruchverhaltens gezeigt, dass es zunächst mit dem Aufbringen der Zwangsverdrehung bei allen Proben zu schichtweisen linsenförmigen Abplatzungen auf der Druckseite kommt. Beim Versagen der Druckelemente konnten zwei grundsätzlich unterschiedliche Bruchmechanismen beobachtet werden. Für Proben mit hoher axialen Belastung oder keiner zusätzlichen Bewehrung kommt es zu einem schlagartigen Druckversagen des verbleibenden Querschnittes mit Bildung eines diagonalen Schubrisses. Bei Proben mit niedriger axialen Belastung und Bewehrung bildet sich eine plastische Zone aus, wobei sich die weitere Verdrehung der Probe auf dieses plastische Gelenk lokalisiert (Bild 21).



Bild 21: Unterschiedliches Bruchverhalten aufgrund der axialen Vorbelastung und der Bewehrungsart; (a) kleine Axiallast, unbewehrt, (b) mittlere Axiallast, bewehrt, (c) grosse Axiallast, vorgespannt.

Je höher die axiale Last, desto spröder ist das Tragverhalten. Bei niedriger Normalkraft kommt es hingegen zu einem duktilen Versagen. Die Rissbildung entwickelt sich langsam vorschreitend mit der aufgezwungenen Verdrehung. Bei hoher Normalkraft kommt es zu einem schlagartigen bis explosionsartigen Versagen. Mit einer passiven Bewehrung ist das Verhalten auch bei höherer Last noch relativ duktil.

Dieses Verhalten spiegelt sich auch im Momenten – Krümmungsdiagramm wieder. In Bild 22 sind zur zusammenfassenden Darstellung jeweils nur das Moment in der Mitte der Probe gegenüber der mittleren Krümmung dargestellt.

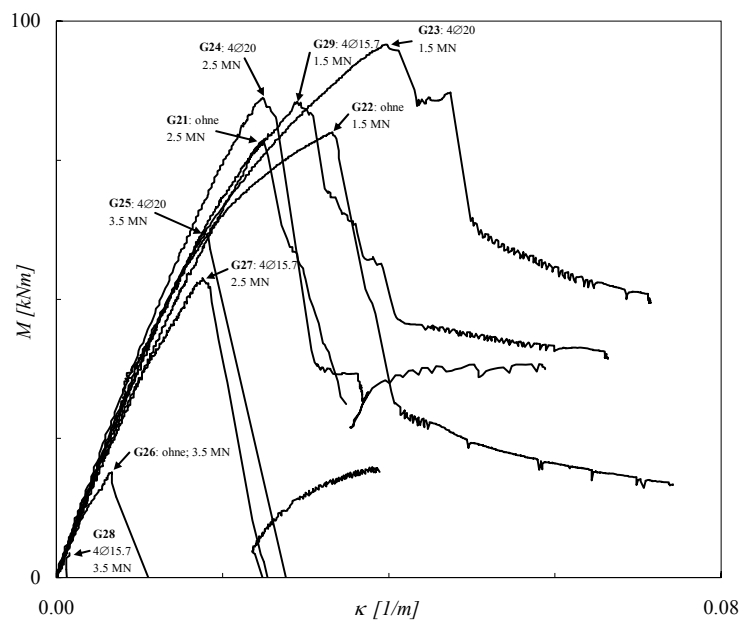


Bild 22: Momenten – Krümmungsverlauf aller Probekörper; dargestellt ist jeweils das Moment in der Mitte der Probe $M_{Mitte,tot}$ gegenüber der Krümmung κ ermittelt aus der Randverdrehung θ ($l_0 = 1000$ mm).

Das schnelle Abfallen des Momentes ist charakteristisch für ein schlagartiges Versagen des Querschnittes. Ein langsames Abfallen mit einer Stabilisierung oder erneuten Verfestigung zeichnet ein relativ duktilen Verhalten aus. Ebenso weist ein

abgerundeter Verlauf im Bereich des maximalen Momentes auf ein duktileres Verhalten hin. Hierbei kommt es bereits vor Erreichen der Biegefestigkeit durch Rissbildung zu einer erhöhten Krümmungszunahme.

In Tabelle 10 sind die Hauptresultate zusammengefasst.

Bewehrung		N	M_{max}^I	$M_{Rand,tot}$	$M_{Mitte,tot}$	$\kappa(M_{max}^I)$	$e_2(M_{max}^I)$	EI_{hom}
		[MN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[1/m]	[mm]	[MNm ²]
G22	unbewehrt	1.5	55	74	81	0.032	4.96	3.28
G23	4 Ø20	1.5	66	88	98	0.039	6.27	3.68
G29	4 Ø15.7	1.5	62	78	85	0.029	4.56	3.47
G21	unbewehrt	2.5	45	69	78	0.023	3.74	3.28
G24	4 Ø20	2.5	53	78	87	0.025	3.91	3.68
G27	4 Ø15.7	2.5	34	48	55	0.018	2.59	3.47
G26	unbewehrt	3.5	8	16	20	0.007	1.21	3.28
G25	4 Ø20	3.5	31	56	65	0.019	2.83	3.68
G28	4 Ø15.7	3.5	-	-	-	-	-	3.47

Tabelle 10: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse aller Probekörper G21 - G29

3.4 ERKENNTNISSE

ZUGELEMENTE

Bei den Versuchen kommt es zu einer komplexen **Multirissbildung**. Hierbei ist zwischen den visuell einfach zu erkennenden Hauptrissen und den sehr feinen Nebenrisen zu unterscheiden. Erstere entstehen durch die vom klassischen Stahlbeton bekannten Mechanismen der Rissbildung mit einem Rissabstand von 40 - 100 mm, der sich aus der Verbundlänge mit der jeweils eingesetzten Bewehrung ergibt. Die feineren Nebenrisse bilden sich aufgrund der rissverteilenden Wirkung der Fasern im Zwischenbereich mit einem Rissabstand von rund 10 - 15 mm aus.

Die teilweise **inhomogene Verteilung und Orientierung der Fasern** in der Probe hat einen gewissen Einfluss auf das Tragverhalten der Proben. Hierbei ist insbesondere eine asymmetrische Verteilung oder das Ausfallen des gesamten Querschnittes durch schichtweise Ablagerung beim Betonieren oder gar durch Betonierstöße problematisch. Kleinere lokale Inhomogenitäten können sich im Mittel über den gesamten Querschnitt wieder ausgleichen. Durch den Einsatz einer durchgehenden Bewehrung können sowohl asymmetrische Verteilungen wie auch komplett gestörte Querschnitte gut kompensiert werden.

Anhand einer Analyse der Spannungs-Dehnungsdiagramme der Versuche konnte gezeigt werden, dass sich das **Tragverhalten** eines bewehrten Zugelementes aus UHFB durch die Überlagerung des Verhaltens des Verbundwerkstoffes UHFB mit dem Verhalten der Stahlbewehrung ergibt. Entsprechend ergibt sich die **Zugfestigkeit** aus der Stahlfestigkeit zuzüglich eines Anteils des UHFB. Im Bereich vor Erreichen der Bauteilfestigkeit kann diese Überlagerung direkt erfolgen, im entfestigenden Bereich der Rissöffnung sind für die Superposition noch weitere, die differenzierte Rissbildung berücksichtigende, Betrachtungen anzustellen.

Die **Vorspannung** hat einen sehr positiven Einfluss auf Zugelemente aus UHFB. Durch das Überdrücken des Querschnittes kann sich der UHFB sehr effizient an der Abtragung der Belastung beteiligen. Die Steifigkeit im Bereich des Gebrauchszustandes wird erhöht und es ergibt sich eine grosse Verformungskapazität im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

Zusammenfassend lässt sich als **Erkenntnisse für den Entwurf** von Zugelementen feststellen:

DRUCKELEMENTE

Bei den Versuchen hat sich bezüglich des **Bruchverhaltens** gezeigt, dass es bei Aufbringen der Zwangsverdrehung bei allen Proben zunächst zu schichtweisen linsenförmigen Abplatzungen auf der Druckseite kommt. Das *Versagen* des Druckelements erfolgt letztendlich entweder als ein Druckversagen des verbleibenden Querschnittes mit Bildung eines diagonalen Schubrisses (Proben mit hoher Normalkraft oder keiner zusätzlichen Bewehrung) oder es bildet sich eine plastische Zone aus, wobei sich die weitere Verdrehung der Probe auf dieses plastische Gelenk lokalisiert (Proben mit niedriger Normalkraft und Bewehrung).

Bei Ausbildung eines *plastischen Gelenkes* sind innerhalb des Querschnittes drei deutlich voneinander zu unterscheidende Bereiche erkennbar: Der abgeplatzte Bereich in der Druckzone, eine plastisch verformte zentrale Zone und letztlich eine gerissene Zugzone.

Die Bewehrung führt teilweise zu einer Lokalisierung der *Längsrissbildung* auf der Ebene der Bewehrungselemente. Dieser Effekt ist bei Spannlitzen und bei hohen axial Lasten geringer, hat aber bei einigen Proben quasi zu einer Längsspaltung über die gesamte Probenlänge geführt.

Bezüglich des **Tragverhaltens** kann festgestellt werden, dass je höher die axiale Last desto *spröder* das Verhalten. Bei niedriger Normalkraft kommt es zu einem relativ *duktilen* Versagen. Die Rissbildung entwickelt sich langsam vorschreitend mit der aufgezwungenen Verdrehung. Bei hoher Normalkraft kommt es zu einem schlagartigen bis explosionsartigen Versagen. Mit einer passiven Bewehrung ist das Verhalten auch bei höherer Last noch relativ duktil. Dieses Verhalten spiegelt sich auch im **Momenten – Krümmungsdiagramm** wieder.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Behloul M.**, *Analyse et modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra hautes performances*, E.N.S. Cachan, PhD thesis, 182 p., Cachan, France, **1996**
- [2] **CEB**, *CEB-FIP Model Code 1990*, CEB (Comité euro-international du béton), Thomas Telford Publishing, **1993**.
- [3] **Dal Busco S.**, *Déformabilité et capacité portante des colonnes en béton armé*, Thèse de doctorat, p. 241, Lausanne, Suisse, **1988**.
- [4] **Habel K., Gysler R., Denarié E., Brühwiler E.**, *A uniaxial tensile test for Advanced Cementitious Materials*, interner Bericht, 8 p., **2002**.
- [5] **Jungwirth J., Muttoni A.**, *Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton – Teil 1 Material*, EPFL, IS-BETON Bericht 00.02.R3, p. 104, Lausanne, **2004**.
- [6] **Jungwirth J., Muttoni A.**, *Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton – Teil 2 Bauteile*, EPFL, IS-BETON Bericht 00.02.R4, p. 123, Lausanne, **2004**.
- [7] **Marti P., Alvarez M., Kaufmann W., Sigrist V.**, *Tragverhalten von Stahlbeton*, IBK Spezialpublikation, 008, pp.50-53, Zürich, Schweiz, **1999**.
- [8] **Muttoni A., Schwartz J., Thürlimann B.**, *Bemessung von Betontragwerken mit Spannungsfeldern*, Birkhäuser, Design of Concrete Structures with Stress Fields, 145 pp, Basel, Schweiz, **1997**.
- [9] **Pfyl Th.**, *Tragverhalten von Stahlfaserbeton*, IBK-Bericht, PhD thesis, Nr. 279, 140 p., Zürich, Schweiz, **2003**.
- [10] **Pfyl Th., Marti P.**, *Versuche an stahlfaserverstärkten Stahlbetonelementen*, IBK Bericht, 268, 137, Zürich, Schweiz, **2002**.
- [11] **Plumey S., Jungwirth J., Muttoni A.**, *Comportement des éléments en béton à ultra hautes performances*, EPFL-IS-BETON, Lausanne, **2002**
- [12] **SETRA, AFGC**, *Béton fibrés à ultra-hautes performances*, recommandations provisoires , 152, Frankreich, **2002**.
- [13] **SN EN 262/1: 2003**, *Betonbau - Ergänzende Festlegungen*, SIA 261/1, Zürich, Schweiz, **2003**.
- [14] **SN EN 262: 2003**, *Betonbauten*, SIA 262, 76 pp., Zürich, Schweiz, **2003**.
- [15] **SN EN 266: 2003**, *Mauerwerk*, SIA 266, Zürich, Schweiz, **2003**.
- [16] **Stirnemann D., Jungwirth J., Muttoni A.**, *Versuche an Stützen aus ultra hochfestem Beton*, Projekt 00.02, Bericht 00.02.R5, EPFL-IS-BETON, **2004**.
- [17] **Stirnemann D., Jungwirth J., Muttoni A.**, *Flambage de colonnes en Béton fibré à ultra haute performance (BFUHP)*, Projekt 00.02, Bericht 00.02.R6, EPFL-IS-BETON, Lausanne, **2004**.

DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt ‚ultrahochfester Beton‘, in dessen Rahmen die hier dargestellten Versuche realisiert werden konnten, wird vom Verband der Schweizer Zementindustrie CEMSUISSE unterstützt und finanziert. Hierfür gilt ihnen unser grosser Dank.

Das IS - BETON bedankt sich bei den Firmen Eiffage und SIKA für die kostenlose Bereitstellung ihres ultrahochfesten Betons BSI[®]/CERACEM, sowie der Firma VSL für die Bereitstellung der Litzen und der Spannvorrichtung.

Ein grosser Dank gilt auch den Studenten Daniel Stirnimann, Matthias Neukomm und Jacques Seywert, sowie dem Mechaniker - Team des IS für die grosse Hilfe bei den umfangreichen Laborarbeiten.