

---

# Zum Tragverhalten von UHPC mit kombinierter Bewehrung

## *Structural Behaviour of UHPC with Combined Reinforcement*

Ekkehard Fehling, Torsten Leutbecher, Jenny Thiemicke

### 1 Einführung

Am Fachgebiet Massivbau der Universität Kassel wurden im Rahmen des SPP 1182 über einen Zeitraum von insgesamt sechs Jahren experimentelle und analytische Untersuchungen zum Tragverhalten von UHPC-Bauteilen mit kombinierter Bewehrung durchgeführt. Dabei wurden in den drei Förderperioden die folgenden Themen bearbeitet:

#### 1. Förderperiode:

- a) UHPC-Bauteile unter Zugbeanspruchung
- b) UHPC-Bauteile unter Druck-Querzug Beanspruchung

#### 2. Förderperiode:

- c) UHPC-Balken unter Biegebelastung

#### 3. Förderperiode:

- d) UHPC-Bauteile unter Querkraftbelastung

Ergänzend wurden im Rahmen der Teilprojekte Untersuchungen zum Verbundverhalten von Stabstahl- und Faserbewehrung in UHPC sowie zum Spannungs-Rissöffnungs-Verhalten des faserverstärkten UHPC durchgeführt.

Der vorliegende Beitrag fasst das Arbeitsprogramm und die in den drei Förderperioden gewonnenen Erkenntnisse zusammen.

## 2 UHPC-Bauteile unter Zugbeanspruchung

### 2.1 Zielsetzung und Arbeitsprogramm

Bei Kombination konventioneller Betonstahl- oder Spannbewehrung mit Fasern ergeben sich Unterschiede im Tragverhalten gegenüber dem bekannten Stahl- und Spannbeton. Für UHPC ist dies besonders relevant, da aus Gründen der Duktilität der Einsatz von Fasern bei diesen Betonen die Regel ist. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit ist vor allem der günstige Einfluss der Fasern auf den Rissbildungsprozess und die Rissbreiten im Gebrauchszustand von Bedeutung. Allerdings kann, wie bereits von Habel [1] experimentell gezeigt wurde, selbst bei bereits sehr hohem Fasergehalt, durch zusätzliche Stabstahlbewehrung eine weitere Verbesserung des Rissverhaltens (kleinere Rissabstände und Rissbreiten) erzielt werden.

### 1 Introduction

At the Chair of Structural Concrete of the University of Kassel, experimental and analytical investigations on the structural behaviour of UHPC structural members with combined reinforcement have been performed within the frame of the DFG priority programme 1182 over a period of 6 years. In the three funding periods, the following topics were investigated:

#### 1<sup>st</sup> funding period:

- a) UHPC members subject to tensile loading
- b) UHPC members subject to compression tension load

#### 2<sup>nd</sup> funding period:

- c) UHPC beams subject to bending load

#### 3<sup>rd</sup> funding period:

- d) UHPC beams subject to shear loading

In addition, investigations on the bond behaviour of bar reinforcement and fibres in UHPC as well as on the stress-crack opening behaviour of fibre reinforced UHPC have been performed within the particular projects.

This paper summarises the working schedule and scientific findings of the three funding periods.

## 2 UHPC structural Members under Tensile Loading

### 2.1 Aims of Research and Working Schedule

When combining conventional reinforcing steel or prestressing steel with fibres, there are differences in the structural behaviour compared to the well-known reinforced or prestressed concrete. For UHPC, this is of special interest, since fibres are added to these concretes generally for ductility reasons. In terms of durability and density, the positive influence of the fibres on the crack formation process and the crack widths in the serviceability range is significant. As already shown experimentally by Habel [1], crack formation can be improved further (smaller crack spacings and crack widths) by adding bar reinforcement even for fibre reinforced UHPC with high fibre content. Therefore, an objective of the

Ziel des Forschungsvorhabens war es daher, durch Verstehen der Rissmechanik des gemischt bewehrten UHPC einen zielgerichteten und Ressourcen schonenden Einsatz der Fasern zu ermöglichen und damit die Akzeptanz der Werkstoffs UHPC nachhaltig zu fördern.

Das Versuchsprogramm umfasste neben Versuchen an Zugelementen mit gemischter Bewehrung auch Ausziehversuche zur Bestimmung der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung der Stabbewehrung sowie die experimentelle Ermittlung der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung des faserbewehrten UHPC.

## 2.2 Versuche zum Verbundverhalten von UHPC

Das Verbundverhalten wurde an wärmebehandeltem Feinkorn-UHPC der Mischung M1Q untersucht. Die Versuche sind ausführlich in [2] dargestellt.

Neben warmgewalzten Betonstahlstäben BSt 500 mit einem Durchmesser  $\phi = 10$  mm ( $f_{ym}$  ca. 550 N/mm<sup>2</sup>) wurden auch hochfester gerippter Stabstahl der Güte St 1420/1570 (SIGMA<sup>®</sup>-Spannstahl) mit den Durchmessern  $\phi = 8$  mm und 10 mm sowie der Güte St 1470/1620 mit einem Durchmesser  $\phi = 12$  mm (für beide:  $f_{p0,1m}$  etwa 1.500 bis 1.520 N/mm<sup>2</sup>) eingesetzt. Die bezogene Rippenfläche der Bewehrungsstäbe betrug  $f_R = 0,072$  (BSt 500) bzw.  $f_R = 0,019$  bis 0,026 (SIGMA<sup>®</sup>-Spannstahl).

Die Verbundkörperabmessungen und die Versuchsdurchführung orientierten sich an der Empfehlung von RILEM [3]. Die Verbundlänge betrug jedoch nur  $1,5 \phi$ , um Fließen der Bewehrung zu vermeiden und sehr nahe am Maximalwert liegende mittlere Verbundspannungen zu erhalten.

Neben Betonwürfeln mit Kantenabmessungen von  $10 \phi$  wurden auch Versuchskörper eingesetzt, bei denen die Betondeckung an jeweils zwei gegenüberliegenden Seiten auf  $2,5 \phi$  bzw.  $1,0 \phi$  reduziert war. Die Proben waren entweder faserfrei oder mit 1,0 Vol.-% glatten hochfesten Stahldrahtfasern ( $l_f/d_f = 17$  mm/ 0,15 mm) bewehrt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm und die Ergebnisse. Die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen einiger Proben zeigt Bild 1. Der Schlupf wurde entsprechend [3] am unbelasteten Stabende gemessen.

research programme was to enable a goal-oriented and resource-friendly use of fibres by improved understanding of the mechanics of cracked UHPC with combined reinforcement and thus to accelerate the acceptance of UHPC substantially.

Besides the tests on tensile members with combined reinforcement, the test programme also included pull-out tests to determine the bond stress-slip relationship of the bar reinforcement as well as experimental determination of the stress-crack opening relationship of fibre reinforced UHPC.

## 2.2 Tests on the Bond Behaviour of UHPC

The bond behaviour has been investigated on heat treated UHPC of mixture M1Q. The tests are documented in [2].

Beside hot rolled reinforcing steel bars BSt 500 with a diameter of  $\phi = 10$  mm ( $f_{ym}$  about 550 MPa) also ribbed high strength steel of grade St 1420/1570 (SIGMA<sup>®</sup>-prestressing steel) with diameters of  $\phi = 8$  mm and 10 mm as well as grade St 1470/1620 with a diameter of  $\phi = 12$  mm (for both grades  $f_{p0,1m}$  about 1,500 to 1,520 MPa) was used. The relative rib area of the reinforcing bars was  $f_R = 0.072$  (BSt 500) and  $f_R = 0.019$  up to 0.026 (SIGMA<sup>®</sup>-prestressing steel).

The dimensions of the pull-out specimens and the test executions were oriented on the recommendations by RILEM [3]. The bond length was however only  $1.5 \phi$  in order to avoid yielding of the reinforcing bar and to obtain averaged bond stresses close to the local maximum.

In addition to concrete cubes with an edge length of  $10 \phi$  also specimens where the concrete cover was reduced to  $2.5 \phi$  or  $1.0 \phi$  on two opposite sides were investigated. The specimens were fabricated either without fibres or with smooth high strength steel fibres ( $l_f/d_f = 17$  mm/ 0.15 mm, fibre content 1.0 % by volume). Table 1 gives an overview of the test programme and the test results. The bond stress-slip relationships of some specimens are shown in Figure 1. The slip was measured acc. to [3] at the unloaded end of the reinforcing bar.

The maximum bond strength of about  $\tau_{b,max} = 56$  MPa was obtained for BSt 500 and a concrete cover of  $c = 4.5 \phi$  practically independent of fibre

**Tab. 1.** Übersicht über das Versuchsprogramm und die Versuchsergebnisse der Pull-Out-Tests [2].  
**Tab. 1.** Survey of test programme and test results of pull-out tests [2].

Name of test series	BSt10c45	BSt10c45F	St10c45	St10c25	St10c25F	St10c10F	St10c25q	St8c25	St12c25
Grade of steel	BSt 500 S		St 1420/1570 or St 1470/1620						
Bar diameter $\phi$ in mm	10							8	12
Bond length $l_b$	1.5 $\phi$								
Concrete cover $c$	4.5 $\phi$	4.5 $\phi$	4.5 $\phi$	2.5 $\phi$	2.5 $\phi$	1.0 $\phi$	2.5 $\phi$	2.5 $\phi$	2.5 $\phi$
Fibre content $\rho_f$ in % by vol.	-	1.0	-	-	1.0	1.0	-	-	-
Loading direction	Parallel						ortho.	Parallel	
	to casting direction								
Maximum value of bond stress $\tau_{b,max}$ in MPa	56.7	54.8	51.4	24.1	41.9	20.0	36.8	29.4	34.0
Slip $s_l$ when reaching the maximum value of bond stress in mm	0.20	0.15	1.52	0.96	0.72	0.34	0.63	0.35	0.65

Die größte Verbundfestigkeit von etwa  $\tau_{b,max} = 56 \text{ N/mm}^2$  ergab sich für BSt 500 praktisch unabhängig von einer Faserzugabe bei einer Betondeckung  $c = 4,5 \phi$ . Spaltrissbildung wurde bei diesen Proben nicht beobachtet. Die maximale Tragfähigkeit wurde bei kleinen Relativverschiebungen von etwa 0,1 bis 0,2 mm erreicht. Das Verhalten des hochfesten Stahls war bei gleicher Probekörpergeometrie durch eine deutlich geringere Verbundsteifigkeit und eine etwas niedrigere Verbundfestigkeit gekennzeichnet ( $\tau_{b,max} = 51 \text{ N/mm}^2$ ).

Bei reduzierter Betondeckung ( $c = 1,0 \phi$  und  $2,5 \phi$ ) traten Längsriss entlang des Bewehrungsstabs auf, die eine Verminderung der Verbundfestigkeit und bei einigen Proben schlagartiges Aufspalten zur Folge hatten. Durch Faserzugabe konnte Längsrissbildung bei reduzierter Betondeckung zwar nicht vollständig verhindert werden, der Rissfortschritt wurde allerdings soweit verzögert, dass eine Steigerung der Tragfähigkeit gegenüber den vergleichbaren faserfreien Proben erzielt werden konnte.

### 2.3 Zugtragverhalten des faserbewehrten UHPC

Für die in den Versuchen an kombiniert bewehrten UHPC-Dehnkörpern verwendeten Faserbetonmischungen des Typs M2Q wurde das Spannungs-Rissöffnungs-Verhalten an drei gekerbten Prismen je Mischung experimentell ermittelt. Die dabei eingesetzten glatten, hochfesten Stahldrahtfasern besaßen eine Länge von 9 bzw. 17 mm und einen Durchmesser von

addition. Splitting could not be observed for these specimens. The bearing capacity was reached at small relative displacements of about 0.1 up to 0.2 mm. With similar specimen's dimensions, the behaviour of high strength steel was characterised by a significantly lower bond stiffness and a slightly smaller bond strength ( $\tau_{b,max} = 51 \text{ MPa}$ ).

For reduced concrete cover ( $c = 1.0 \phi$  and  $2.5 \phi$ ), longitudinal cracks appeared along the reinforcing bar, which led to a reduction of the bond strength and – for some specimens – to sudden splitting failure. By addition of fibres, longitudinal cracking could not be avoided completely for reduced concrete cover, however, the crack propagation was delayed in a manner that an increase of bearing capacity in comparison to the specimens without fibres could be obtained.

### 2.3 Tensile Behaviour of Fibre Reinforced UHPC

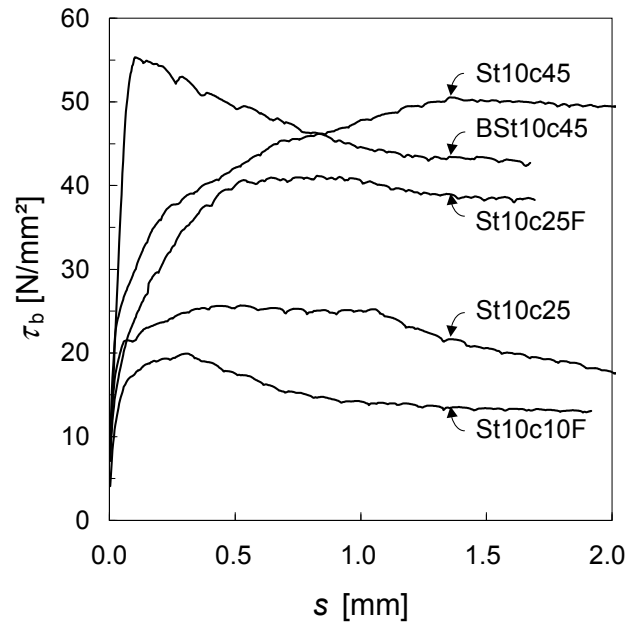
For the fibre reinforced UHPC of type M2Q that has been used in the tests on combined reinforced tensile members, the stress-crack opening relationship was determined on three notched prisms for each mixture. The smooth, high strength steel fibres that were used in this study had a length of 9 and 17 mm, respectively, and a diameter of 0.15 mm. The prisms for testing were casted perpendicular to the loading direction and had a cross-section of 40 mm x 40 mm. They were provided with an approximately 5 mm wide and 5 mm deep sawn notch in the middle of two opposite sides (one of them the side without formwork) so that the

0,15 mm. Die als Versuchskörper verwendeten Prismen wurden liegend hergestellt und besaßen einen Querschnitt von 40 mm x 40 mm. Sie waren in der Mitte an zwei gegenüberliegenden Seiten (davon eine ungeschaltete Seite) mit einer ca. 5 mm breiten und 5 mm tiefen, gesägten Kerbe versehen, so dass die Querschnittsfläche an dieser Stelle 1.200 mm<sup>2</sup> betrug (Bild 2). Durch seitlich aufgeklebte Stahlbleche, die bis unmittelbar an den Kerbenrand reichten, sollte Versagen außerhalb der Kerbe vermieden werden.

Die Verformungen wurden mit induktiven Wegaufnehmern gemessen, die an einer am Kerbenrand auf die Bleche geklemmten Vorrichtung befestigt waren. Zur guten Erfassung des Nachrissbereichs der Betonmatrix wurden bis zum Erreichen der Nachrisszugfestigkeit (Faserwirksamkeit  $\sigma_{c\beta}$ ) steife Kraftmesszellen parallel zur Probe geschaltet.

Die Proben zeigten im Versuch bis unmittelbar vor dem Reißen ein lineares Kraft-Verformungs-Verhalten. Bei Rissbildung war das Verhalten durch einen mehr oder weniger deutlich ausgeprägten, vorübergehenden Kraftabfall gekennzeichnet. Die maximale Kraftaufnahme im Nachrissbereich war dann wesentlich vom Fasertyp und vom Fasergehalt abhängig und wurde bei Rissbreiten von unter 0,20 mm erreicht. Sie nahm besonders bei den 17 mm langen Fasern nur unterproportional mit steigendem Fasergehalt zu, was auf die erschwerte Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei hohen Fasergehalten

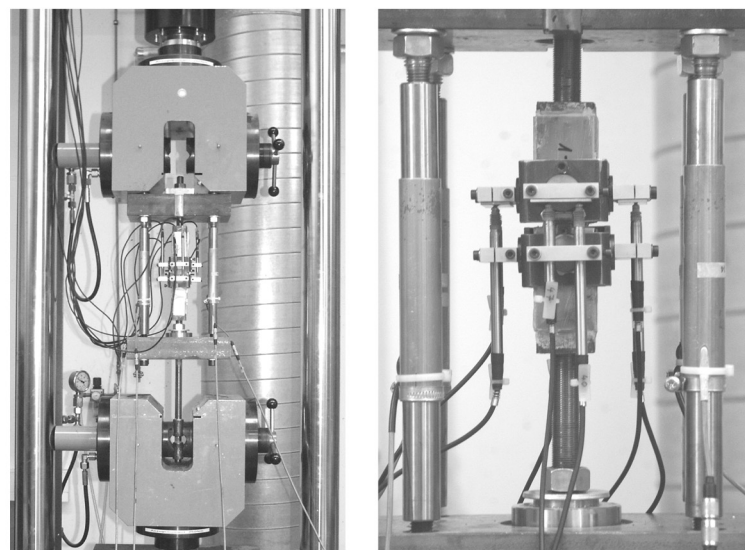
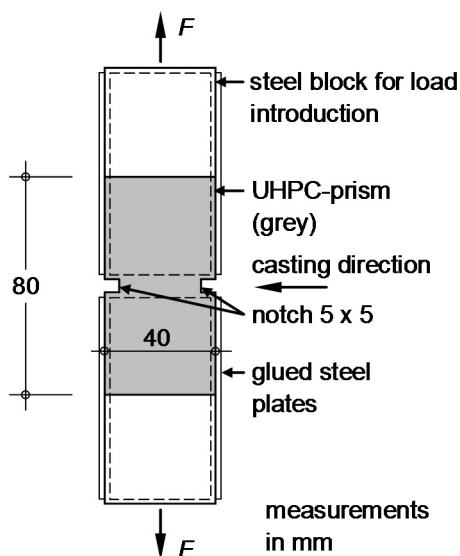
cross-sectional area was 1,200 mm<sup>2</sup> in this section (Figure 2). Failure outside the notch should be avoided by gluing thin steel plates to the lateral surface of the test specimens. These steel plates reached directly to the notch edge.



**Bild 1.** Verbundverhalten von Stabbewehrung in Feinkorn-UHPC der Mischung M1Q [2].

**Fig. 1.** Bond behaviour of reinforcing steel in fine-grain UHPC of type M1Q [2].

The deformations were measured by LVDT's that were fastened at the steel plates by a device near to the notch edge. To gather the post-crack range of the UHPC matrix adequately, stiff load cells were arranged parallel to the specimen until reaching the post-cracking strength (fibre efficiency  $\sigma_{c\beta}$ ).



**Bild 2.** Versuchskörper (links) und Versuchsaufbau mit Instrumentierung (rechts) zur Bestimmung der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung des faserbewehrten UHPC [2].

**Fig. 2.** Test specimen (left hand side) and test setup with instrumentation (right hand side) for determination of stress-crack opening-relationship of fibre reinforced UHPC [2].

(Folge: Inhomogenität, Igelbildung) und die gegenseitige Beeinflussung der Fasern bei kleinen Faserabständen im Rissquerschnitt zurückgeführt werden kann.

Eine Übersicht über das Versuchsprogramm und die erzielten Faserwirksamkeiten gibt Tabelle 2.

In the tests, the specimens showed linear load-deformation behaviour immediately before cracking. At crack formation, the behaviour was characterised by a more or less significant transient load drop. The bearing capacity in the cracked state then depended substantially on

**Tab. 2.** Versuchsprogramm und Faserwirksamkeiten  $\sigma_{cf0}$  der UHPC-Mischungen [2].

**Tab. 2.** Test programme and fibre efficiencies  $\sigma_{cf0}$  of the UHPC mixtures [2].

Test series		Referenz	F9-0.9	F9-2.5	F17-0.9	F17-1.45	F17-2.0
Fibre type		-	Fibre type 1 $l_f = 9 \text{ mm}$ $d_f = 0.15 \text{ mm}$ $\lambda = l_f / d_f = 60$		Fibre type 2 $l_f = 17 \text{ mm}$ $d_f = 0.15 \text{ mm}$ $\lambda = l_f / d_f = 113$		
Fibre content $\rho_f$ in % by vol.		-	0.9	2.5	0.9	1.45	2.0
Fibre efficiency $\sigma_{cf0}$ in MPa							
- Single values	Test specimen No. 1	-	7.02	12.25	8.13	12.46	13.76
	Test specimen No. 2	-	7.69	12.59	11.02	8.98	16.37 <sup>*)</sup>
	Test specimen No. 3	-	7.20	13.65	9.32	8.95	9.09
- Mean value		-	7.30	12.83	9.49	10.13	13.07

<sup>\*)</sup> Adhesive failure at load introduction before reaching the fibre efficiency; the maximum stress measured in the test is indicated

Bild 3 zeigt die Modellvorstellung hinter dem in den zentrischen Zugversuchen beobachteten Last-Verformungs-Verhalten. Im ungerissenen Zustand beteiligen sich die Fasern entsprechend dem Verhältnis ihrer Dehnsteifigkeit zur Gesamtsteifigkeit der Zugprobe an der Lastaufnahme. Während die Betonmatrix bei Erreichen der Zugfestigkeit entfestigt (in Bild 3 als linear mit der Rissöffnung abnehmende Betonspannung dargestellt) ist die Aktivierung der Fasern bei kleinen Rissbreiten durch einen starken Anstieg der durch die Fasern übertragenen Bruttobetonspannung gekennzeichnet. Durch die Überlagerung oder Parallelschaltung mit der entfestigenden Matrix kann daraus zunächst ein insgesamt verfestigendes Verhalten resultieren. Dies bedeutet, dass ein stabiles Mikrorisswachstum initiiert wird und Makrorissbildung erst auf einem höheren Spannungsniveau  $\sigma_{cf,cr}^I$  eintritt.

Das Erreichen der Faserwirksamkeit  $\sigma_{cf0}$  markiert im Zustand II den Übergang von der Phase der Faseraktivierung in den Faserauszug. Von diesem Moment an weisen alle Fasern auf ihrer

the type and content of fibre and was reached at crack widths of less than 0.20 mm. Especially for the 17 mm long fibres, the bearing capacity increased less than proportional with increasing fibre content. This can be attributed to the inferior workability of the fresh concrete with high fibre content (consequence: inhomogeneity, fibre clumping) and to the interaction of the fibres for small fibre spacings in the cracked cross-section.

A survey of the test programme and the resulting fibre efficiencies is given in Table 2.

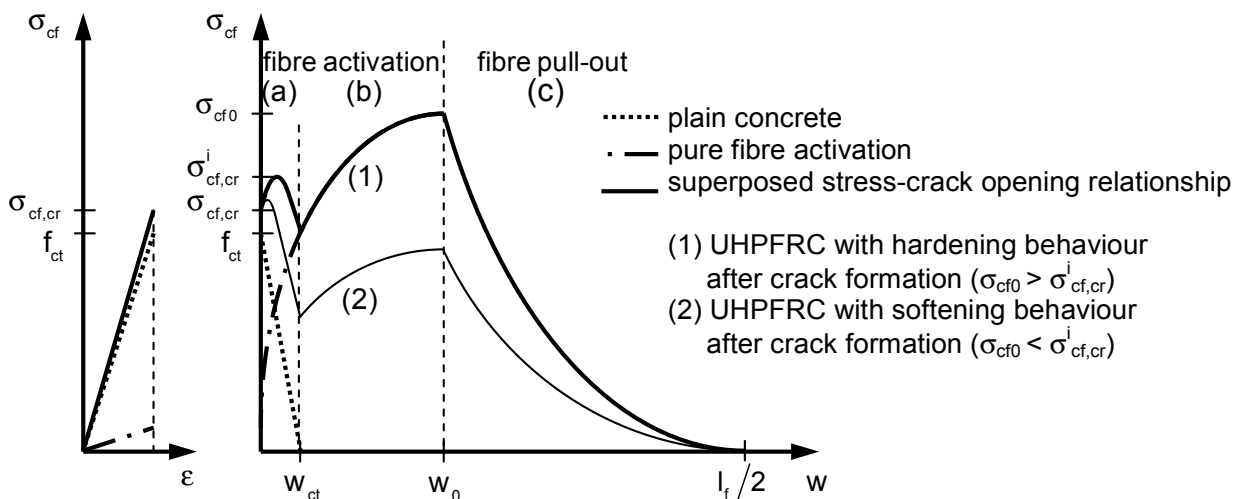
Figure 3 shows a schematic view of the stress-crack opening behaviour of UHPFRC that can be observed in axial tensile tests. In the uncracked state, the fibres participate in load bearing according to the ratio of their axial stiffness to the overall stiffness of the specimen. While the concrete matrix softens after reaching the tensile strength (in Figure 3 represented by a linear decrease of matrix tensile stress), the activation of the fibres is characterised by a sharp increase of the nominal concrete stress carried by the fibres at small crack widths. The

gesamten Einbindelänge Schlupf auf. Bei weiterer Rissöffnung werden die Fasern sukzessive auf der Seite mit der jeweils kürzeren Einbindelänge aus der Matrix herausgezogen. Aufgrund der unterschiedlichen Einbindelängen der Fasern zu beiden Seiten eines Risses ist der Verlauf der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung sowohl in der Faseraktivierungsphase als auch im Faserauszug nichtlinear.

Analytische Beziehungen zur Beschreibungen des Spannungs-Rissöffnungs-Verhaltens von Faserbeton im Allgemeinen finden sich z. B. in [4, 5]. Die Anwendbarkeit und Erweiterung (z. B. Einfluss des Schwindens) der dort beschriebenen Zusammenhänge auf faserbewehrten UHPC wurde in [2] gezeigt.

the superposition or parallel connection with the softening matrix, often results in an initial overall hardening behaviour (phase (a) in Figure 3). This means that a stable micro-crack growth is initiated and macro cracking finally starts at a higher stress level  $\sigma_{cf,cr}^i$ .

Reaching the fibre efficiency  $\sigma_{cf0}$  in state II marks the transition from the phase of fibre activation to the phase of fibre pull-out. Henceforth, every fibre shows slip on its entire embedment length. With further crack opening, all fibres are gradually pulled out from the matrix at the side with their shorter embedment length. Due to the different embedment lengths of the fibres on both sides of a crack, the course of the stress-crack opening behaviour is nonlinear both in the phase of fibre activation and in the phase of fibre pull-out.



**Bild 3.** Modellhafte Darstellung der Überlagerung von Matrixfestigung und Faseraktivierung [6].

**Fig. 3.** Schematic view of the stress-crack opening relationship of UHPFRC [6].

#### 2.4 UHPC-Bauteile mit kombinierter Bewehrung aus Stabstahl und Fasern unter Zugbeanspruchung

Zur Untersuchung des Zusammenwirkens der beiden Bewehrungselemente „Stabstahl“ und „Fasern“ wurden Versuche an scheibenförmigen Dehnkörpern mit gemischter Bewehrung durchgeführt [2]. Dabei wurde der Einfluss folgender Parameter auf das Tragverhalten unter kurzzeitiger monotoner Lastbeanspruchung untersucht:

- Faserlänge  $l_f$  (9 und 17 mm)
- Fasergehalt  $\rho_f$  (0,9 bis 2,5 Vol.-%)
- Stabstahlart (Betonstahl BSt 500, hochfester Stahl St 1420/1570 bzw. St 1470/1620)
- Stabdurchmesser  $\phi$  (8 und 12 mm)
- Stabstahlbewehrungsgehalt  $\rho_s$  (1,3 und 3,0 %)
- Anordnung einer Querbewehrung

Analytical relationships for describing the stress-crack opening behaviour of fibre reinforced concrete in general can be found e. g. in [4, 5]. The application and extension (e. g. influence of shrinkage) of these relationships for fibre reinforced UHPC is described in [2].

#### 2.4 UHPC Structural Members with Bar Reinforcement and Fibres under Tensile Loading

Tests on panel shaped specimens with combined reinforcement were conducted in order to investigate the interaction between the both reinforcing elements “bar reinforcement” and “fibres” [2]. At this, the influence of the following parameters on the structural behaviour under monotonic loading were investigated:

- fibre length  $l_f$  (9 and 17 mm)
- fibre content  $\rho_f$  (0.9 up to 2.5 % by vol.)

Des Weiteren wurden auch ausschließlich stabstahlbewehrte Scheiben geprüft. Die verwendeten Bewehrungsstähle und Fasern wurden bereits in den vorherigen Abschnitten vorgestellt. Der Einsatz eines hochfesten gerippten Bewehrungsstahls ermöglichte es, die Rissbildung und Rissbreitenentwicklung auch bei sehr großen mittleren Dehnungen noch im elastischen Verformungsbereich des Stabstahls zu beobachten. Einen Überblick über das Versuchsprogramm gibt Tabelle 3. Von jedem Typ wurden ein bzw. zwei Versuchskörper hergestellt.

Die Dehnkörper aus wärmebehandeltem Feinkorn-UHPC der Mischung M2Q besaßen einen Querschnitt von 70 mm x 220 mm und eine Länge von 1.300 mm. Sie waren in Zugrichtung einlagig mittig mit jeweils vier Stahlstäben bewehrt (Bild 4). Bei einigen Probekörpern wurde innerhalb des Messbereichs zusätzlich eine Querbewehrung wechselweise zu beiden Seiten der Längsbewehrung angeordnet.

- type of bar reinforcement (rebars BSt 500, high strength steel St 1420/1570 and St 1470/1620)
- bar diameter  $\phi$  (8 and 12 mm)
- reinforcement ratio  $\rho_s$  (1.3 and 3.0 %)
- arrangement of transverse reinforcement

In addition, specimens with bar reinforcement only were tested. The bar reinforcement and the fibres used have already been presented in the previous chapters. The use of ribbed high strength steel made it possible to monitor the crack formation process and crack width development in the elastic range of the steel even at large average tensile strains. Table 3 gives a survey of the test programme. From each type one or two specimens were fabricated.

The tensile members were made out of heat treated fine grain UHPC mixture M2Q. They had a cross-section of 70 mm x 220 mm and a length of 1,300 mm. They were reinforced centrally in

**Tab. 3.** Versuchsprogramm: Dehnkörper mit gemischter Bewehrung [2].

**Tab. 3.** Test programme: tensile members with combined reinforcement [2].

Name of the specimen/series	d8F9/0.9				d12F9/0.9				d8F9/2.5				d12F9/2.5				d8F17/0.9				d12F17/0.9				d8F17/1.45				d12F17/1.45				d8F17/2.0				d12F17/2.0				Qd8F17/0.9				BStd8F17/0.9				BStd12F17/0.9				QBStd8F17/0.9				d8		BStd8	
	Fibre type acc. to Table 2	Fibre type 1								Fibre type 2																-																																		
Fibre length $l_f$ in mm	9								17																-																																			
Fibre diameter $d_f$ in mm									0.15																-																																			
Fibre content $\rho_f$ in % by vol.	0.9		2.5		0.9		1.45		2.0		0.9																																																	
Grade of steel																																																												
- BSt 500																																																												
- St 1420/1570	X		X	X	X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X																									
- St 1470/1620		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X																										
Bar diameter $\phi$ in mm	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12																										
Reinforcement ratio $\rho_s$ in %	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0	1.3	3.0																										
Transverse reinforcement									-								X				-				X				-																															

Die Scheiben wurden über Klemmbacken in eine servohydraulische, elektronisch gesteuerte Zugprüfmaschine eingespannt. Die Belastung erfolgte weggesteuert mit einer konstanten Wegzunahme von 2  $\mu\text{m/s}$  im Bereich kleiner Dehnungen (bis etwa 1,0 ‰ Gesamtdehnung) sowie 10  $\mu\text{m/s}$  im Anschluss daran.

tensile direction with one layer consisting in 4 reinforcing bars (Figure 4). For some specimens, an additional transverse reinforcement was arranged within the measuring range alternating on both sides of the tensile reinforcement.

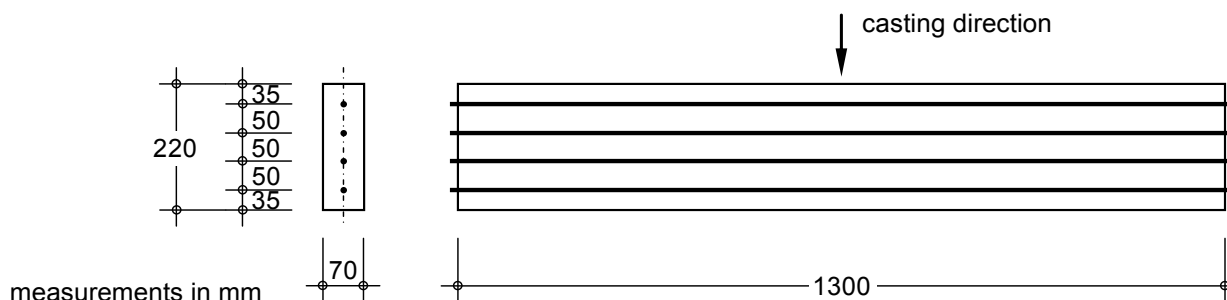
The test specimens were fixed by clamp jaws in an electronically controlled, servo-hydraulic testing device. The loading was conducted using

Die Verformungen wurden mit vier induktiven Wegaufnehmern integral über einen von der Einspannstelle ausreichend entfernten Bereich von 750 mm Länge in der Mitte des Prüfkörpers gemessen. Die Rissbildung und Rissbreitenentwicklung wurde für diskrete Dehnungszustände visuell mit Hilfe einer Risslupe verfolgt. Dazu wurden auf Vorder- und Rückseite des Probekörpers jeweils drei Messstrecken definiert. Risse mit Breiten ab ca. 10 bis 20  $\mu\text{m}$  konnten visuell erkannt und für jeden Dehnungszustand mit unterschiedlicher Farbe auf dem Probekörper angezeichnet werden. Eine manuelle Aufnahme der Rissbreitenentwicklung erfolgte für Risse mit Breiten ab ca. 50  $\mu\text{m}$ . Aussagen über die Verteilung der Rissbreiten sollten zudem indirekt über die bestehende Korrelation zwischen Rissbreiten und Rissabständen gewonnen werden.

Die Anzahl der an einem Probekörper entlang aller Messstrecken aufgenommenen Rissabstände lag je nach Bewehrungskonfiguration zwischen 257 und 744.

displacement control with a constant increase of displacement of 2  $\mu\text{m/s}$  for small strains (up to a total strain of about 1 ‰) and of 10  $\mu\text{m/s}$  after that.

The deformations were measured integrally by four linear variable displacement transducers (LVDTs) over a measuring range of 750 mm in the middle of the specimens with a sufficient distance from the fixing points. Crack formation and development of crack width were observed visually by crack loupe at discrete strain states. For that purpose, three measuring lengths were marked at the front and on the back side of the specimen. Cracks with a width of more than about 10 to 20  $\mu\text{m}$  could be realised visually and were marked at the specimen's surface with different colours for each strain state. Crack development for cracks with widths of more than 50  $\mu\text{m}$  was recorded by hand. Furthermore, results about the crack width distribution should be gained indirectly through the existent correlation between crack width and crack spacing.



**Bild 4.** Abmessungen und Bewehrungsführung der UHPC-Dehnkörper (hier ohne Querbewehrung) [2].  
**Fig. 4.** Dimensions and reinforcement configuration of UHPC tensile members (sketch without transverse reinforcement) [2].

Für ausgewählte Probekörper zeigt Bild 5a die aus den Versuchen erhaltenen nominellen Stahlspannungs-Dehnungs-Beziehungen. Die nominelle Stahlspannung  $\sigma_s$  ergibt sich aus der aufgetragenen Zugkraft bezogen auf die Stahlquerschnittsfläche  $A_s$ . Daneben ist in Bild 5b der Mitwirkungsanteil des Faserbetons, d.h. die Differenz zwischen der Spannungs-Dehnungs-Linie des UHPC-Dehnkörpers und der des reinen Stahls, isoliert in Form einer mittleren Betonspannungs-Dehnungs-Beziehung angegeben. Die mittleren Stahldehnungen  $\varepsilon_{sm}$  wurden aus den gemittelten Messwerten der vier induktiven Wegaufnehmer und der Schwindverkürzung der Proben berechnet. Letztere wurde messtechnisch über die Längenänderung der an den Enden der Scheibe herausstehenden Bewehrungsstäbe ermittelt. Dazu wurde die Länge der Stäbe vor dem Einbau in die Schalung sowie ein weiteres Mal einige Tage nach Abschluss der

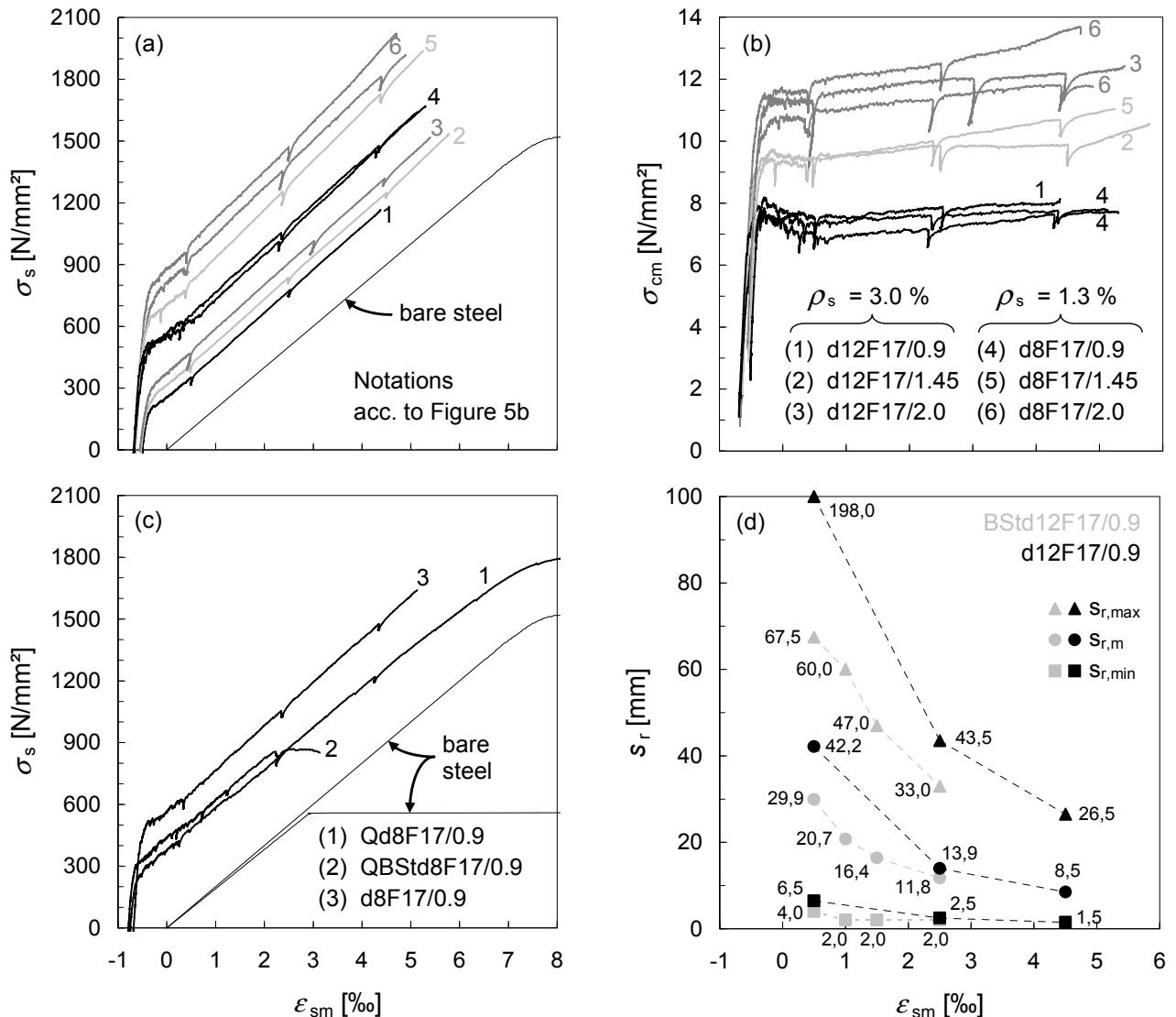
The total number of crack spacings recorded along all measuring lengths of each specimen was between 257 and 744 depending on the reinforcement configuration.

For some selected test specimens, Figure 5a shows the nominal steel stress-strain relationship obtained from the tests. The nominal steel stress-strain relationship  $\sigma_s$  had been achieved from the applied tensile force divided by the steel area  $A_s$ . Besides, Figure 5b shows the contribution of the fibre reinforced UHPC – i.e., the difference between the stress-strain curves of the tensile member and that of bare steel – on its own in form of an average concrete stress-strain relationship. The average steel strain  $\varepsilon_{sm}$  was calculated from the mean value of the displacements measured by the four LVDTs and from the shortening of the specimens due to shrinkage. The latter was determined by measuring the change of length of the reinforcing bars



Wärmebehandlung der erhärteten Prüfkörper gemessen. Die Schwindverkürzung kann als Startwert der Spannungs-Dehnungs-Linie (Vordehnung) direkt aus Bild 5a abgelesen werden.

that stuck out at the ends of the panel. For this, the length of the reinforcing bars was measured one times before being implemented in the formwork and a second time some days after



**Bild 5.** Ergebnisse ausgewählter UHPC-Dehnkörper [2].

- Einfluss des Bewehrungsgehalts  $\rho_s$  und des Stabdurchmessers  $d_s$  auf das Last-Verformungs-Verhalten
- Mitwirkungsanteils des Faserbetons zu den Versuchen aus a)
- Einfluss der Anordnung einer Querbewehrung auf das Last-Verformungs-Verhalten
- Kleinst- ( $s_{r,min}$ ), Größt- ( $s_{r,max}$ ) und Mittelwerte ( $s_{r,m}$ ) der Rissabstände für mit unterschiedlichen Stabstählen bewehrte Dehnkörper

**Fig. 5.** Test results of some UHPC tensile members [2].

- Influence of reinforcement ratio  $\rho_s$  and bar diameter  $\phi$  on the load-deformation behaviour
- Tension stiffening of fibre reinforced concrete for the tests from a)
- Influence of the arrangement of transverse reinforcement on the load- deformation behaviour
- Minimum ( $s_{r,min}$ ), maximum ( $s_{r,max}$ ), and mean value ( $s_{r,m}$ ) of crack spacings for tensile members reinforced with different bar reinforcement

Der Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen zeigt, dass die Zugversteifung (Tension Stiffening) – wie bei reinem Stahlbeton – weitgehend unabhängig vom Längsbewehrungsgrad

finishing the heat treatment of the hardened specimen. The shortening due to shrinkage can

ist und bei gemischter Bewehrung maßgeblich durch die Mitwirkung der Fasern, d. h. die Nachrissspannung des Faserbetons, bestimmt wird.

Die Anordnung einer Querbewehrung bedeutet in diesem Zusammenhang einen Verlust an Steifigkeit, da der wirksame Faserbetonquerschnitt durch den Querstab vermindert und die Fasern in ihrer gleichmäßigen Verteilung und Orientierung in der Umgebung des Querstabs behindert werden (Bild 5c).

Auf die Größe der Rissabstände und Rissbreiten wirken sich eine Reduzierung des Stabdurchmessers, eine Vergrößerung des Stabstahl- und/oder Fasergehalts sowie ein verbesserter Stabstahl-Matrix-Verbund (Stichwort: bezogene Rippenfläche  $f_R$ ) erwartungsgemäß günstig aus. Letzteres wird in Bild 5d bei Vergleich der Entwicklung der Rissabstände für die mit Betonstahl bzw. hochfestem Stabstahl bewehrten Probekörper deutlich.

Eine ausführliche Darstellung der Versuche findet sich in [2]. Auch werden dort die bekannten rissmechanischen Zusammenhänge des Stahlbetons und die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung des Faserbetons unter Berücksichtigung des Gleichgewichts und der Verträglichkeit miteinander verknüpft. Das so entwickelte mechanische Modell wird anhand der experimentell gewonnenen Ergebnisse in Bezug sowohl auf das Last-Verformungs-Verhalten als auch auf die Rissbildung validiert. Ein daraus abgeleitetes Ingenieurmodell zur Berechnung/Begrenzung der Rissbreite bei kombiniert bewehrten Betonbauteilen wird in [6-8] vorgestellt und diskutiert. Aufgrund seiner allgemeingültigen Formulierung ist der vorgeschlagene Ansatz auf alle mit Stabstahl und Fasern bewehrten Betone anwendbar, d. h. nicht auf UHPC beschränkt.

### 3 UHPC-Bauteile unter Druck-Querkzug-Beanspruchung

#### 3.1 Fragestellung und Ziel des Forschungsvorhabens

Zweiachsiges Spannungszustände mit Druckbeanspruchung und gleichzeitig wirkendem Querkzug führen bei Beton zu einer Abnahme sowohl der Druck- als auch der Zugfestigkeit. Dies gilt für Betone aller Festigkeitsklassen, ist allerdings mit zunehmender Betongüte stärker ausge-

be taken as initial strain of the stress-strain curves in Figure 5a.

The comparison of the stress-strain relationships shows that the tension stiffening – as for traditional reinforced concrete – is more or less independent of the longitudinal reinforcement ratio and is influenced significantly by the contribution of the fibres, i.e. the post-cracking stress of fibre reinforced concrete.

In this context, the arrangement of transverse reinforcement means a loss of stiffness, because the fibre reinforced cross-section effective in tension is reduced by the transverse reinforcing bar and the uniform distribution and orientation of the fibres is disturbed in the area around the transverse reinforcing bar (Figure 5c).

A reduction of the bar diameter, an increase in reinforcing ratio and/or fibre content as well as an improved bond between reinforcing bars and matrix (keyword: related rib area  $f_R$ ) show – as expected – a positive influence on the crack spacings and crack widths. The latter is evident in Figure 5d, when comparing the development of crack spacings for the specimens with rebars and for the specimens with high strength steel.

A detailed description of the tests is given in [2]. There, also the well-known crack mechanical relationships of reinforced concrete and the stress-crack opening relationship of the fibre reinforced concrete are connected with each other considering the equilibrium and the compatibility conditions. The developed mechanical model is validated by experimental results with respect to both the load-deformation behaviour and the formation of cracks. Based on this, an engineering model that allows for crack width control of combined reinforced concrete is presented and discussed in [6-8]. Because of its universal formulation, the proposed model is applicable to all concrete qualities that are reinforced with steel bars and fibres, i.e. it is not limited to UHPC.

### 3 UHPC Structural Members under Compression-Tension Loading

#### 3.1 Scope and Aims of Research

Biaxial stress states with compressive stress and transverse tension acting at the same time lead to a reduction of both concrete compressive and tensile strength. This holds true for all grades of concrete but is more distinctive with increasing concrete strength. For reinforced concrete, reaching the concrete tensile strength

prägt. Für Stahlbeton ist das Erreichen der Betonzugfestigkeit ohne Bedeutung, sofern eine Mindestbewehrung vorgesehen wird, welche die im Riss frei werdenden Zugkräfte aufnimmt. In diesem Fall erfolgt das Versagen stets durch einen Betondruckbruch.

In UHPC entstehen unter Zugbeanspruchung aufgrund des guten Verbundes mit der Bewehrung Risse in sehr kleinen Abständen. Gleichzeitig wirkender Querdruck trifft damit auf sehr schlanke und meist unregelmäßig berandete Druckstreben. Die Möglichkeit der Kraftübertragung zwischen den einzelnen Druckstreben durch Kornverzahnung ist für Feinkorn-UHPC aufgrund des kleinen Größtkorndurchmessers stark eingeschränkt. Dies lässt eine deutliche Abminderung der Drucktragfähigkeit des gerissenen Betons gegenüber der einaxialen Druckfestigkeit erwarten. Andererseits kann der Einsatz von Fasern eine gegenseitige Stabilisierung der Druckstreben ermöglichen.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden Biaxialversuche an scheibenförmigen Proben durchgeführt. Ziel war es, insbesondere den günstigen Einfluss der Fasern auf die Druck-Querzugfestigkeit von bewehrtem UHPC zu beleuchten.

### **3.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung**

Im Rahmen der Versuchsreihe wurden insgesamt 46 Scheiben aus wärmebehandeltem Feinkorn-UHPC (Mischung M1Q) geprüft, wobei eine Reihe Probekörper bei variablem Fasergehalt ausschließlich einaxial auf Zug beansprucht wurde bzw. aufgrund von Fehlern bei der Versuchsdurchführung oder Messwerterfassung keine verwertbaren Ergebnisse lieferte. Als aussagekräftig in Hinblick auf die Problematik der Druck-Querzug-Festigkeit können drei unbewehrte Scheiben, vier ausschließlich faserbewehrte Scheiben, zwölf ausschließlich stabstahlbewehrte Scheiben und zwölf kombiniert bewehrte Scheiben eingestuft werden.

Ausschließlich über diese insgesamt 31 Scheiben wird im Folgenden berichtet. Davon wurden die drei unbewehrten, die vier ausschließlich faserbewehrten, drei der ausschließlich stabstahlbewehrten und vier der kombiniert bewehrten Scheiben einaxial auf Druck belastet (Referenzscheiben). Die übrigen UHPC-Probekörper wurden sequentiell belastet. D. h., es wurde zunächst eine Zugdehnung  $\varepsilon_t$  aufgebracht, die während der anschließenden monotonen

is not relevant if a minimum reinforcement is provided that carries the tensile forces that arise in the crack. In this case, the failure mode always is in concrete compression.

In UHPC, cracks with very small spacings are generated due to the good bond with the bar reinforcement. Transverse compression acting at the same time then encounters very slender compression struts with usually irregular borders. The possibility of transmitting loads between the individual struts by aggregate interlock is strongly limited for fine grain UHPC because of the small maximum aggregate size. Therefore, a significant reduction of the bearing capacity of the cracked concrete compared to the uniaxial compressive strength can be expected. On the other hand, the use of fibres may lead to a mutual stabilization of the compressive struts.

To investigate this problem, biaxial tests were performed on panel shaped specimens. The main aim was to study the favourable influence of the fibres on the compression-tension strength of reinforced UHPC.

### **3.2 Test Programme and Test Execution**

In the context of a test series in total 46 panels made out of heat treated fine grain UHPC (mixture M1Q) were tested. Some of these specimens with variable fibre content were loaded uniaxially in tension only and some did not lead to feasible results due to errors during test execution or data acquisition. With respect to the compression-tension strength, three plain concrete panels, four exclusively fibre reinforced panels, twelve panels with bar reinforcement only, and twelve panels with combined reinforcement can be classified to be significant.

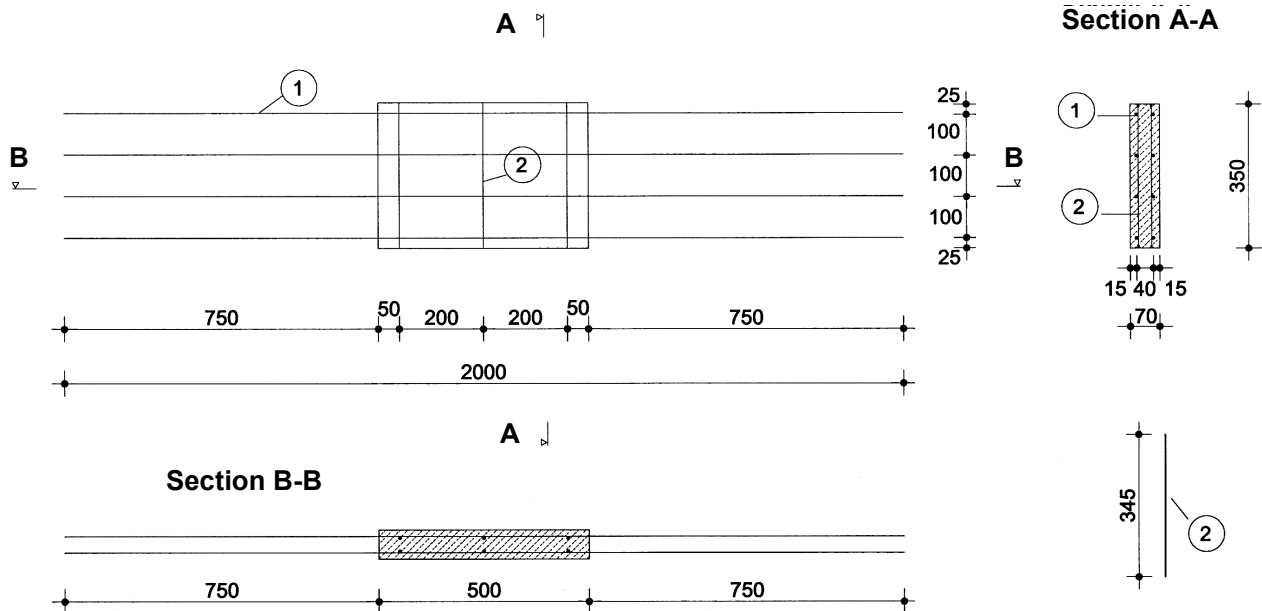
In the following, it is reported exclusively on these in total 31 panels. From these, the three plain concrete panels, the four exclusively fibre reinforced panels, three of the panels with bar reinforcement only, and four of the panels with combined reinforcement were loaded uniaxially in compression only (reference panels). The remaining UHPC specimens were loaded sequentially. That means that at first a tensile strain  $\varepsilon_t$  was applied which was kept approximately constant during the subsequent monotonic compressive loading until the compressive failure occurred. The tensile strain of these panels was between 0.65 and 5.9 ‰.

The dimensions of the specimens were 500 mm in tensile, 350 mm in compressive direction, and

Druckbelastung näherungsweise konstant gehalten wurde, bis der Druckbruch erfolgte. Die Zugdehnung betrug bei diesen Scheiben zwischen 0,65 und 5,9 %.

Die Abmessungen der Probekörper betragen 500 mm in Zugrichtung und 350 mm in Druckrichtung bei einer Dicke von 70 mm (Bild 6). Die Bewehrung war orthogonal in zwei Lagen angeordnet und bestand aus hochfesten gerippten Stabstählen St 1420/1570,  $\phi = 8$  mm, wie sie auch für die Dehnkörper bei der Untersuchung des Tragverhaltens und der Rissbildung unter Zugbeanspruchung verwendet worden waren (siehe Abschnitt 2). Der Bewehrungsgehalt betrug  $\rho_s = 1,64$  % in Zug- und  $\rho_s = 0,86$  % in Druckrichtung. Die ausschließlich faserbewehrten und kombiniert bewehrten Scheiben besaßen einen Fasergehalt von 1,0 Vol.-%. Es wurden glatte hochfeste Stahlfasern  $l_f/d_f = 17$  mm/0,15 mm verwendet.

70 mm in thickness (Figure 6). The reinforcement was arranged orthogonally in two layers and consisted of ribbed high-strength steel bars St 1420/1570,  $\phi = 8$  mm, as they had also been used for the tensile members investigating the structural behaviour and the crack formation (see chapter 2). The reinforcement ratio was  $\rho_s = 1.64$  % in tensile direction and  $\rho_s = 0.86$  % in compressive direction. The panels reinforced only with fibre and the panels with combined reinforced had a fibre content of 1.0 % by volume. Smooth high strength steel fibres  $l_f/d_f = 17$  mm/0.15 mm were used.



**Bild 6.** Abmessungen und Bewehrung der UHPC-Scheiben der Druck-Querzug-Versuche [9].  
**Fig. 6.** Dimensions and reinforcement of the UHPC panels for the compression-tension-tests [9].

Begleitend zu den Scheiben wurden Zylinder,  $d/h = 150$  mm/300 mm, hergestellt, deren Festigkeitskennwerte als Referenz dienen.

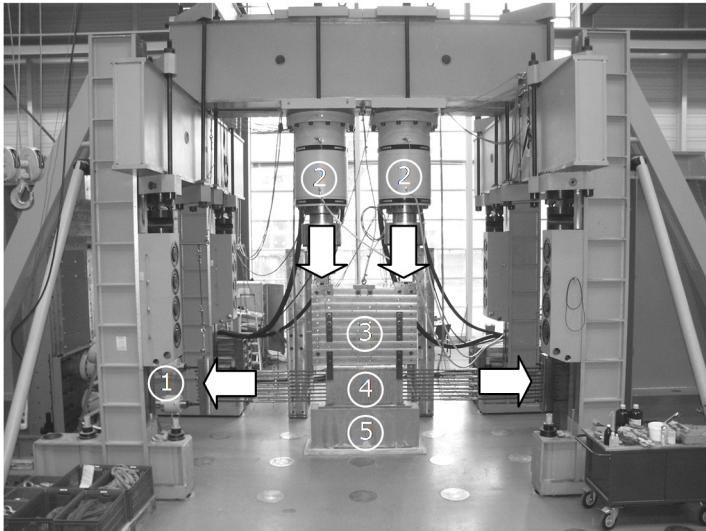
Accompanying with the panels, cylinders,  $d/h = 150$  mm/300 mm, were fabricated whose strength values were used as a reference.

Bild 7 zeigt den Versuchsaufbau im Aufspannfeld des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau der Universität Kassel

Figure 7 shows the test setup on the strong floor of the Institute of Structural engineering of the University Kassel.

Die horizontale Zugkraft wurde mit zwei 400 kN-Hydraulikzylinder (Nr. 1 in Bild 7) über Gewindestangen auf die aus den Scheiben herausstehenden und mit Gewinden versehenen Bewehrungsstäbe weggesteuert aufgebracht. Die vertikale Druckkraft wurde ebenfalls weggesteuert mit zwei 2,5 MN-Hydraulikzylinder (Nr. 2 in Bild

The horizontal tension force was applied displacement controlled by two 400 kN hydraulic jacks (No. 1 in Figure 7) by threaded bars to the reinforcing bar that was provided with screw threads and stuck about of the panels. The vertical compressive force was also applied displacement controlled using two 2.5 MN hydraulic



- (1) 2 x 400 kN-hydraulic jack for tensile forces
- (2) 2.5 MN-hydraulic jack for compressive forces
- (3) Load distribution
- (4) Test specimen
- (5) UHPC-bearing block

**Bild 7.** Versuchsaufbau der biaxialen Druck-Zug-Versuche [9].  
**Fig. 7.** Test-setup of the biaxial compression-tension-tests [9].

7) in zwei übereinander stehende Stahlscheiben (Nr. 3 in Bild 7) und über diese in den Probekörper (Nr. 4 in Bild 7) eingeleitet. Als Auflager der Scheiben diente ein massiver Stahlbetonblock aus UHPC (Nr. 5 in Bild 7).

Die Verformungen in der Scheibenebene wurden über jeweils drei induktive Wegaufnehmer in horizontaler und vertikaler Richtung an den beiden gegenüberliegenden Seiten gemessen.

### 3.3 Versuchsergebnisse

Unter Zugbelastung wiesen die kombiniert bewehrten Scheiben bei vergleichbarer Zugdehnung  $\varepsilon_t$  erwartungsgemäß kleinere Rissabstände und Rissbreiten als die ausschließlich stabstahlbewehrten Probekörper auf (Bilder 9a und b). Unter der anschließend aufgebracht Druckbelastung versagten die faserfreien Scheiben spröde (Bild 9c). Gleiches Verhalten zeigten die einaxial geprüften unbewehrten bzw. ausschließlich stabstahlbewehrten Versuchskörper. Auch für die faserbewehrten bzw. kombiniert bewehrten Proben war ein abfallender Ast der Last-Verformungs-Kurve praktisch nicht messbar. Der Bruch verlief aufgrund der Wirkung der Fasern aber nicht explosionsartig (Bild 9d).

Für alle 31 aussagekräftigen Versuche ist in Bild 8 die auf die Zylinderdruckfestigkeit  $f_{c,cyl}$  bezogene Betondruckspannung  $\sigma_{c2}$  der UHPC-Scheiben dargestellt.  $\sigma_{c2}$  wurde aus der maximal ertragenen Druckkraft dividiert durch den ideellen Querschnitt in Druckrichtung ermittelt. Es ist erkennbar, dass selbst von den einaxial geprüften Scheiben nicht die Zylinderdruckfestigkeit erreicht wird. Dies ist zum einen auf die unterschiedliche Geometrie der Proben (Maßstabef-

jacks (No. 2 in Figure 7). The compression forces was then transmitted by two load distributing steel panels (No. 3 in Figure 7) on top of each other into the specimen (No. 4 in Figure 7). A block of UHPC (No. 5 in Figure 7) acted as support for the specimens.

The displacements in the panel's plane were measured with three LVDTs in the vertical and horizontal directions at the front and at the back side of the panel.

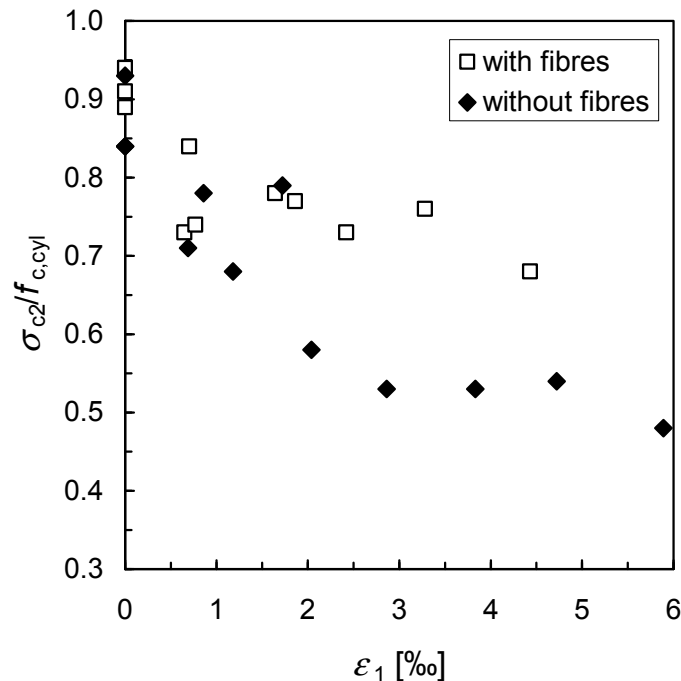
### 3.3 Test Results

Under tensile loading the combined reinforced panels showed at comparable tensile strain  $\varepsilon_t$  – as expected – smaller crack spacings and crack widths than the panels with bar reinforcement only (Figure 9a and b). Under the subsequently applied compressive loading, the panels without fibres failed brittle (Figure 9c). The plain concrete panels and the panels with bar reinforcement only which were tested uniaxially in compression showed the same behaviour. Also for the fibre reinforced or combined reinforced specimens, a descending branch of the load-displacement curve was hardly to measure. The failure however was not of type explosive due to the effect of the fibres (Figure 9d).

Figure 8 shows the concrete compressive stress  $\sigma_{c2}$  of the UHPC panels relating to the cylinder compressive strength  $f_{c,cyl}$  for all of the 31 feasible tests.  $\sigma_{c2}$  was determined by the borne compressive force divided by the transformed cross-sectional area in compression. As can be seen, even the uniaxially tested panels did not reach the cylinder compressive strength. This is on the one hand due to the different geometry of the specimens (scale effect) and on the other hand

fekt) und zum anderen auf die Störung des Kraftflusses in Druckrichtung insbesondere durch die quer dazu verlaufende Zugbewehrung zurückzuführen (Spannungskonzentrationen). Letzteres führt für die faserfreien Scheiben zu einer etwas größeren Abminderung der Tragfähigkeit als für die faserbewehrten Proben.

caused by transverse tensile reinforcement that disturbs the flux of forces in compressive direction (stress concentrations). The latter results for the panels without fibres in a slightly larger reduction of the bearing capacity than for the fibre reinforced specimens.

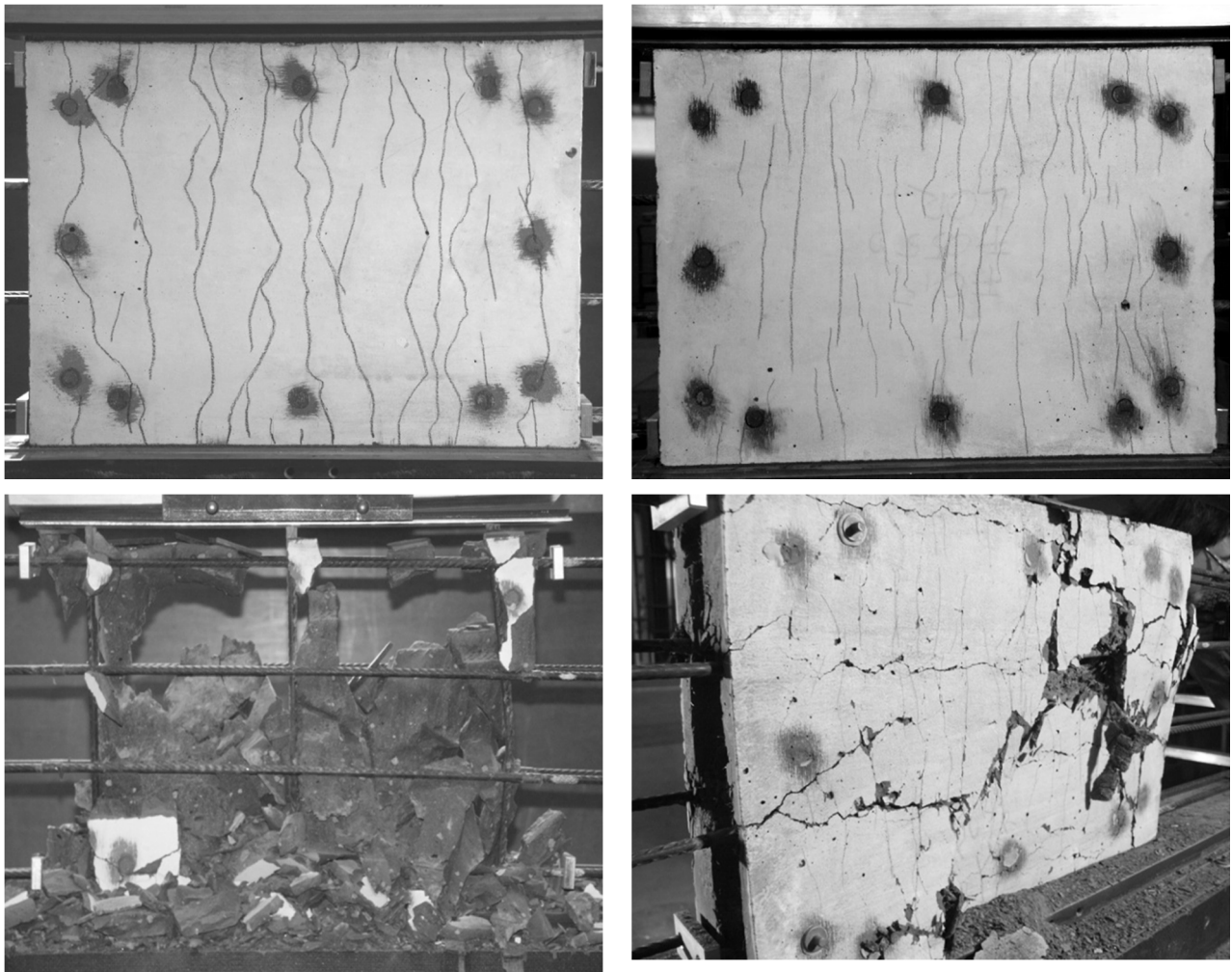


**Bild 8.** Auf die Zylinderdruckfestigkeit  $f_{c,cyl}$  bezogene maximale Betondruckspannung  $\sigma_{c2}$  der UHPC-Scheiben in Abhängigkeit der Querdehnung  $\epsilon_1$ .

**Fig. 8.** Maximum concrete compressive stress  $\sigma_{c2}$  of the UHPC panels relating to cylinder compressive strength  $f_{c,cyl}$  versus tensile strain  $\epsilon_1$ .

Unter biaxialer Druck-Querzug-Beanspruchung ist die Abminderung der Tragfähigkeit bei zunehmender Querdehnung (Rissbreite) für die faserfreien UHPC-Scheiben deutlich stärker ausgeprägt als für die kombiniert bewehrten Proben. Vermutlich nachdem die Verzahnung zwischen den einzelnen Druckstreben wegen großer Rissbreiten vollständig verlorengegangen ist, stabilisiert sich die biaxiale Druck-Zug-Festigkeit der faserfreien Scheiben bei Querdehnungen  $\epsilon_1$  von etwa 2 bis 3 ‰ auf einem Niveau von etwa  $0,5 f_{c,cyl}$ . Für die kombiniert bewehrten Scheiben ergeben sich wegen der kleinen Rissabstände selbst bei großer Querdehnung immer noch sehr kleine Rissbreiten. Dies erklärt den für diese Proben bei etwa  $0,7 f_{c,cyl}$  anzusetzenden unteren Grenzwert der biaxialen Druck-Zug-Festigkeit. Da hochfeste Stabbewehrung mit einer Dehngrenze  $> 7$  ‰ verwendet wurde, kann ein Einfluss plastischer Stahlverformungen auf die Abminderung der Tragfähigkeit der UHPC-Scheiben praktisch ausgeschlossen werden.

Under biaxial compression-tension loading, the reduction of the bearing capacity of the panels without fibres is significantly larger with increasing transverse strain (crack width) than for the panels with combined reinforcement. Probably after the interlock between the individual struts is completely lost due to significant crack opening, the biaxial compression-tension strength of the panels without fibres stabilizes for transverse strains  $\epsilon_1$  larger than about 2 to 3 ‰ at a level of about  $0.5 f_{c,cyl}$ . Because of the smaller crack spacings, the crack widths of the panels with combined reinforcement are still small even at high transverse strains. This explains the lower limit of the biaxial compression-tension strength that may be estimated with  $0.7 f_{c,cyl}$  for these specimens. Since high-strength bar reinforcement with a yield strength  $> 7$  ‰ was used, an influence of plastic steel deformations on the reduction of the bearing capacity of the UHPC panels can practically be excluded.



**Bild 9.** Rissbild bei einer Querdehnung  $\varepsilon_t = 4,5 \text{ ‰}$  (oben) und Bruchbild (unten) von ausschließlich stabstahlbewehrten UHPC-Scheiben (links) und von UHPC Scheiben mit kombinierter Bewehrung (rechts) [9].

**Fig. 9.** Crack pattern at an applied tensile strain  $\varepsilon_t = 4.5 \text{ ‰}$  (top) and failure pattern (bottom) of UHPC-specimens with rebars only (left) and with combined reinforcement (right) [9].

Ein Vergleich der Ergebnisse für UHPC mit denen einer vorangegangenen, sehr umfangreichen Versuchsreihe zur gleichen Problematik bei normalfestem Beton [10] findet sich in [11]. Dort ist auch ein Vorschlag zur Abminderung der Druckfestigkeit des auf Querkzug beanspruchten, gerissenen UHPC angegeben.

A comparison of the results for UHPC with that of a previous, very extensive test series with normal strength concrete on the same topic [10] is given in [11]. There, also a proposal for the reduction of the compressive strength of cracked UHPC under transverse tensile loading can be found.

#### 4 UHPC-Bauteile unter Biegebeanspruchung

#### 4 UHPC Structural Members Subject to Bending Load

##### 4.1 Zielsetzung und Arbeitsprogramm

##### 4.1 Aims of Research and Working Schedule

Die Untersuchungen zum Zugtragverhalten von UHPC-Bauteilen mit einer kombinierten Bewehrung aus Stabstahl und Fasern wurden in diesem Teilprojekt um Versuche zum Biegetragverhalten erweitert. Ziel dieser Versuchsreihe war es, das Biegetragverhalten kombiniert bewehrter Balken aus UHPC hinsichtlich Rissentwicklung und Verformungen sowohl im elastischen als auch im plastischen Bereich des

The analyses regarding tensile behaviour of UHPC-members with combined reinforcement of steel rebars and fibres were carried forward by experimental research on the bending behaviour. Aim of the test series was to identify the crack development and deformation behaviour of combined reinforced UHPC-members in the elastic as well as plastic zone of the steel rebars.

Stabstahls zu untersuchen. Dabei war die Versuchsserie auf einen geringen Faseranteil und eine Faserwirksamkeit unterhalb der Matrixzugfestigkeit ausgelegt, um mögliches Optimierungspotential aufzuzeigen. Einen zweiten Schwerpunkt in diesem Forschungsprojekt bildete die Erweiterung des Wissens über die Wirkung von Stahlfasern und das Verbundverhalten von Stahlfasern und Stabstahl in der UHPC-Matrix.

Das Versuchsprogramm umfasste neben den Referenzversuchen an Prismen und Zylindern zur Bestimmung der Materialeigenschaften von UHPC und von mit Fasern bewehrtem UHPC auch Stahlzugversuche an Bewehrungsstäben. Außerdem wurden zentrische Zugversuche an gekerbten Prismen zur Ermittlung von Spannungs-Rissöffnungs-Beziehungen durchgeführt und eine optische Analyse der dabei entstehenden Rissflächen vorgenommen. Das Verbundverhalten von Stahlfasern wurde durch umfangreiche Faserauszugsversuche und das von Stabstahl durch Versuche zur Ermittlung von Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen getestet. An UHPC-Balken mit verschiedener Bewehrungskonfiguration wurden 4-Punkt-Biegeversuche zur Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens durchgeführt. Eine ausführliche Darstellung des gesamten Forschungsvorhabens findet sich in [12].

#### 4.2 Verbundversuche an Stabstahl

Es wurden Pull-Out-Versuche an kurzen Verbundlängen zur Ermittlung des charakteristischen Verbundverhaltens von warmgewalztem Betonstahl BSt 500 ( $f_{ym}$  ca. 545 bis 570 N/mm<sup>2</sup>) mit einem Durchmesser  $\phi = 12$  mm (SV-1) und von hochfestem gerippten Stabstahl St 1375/1570 mit den Durchmessern  $\phi = 10,5$  mm ( $f_{ym} = 1.365$  N/mm<sup>2</sup>) und  $11,5$  mm ( $f_{ym} = 1.440$  N/mm<sup>2</sup>) (SV-2) durchgeführt. Die zugehörige bezogene Rippenfläche betrug für den Betonstahl  $f_R = 0,056$  und für den hochfesten Stahl  $f_R = 0,020$ . Es wurden Betonwürfel aus einem Feinkorn-UHPC der Mischung M3Q mit der Kantenlänge 12 cm verwendet. Den Proben der Serie SV-1 wurde 1,0 Vol.-% Stahlfasern des Typs  $l_f/d_f = 20$  mm/0,25 mm zugegeben, die Serie SV-2 wurde nicht faserbewehrt. Die Querschnittreduzierung der Betonstäbe in Serie SV-1 wurde durch das Aufbohren der Stäbe über die Verbundlänge hinaus erreicht.

Tabelle 4 beschreibt die verschiedenen Probenkonfigurationen und die Ergebnisse.

To show the potential of reinforcement optimisation, the specimens of the test series were configured with minor fibre content and with fibre efficiency below the tensile strength of the UHPC-matrix. A second key aspect in this particular project is represented by the extension of the knowledge about the properties of the fibre reinforcement and the bond behaviour of steel fibres and steel rebars in the UHPC-matrix.

Besides the usual reference tests on cylinders and prisms to determine the material properties of UHPC and of UHPC reinforced with steel fibres, the test programme also included tensile tests on steel rebars. Furthermore, tensile tests on notched prisms were conducted to identify the stress-crack opening relationship of fibre reinforced UHPC and optical analyses of the so obtained crack surfaces were carried out. The bond behaviour of steel fibres and rebars were investigated by extensive fibre pull-out tests as well as bonding tests, which formed the base of bond stress-slip relationships. 4-point-bending-tests were carried out on UHPC-beams with different configuration of reinforcement to examine the bearing capacity and deformation behaviour. A detailed presentation of this research project and its results can be found in [12].

#### 4.2 Bond Tests on Rebars

To detect the characteristic bond behaviour of hot rolled reinforcing steel bars BSt 500 ( $f_{ym}$  about 545 to 570 MPa) with a diameter of  $\phi = 12$  mm and ribbed high strength steel of grade St 1375/1570 with the diameters  $\phi = 10.5$  mm ( $f_{ym} = 1,365$  MPa) and  $11.5$  mm ( $f_{ym} = 1,440$  MPa) pull-out tests on short bond lengths were conducted. The relative rib area of the reinforcing bars was  $f_R = 0.056$  for BSt 500 and  $f_R = 0.020$  for the high strength steel. Concrete cubes of fine grain UHPC (mixture M3Q) with an edge length of 12 cm were used. The specimens of series SV-1 were reinforced with steel fibres of the type  $l_f/d_f = 20$  mm/0.25 mm with a fibre content of 1.0 % by volume. In contrast, the specimens of series SV-2 had no addition of fibres. The reduction of the cross-section of the steel bars in series SV-1 was realised by drilling a hole beyond the bond length.

Table 4 summarises the different configurations of the specimens and the test results.



**Tab. 4.** Versuchsprogramm und Ergebnisse der Serien SV-1 und SV-2.

**Tab. 4.** Test programme and results of series SV-1 and SV-2.

Name of Specimen	SV-1			SV-2		
	BSt 12-0	BSt 12-5	BSt 12-6	St 10.5	St 11.5	BSt 12
Grade of steel	BSt 500			St 1375/1570		BSt 500
Bar diameter $\phi$ in mm	12			10.5	11.5	12
Steel area $A_s$ in mm <sup>2</sup>	113.1	93.5	84.8	86.5	103.9	113.1
Bond length $l_b$	1.8 $\phi$			1.5 $\phi$		
Concrete cover $c$	4.5 $\phi$			> 5 $\phi$	> 4.5 $\phi$	4.5 $\phi$
Fibre content $\rho_s$ in % by vol.	1.0			0		
Number of specimens	5			5		
Loading direction	parallel to casting direction					
Mean value of the maximum bond stress $\tau_{bm,max}$ in MPa	74.0	64.3	60.1	53.8	53.1	81.2
Slip $s_1$ at maximum bond stress in mm	0.47	0.33	0.47	0.60	1.14	0.17
Mean value of the maximum steel stress $\sigma_{s,max}$ in MPa	530	577	574	323	319	487

Die Verbundversuche der Betonstähle erreichten durchweg höhere Verbundfestigkeiten als die Spannstähle. Die 5 Proben BSt 12 der Serie SV-2 erzielten mit im Mittel  $\tau_{bm,max} = 81,2$  N/mm<sup>2</sup> die größte Verbundfestigkeit. Dagegen zeigten die Proben BSt 12-0 der Serie SV-1, die sich nur in einer größeren Verbundlänge unterscheiden, eine um ca. 9 % geringere Verbundfestigkeit. Der Einfluss der Querschnittreduzierung der Proben BSt 12-5 und BSt 12-6 resultiert in einem Abfall der Verbundfestigkeit um ca. 20 und 26 %. Der Schlupf bei Erreichen der Maximallast betrug im Mittel 0,33 bzw. 0,47 mm für eine Verbundlänge von 1,8  $\phi$  und 0,17 mm für eine Verbundlänge von 1,5  $\phi$ .

Die erreichten Verbundfestigkeiten in den Pull-Out-Versuchen der Spannstähle liegen mit 53,8 und 53,1 N/mm<sup>2</sup> deutlich unter denen der Versuche mit Betonstahl. Der jeweils zugehörige gemittelte Schlupf betrug 0,60 und 1,14 mm. Das Bild 10 zeigt die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen.

### 4.3 Verbundversuche an Fasern

Das Verbundverhalten von Stahlfasern in einer UHPC-Matrix wurde in Ausziehversuchen an einzelnen Fasern, Faserreihen und Fasergruppen bestimmt. Tabelle 5 liefert einen Überblick über die Versuchsparameter.

In the bonding tests, the hot rolled reinforcing steel bars reached consistently higher bond strengths than the high strength steel bars. By taking the mean of 5 test results, the samples BSt 12 of series SV-2 showed the highest bond strength ( $\tau_{bm,max} = 81.2$  MPa). In contrast, the samples BSt 12-0 of series SV-1, which differ only by a greater bond length, reached a by 9 % lesser bond strength. The reduction of the cross-sections of the samples BSt 12-5 and BSt 12-6 shows its influence by a decrease of bond strength by 20 and 26 %. The mean slip when reaching the maximum load adds up to 0.33 and 0.47 mm for a bond length of 1.8  $\phi$  and 0.17 mm for a bond length of 1.5  $\phi$ .

The pull-out tests of high strength steel bars achieved bond strengths of 53.8 and 53.1 MPa, which lie clearly beneath the results of the hot rolled steel bars. The related mean slip added up to 0.60 and 1.14 mm. Figure 10 shows the bond stress-slip relations.

### 4.3 Bond Tests on Steel Fibres

The bond behaviour of steel fibres in a UHPC-matrix was determined by pull-out tests on single fibres, fibre rows and fibre groups. Table 5 gives a survey of the test parameters.

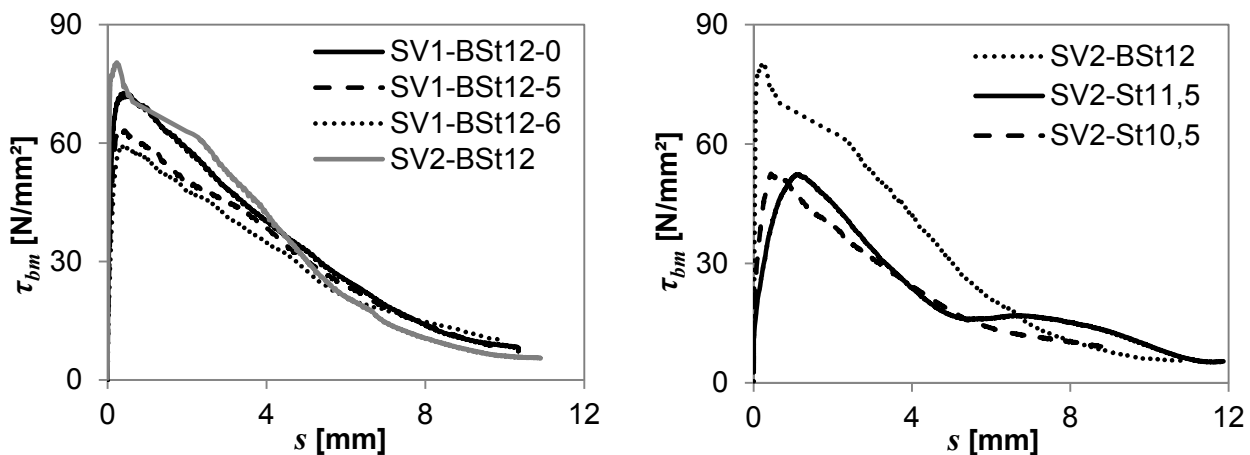
UHPC of type M2Q(b), M3Q(a) and M3Q(b) was used. The fibres of the single fibre and fibre row tests were set in concrete at one end with

Zur Anwendung kamen die UHPC-Mischungen M2Q(b), M3Q(a) und M3Q(b). Die Fasern der Einzelfaser- und Faserreihenversuche wurden an einem Ende mit den in der Tabelle 5 angegebenen Verbundlängen einbetoniert und in manuell gesteuerten Versuchen aus der Matrix herausgezogen.

Für die Versuche zu Fasergruppen wurden die Fasern zunächst in eine Prismenhälfte einbetoniert und in einem zweiten Betoniervorgang die fehlende Prismenhälfte anbetoniert (Bild 11). Diese Prismen wurden in zentrischen Zugversuchen in Anlehnung an Bild 2 getestet.

the bond length given in Table 5 and pulled out of the matrix in manually regulated tests.

For the specimens of the fibre group tests first one half was casted against a foamed polystyrene block, which held the fibres in different angles. In a second casting the prism was finally casted (Figure 11). The prisms were tested under tensile load like shown in Figure 2.



**Bild 10.** Gemittelte Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen der Serien SV-1 (links) und SV-2 (rechts) [12].  
**Fig. 10.** Average bond stress-slip relationships of series SV-1 (left) and SV-2 (right) [12].

**Tab. 5.** Überblick über die Versuchsparameter.  
**Tab. 5.** Survey of test parameters.

	Single fibre	Fibre row	Fibre group
Fibre geometry $l_f/d_f$ in mm/mm	50/0.15		17/0.15, 20/0.25, 30/0.385
Compressive strength in MPa	123 to 159		156 to 185
Bond length $l_b$ in mm	3 / 5 / 8.5	5 / 8 / 10 / 15 / 20	7 / 8.5 / 10 / 11 / 15
Inclination to loading direction in °	0 / 15 / 30 / 45 / 60		

Bei den Versuchen an Einzelfasern zeigte sich das Versagen immer durch Faserauszug. Die Ergebnisse unterlagen starken Streuungen, vor allem bei den Versuchen mit einer 3 mm langen Verbundlänge hatten Störfaktoren und Ungenauigkeiten in der Herstellung einen großen Einfluss.

Insgesamt kann für alle drei Versuchsserien dennoch abgeleitet werden, dass bei steigender Verbundlänge und einer Zunahme des Neigungswinkels der Faser zur Lastrichtung eine höhere Last übertragen werden konnte. Beim Vergleich der zur maximalen Last gehörenden mittleren Verbundspannung zeigt sich, dass mit

In the single fibre tests the failure always occurred as pull out of fibres. The results were subject to great scatter, especially in the tests with bond length of 3 mm disturbing factors and inaccuracies got strong influence.

All in all, for the three test series it can still be derived that an increasing bond length as well as an ascending inclination of the fibre(s) to the loading direction resulted in the transfer of higher loads. When comparing the mean bond stresses belonging to the maximum loads it can be shown, that an ascending inclination of the fibre(s) to the loading direction causes a growth of the mean bond stress of about 50 to 250 %.

steigendem Faserwinkel die mittlere Verbundspannung um 50 bis 250 % anstieg. Bei einer kurzen Verbundlänge  $l_b$  hat der Neigungswinkel einen größeren Einfluss auf das Verbundverhalten als bei einer größeren Verbundlänge. Es ließ sich beobachten, dass die Verbundenergie  $G_b$  zunimmt, wenn Verbundlänge und Neigungswinkel zunehmen.

Looking at the length of the embedding  $l_b$ , the inclination of the fibre(s) to the loading direction had a greater influence on the bond behaviour on shorter lengths compared to longer lengths. It could be observed, that the bond energy  $G_b$  is increasing, when bond length and inclination are growing.



Bild 11. Schalung und Probekörper der Fasergruppen [12].

Fig. 11. Formwork and specimens for fibre group tests [12].

Die Proben aus Faserreihen versagten ebenfalls immer durch Faserauszug. Die Streuung der Ergebnisse war dagegen weniger stark ausgeprägt. Mit Ausnahme der unter  $60^\circ$  einbetonierten Faserreihe bestätigen die Ergebnisse die aus den Versuchen an Einzelfasern gewonnene Erkenntnis, dass zunehmende Verbundlänge und Neigung der Faser einen positiven Einfluss auf die übertragbare Last besitzen.

The tested samples with fibre rows also always failed due to pull out of the fibres. But, the scatter of the tests results took less shape. With exclusion of the fibre row with an inclination of  $60^\circ$  between the fibre and loading direction, all results approved the result obtained from the single fibre tests, that an increasing bond length and inclination have an elevating influence on the transferable load.

Die Versuche mit Fasergruppen bestätigten tendenziell die zuvor beschriebenen Zusammenhänge. Es zeigte sich allerdings auch, dass bei großen Faserneigungen nicht alle Fasern gleichmäßig aktiviert wurden, so dass es zum Reißen der stärker aktivierten Fasern kam. Dies ist ein Indiz dafür, dass mit der Faserneigung auch die Verbundfestigkeit steigt und zum Faserreißen führen kann.

The fibre group tests confirmed the abovementioned relations by trend. However, it also appeared, that the fibre activation didn't take place evenly in tests with great inclinations between fibre and load direction. This caused a rupture of already high activated fibres and is an evidence for the cumulative effect of the inclination on the increase of bond strength, so that rupture of fibre can occur.

#### 4.4 Untersuchungen an faserbewehrtem UHPC

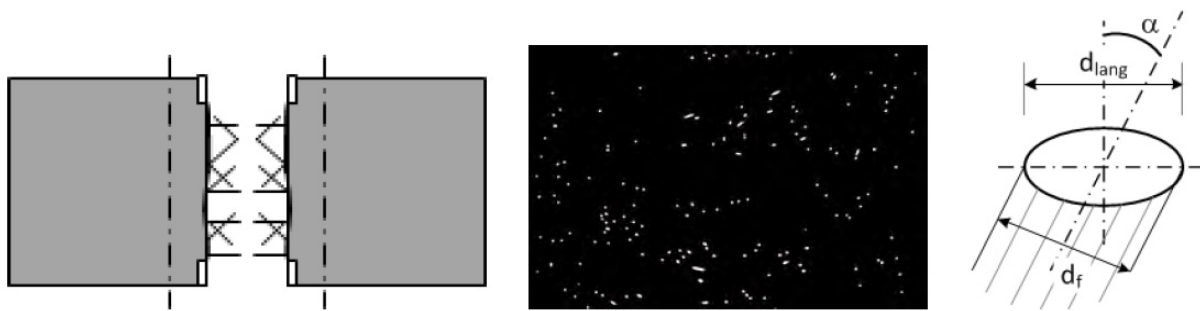
Die Versuche an faserbewehrtem UHPC umfassten weggeregelt Druckversuche an Zylindern mit den Abmessungen  $d/h = 15 \text{ cm}/30 \text{ cm}$  bzw.  $10 \text{ cm}/20 \text{ cm}$ , Biegezugversuche an Prismen mit den Abmessungen  $4 \text{ cm}/4 \text{ cm}/16 \text{ cm}$  und zentrische Zugversuche an gekerbten Prismen. Die Rissflächen der Proben aus diesen Zugversuchen wurden auch einer optischen Analyse zur Bestimmung der Faserorientierung unterzogen. Die Versuchskörper bestanden aus der UHPC-Mischung M2Q(a) und M3Q(b) und waren mit glatten Fasern  $l_f/d_f = 17 \text{ mm}/0,15 \text{ mm}$ ,  $20 \text{ mm}/0,25 \text{ mm}$  und Fasern mit Endhaken  $30 \text{ mm}/0,385 \text{ mm}$  mit verschiedenen Fasergehalten bewehrt (Tabelle 6).

#### 4.4 Investigation on Fibre Reinforced UHPC

The tests on fibre reinforced UHPC covered displacement controlled compressive tests on cylinders with the dimensions of  $d/h = 15 \text{ cm}/30 \text{ cm}$  and  $10 \text{ cm}/20 \text{ cm}$ , respectively, flexural tensile tests on prisms with the dimension of  $4 \text{ cm}/4 \text{ cm}/16 \text{ cm}$  and tensile tests on notched prisms. The crack surfaces of the latter specimens underwent optical analyses of the crack surfaces to determine the fibre orientation. The specimens were made of UHPC, type M2Q(a) and M3Q(b), and were reinforced with smooth fibres of  $l_f/d_f = 17 \text{ mm}/0.15 \text{ mm}$  and  $20 \text{ mm}/0.25 \text{ mm}$  as well as hooked fibres  $30 \text{ mm}/0.385 \text{ mm}$  with different fibre contents (Table 6).

Versuchsaufbau und Durchführung der zentrischen Zugversuche stimmen im Wesentlichen mit den Zugversuchen nach Bild 2 überein.

The test setup and test procedure of the tensile tests are in agreement with the tensile tests according to Figure 2.



**Bild 12.** Schnittverläufe am Prisma, Schwarz-Weiß-Bild des Querschnitts und Faserwinkel nach Markovic [12].

**Fig. 12.** Cutting lines on the prism, black-white-pic of the cross-section and fibre inclination after Markovic [12].

Zur optischen Analyse wurden die Rissflächen der bereits auf Zug getesteten Prismen beidseits geschliffen und poliert. Dann erfolgte eine Fotoaufnahme, anhand der mit der Software ElliFaserSteel [14] die Anzahl der Fasern und deren Ellipsenhalmesser ermittelt und geometrisch ausgewertet wurden (Bild 12). Aufgrund der starken Schädigung war eine optische Auswertung der Proben mit den Fasern  $l_f/d_f = 30 \text{ mm}/0,385 \text{ mm}$  nicht möglich.

Die Ergebnisse der Prismen der Serie UF1, die im zentrischen Zugversuch außerhalb der Kerbe oder in der Klebefläche versagten, wurden in der Ergebnisdarstellung nicht berücksichtigt. Bei den Prismen der Serie UF2 mit Fasern  $l_f/d_f = 30 \text{ mm}/0,385 \text{ mm}$  zeigte sich ein Abtrennen der Matrix vor allem im Randbereich und aufgrund der geringen absoluten Faseranzahl im Querschnitt eine ungleichmäßige Rissöffnung und Verkippung der Prismenhälften gegeneinander. Die Ergebnisse der zentrischen Versuche können Tabelle 6 entnommen werden.

Vergleicht man in Bild 13 die Ergebnisse für die Faser  $l_f/d_f = 20 \text{ mm}/0,25 \text{ mm}$  in den Serien UF1 und UF2, erkennt man, dass die Verbindungslinien annähernd parallel verlaufen. Die Differenz kann auf den Einfluss der Betonqualität zurückgeführt werden. Der qualitative Verlauf der Kurven in Bild 13 zeigt zunächst einen geringen Anstieg der Faserwirkung. Im Bereich zwischen 0,3 und 0,9 Vol.-% stellt sich der Anstieg der Faserwirksamkeit sehr steil dar, um im weiteren Verlauf wieder unterproportional zuzunehmen.

Aus der optischen Faseranalyse konnte die Faserorientierung relativ unabhängig vom Fasergehalt, Fasertyp und UHPC-Mischung zu  $\eta = 0,8$  bestimmt werden. Die ermittelte Faseranzahl wuchs mit steigendem Fasergehalt erwartungsgemäß linear an.

Both opposite crack surfaces of the prisms were grinded and polished in preparation of the optical analysis. Then a photo was taken from the surfaces under special boundary conditions. The software ElliFaserSteel [14] was used to identify the number of fibres and their ellipse radiuses, and to interpret them geometrically (Figure 12). Due to the great damage, an optical analysis of the specimens with hooked fibres  $l_f/d_f = 30 \text{ mm}/0.385 \text{ mm}$  was not possible.

In the tensile tests the prisms of the series UF1 failed outside of the notch or in the glued surface between prism and steel block. These test results were not considered for the representation of the findings. The prisms of series UF2 with hooked fibres  $l_f/d_f = 30 \text{ mm}/0.385 \text{ mm}$  showed a blow up of the matrix especially in the border area and, because of the absolute small amount of fibres in the cross-section, an uneven crack opening and tipping of the prism halves against each other. The results of the tensile tests can be taken from Table 6.

If the test results of the series UF1 and UF2 for specimens with fibres  $l_f/d_f = 20 \text{ mm}/0.25 \text{ mm}$  are compared in Figure 13, it is indicated, that the connecting lines run almost parallel. The difference between the lines can be traced back to the influence of the concrete quality. The qualitative gradient of the curves in Figure 13 shows a light increase of the fibre efficiency. In a range of fibre content between 0.3 and 0.9 % by volume there is a steep ascent, which in the further progress grows only under proportional.

From the optical analyses the fibre orientation could be determined as  $\eta = 0.8$ , relatively independent from fibre content, fibre type, and UHPC-mixture. The identified amount of fibres increased as expected with a rising fibre content.

Tab. 6. Überblick über Versuchsparameter und Ergebnisse.  
Tab. 6. Survey of test parameter and results.

Series	Fibre geometry	Fibre content	Direct tensile test		Optical analyses		Flexural tensile test	
	$l_f/d_f$	$\rho_{f,nom}$	$\sigma_{cf,cr}^i$	$\sigma_{cf0}$	Number of fibres	$\eta$	$\sigma_{cf,cr}$	$\sigma_{cf0}$
	mm/mm	% by vol.	MPa	MPa			MPa	MPa
UF1-F17-0.3	17/0.15	0.3	6.0	1.9				
UF1-F17-0.5	17/0.15	0.5	8.6	3.0				
UF1-F17-0.7	17/0.15	0.7	6.0	8.4	258.8	0.77		
UF1-F20-0.3	20/0.25	0.3	6.5	2.3	56.3	0.78		
UF1-F20-0.5	20/0.25	0.5	6.8	5.3	101.6	0.77		
UF1-F20-0.7	20/0.25	0.7	5.3	6.7	108.4	0.83		
UF2-F20-0.3	20/0.25	0.3	6.1	0.8	46.6	0.77	8.6	10.8
UF2-F20-0.5	20/0.25	0.5	5.7	4.0	81.7	0.80	11.3	17.9
UF2-F20-0.9	20/0.25	0.9	6.8	6.6	147.9	0.82	13.8	23.4
UF2-F20-1.5	20/0.25	1.5	6.6	10.3	262.5	0.80	14.1	26.1
UF2-F30-0.3	30/0.385	0.3	5.0	3.2	7.7			
UF2-F30-0.5	30/0.385	0.5	5.6	5.4	15.6			
UF2-F30-0.9	30/0.385	0.9	5.7	7.5	30.9			
UF2-F30-1.5	30/0.385	1.5	7.1	9.6	39.8			

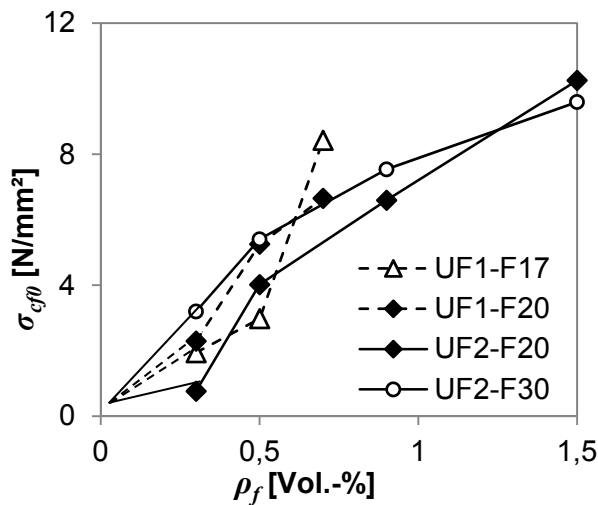


Bild 13. Mittlere Faserwirksamkeit über nominellen Fasergehalt [12].  
Fig. 13. Mean fibre efficiency over nominal fibre content [12].

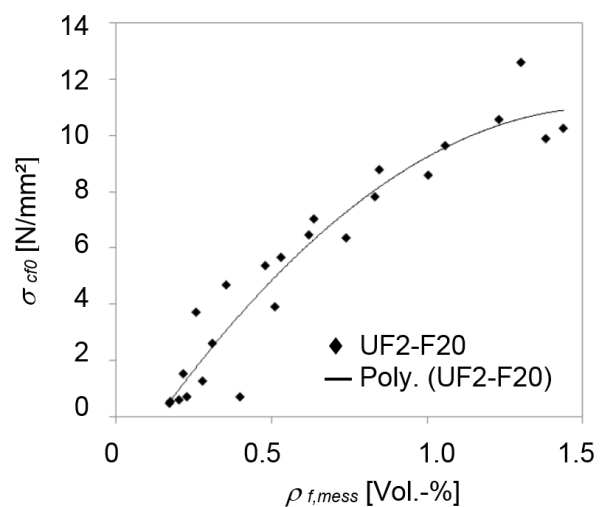


Bild 14. Einzelwerte der Faserwirksamkeit über aus optischer Auswertung ermitteltem, tatsächlichem Fasergehalt [12].  
Fig. 14. Single values of fibre efficiency over effective fibre content, derived from optical analysis [12].

In Bild 14 sind die Faserwirksamkeiten der Versuche mit Fasern  $l_f/d_f = 20 \text{ mm}/0,25 \text{ mm}$  über den aus optischer Analyse ermittelten zugehörigen, tatsächlichen Fasergehalt  $\rho_{f,mess}$  aufgetragen. Aus den Einzelergebnissen ist eine Regressionsgerade mit Polynomansatz gebildet worden. Insgesamt zeigt sich erwartungsgemäß

Figure 14 shows fibre efficiencies of the tests from specimens with fibres  $l_f/d_f = 20 \text{ mm}/0.25 \text{ mm}$  over the effective fibre content  $\rho_{f,mess}$ , gained from the optical analyses. From the single values a regression line based on a polynomial approach was formed. Over all,

ein, wenn auch nicht proportionaler, Anstieg der Faserwirkung bei steigendem Fasergehalt.

Die Druckversuche an Zylindern lieferten für die Serie UF1 Druckfestigkeiten im Bereich von 143,5 bis 155,8 N/mm<sup>2</sup> und Ergebnisse für den E-Modul im Bereich von 44.293 bis 48.042 N/mm<sup>2</sup>. Für die Serie UF2 ergaben die gleichen Versuche Druckfestigkeiten von 182,2 bis 205,3 N/mm<sup>2</sup> und E-Module von 46.663 bis 49.061 N/mm<sup>2</sup>. Aus den Biegezugversuchen an ungekerbten Prismen der Serie UF2 konnten mittlere Biegezugfestigkeiten von 10,8 bis 26,1 N/mm<sup>2</sup> ermittelt werden.

#### 4.5 Versuche an UHPC-Biegebalken mit kombinierter Bewehrung

Es wurden zehn 4-Punkt-Biegeversuche an Balken mit den veränderlichen Parametern Balkenhöhe, Fasertyp, Fasergehalt, Stabstahlsorte und Stabstahlgehalt durchgeführt. Die Parameterkombination bestimmte die Bezeichnung der Versuchskörper, vgl. Tabelle 7.

**Tab. 7.** Versuchsprogramm und Versuchsergebnisse.  
**Tab. 7.** Test programme and test results.

Specimen	Cross section	Number / Diameter/ Grade of reinforcing bars	Fibres	Fibre content	Reinforcement ratio	M <sub>u</sub>
	<i>b/h/d</i>	<i>-/φ/-</i>	<i>l<sub>f</sub>/d<sub>f</sub></i>	<i>ρ<sub>f</sub></i>	<i>ρ<sub>s,geo</sub></i>	
	cm	-/mm/-	mm/mm	% by vol.	%	kNm
H15-2St-F20-0.5	15/15/11.5	2 φ 10.5 St	20/0.25	0.5	2.81	31.8
H15-2St-F30-0.5	15/15/11.5	2 φ 10.5 St	30/0.385	0.5	1.00	30.1
H15-3St-F0	15/15/11.5	3 φ 11.5 St	-	-	1.81	40.2
H15-3St-F20-0.5	15/15/11.5	3 φ 11.5 St	20/0.25	0.5	1.81	50.1
H15-3BSt-F20-0.5	15/15/11.5	3 φ 12 BSt	20/0.25	0,5	1.97	26.6
H35-3St-F0	15/35/31.5	3 φ 11.5 St	-	-	0.63	138
H35-3St-F20-0.5	15/35/31.5	3 φ 11.5 St	20/0.25	0.5	0.63	167
H35-3St-F20-1.5	15/35/31.5	3 φ 11.5 St	20/0.25	1.5	0.63	179
H35-5St-F20-0.5	15/35/30.5	3 φ 11.5 +2 φ 10.5 St	20/0.25	0.5	1.03	223
H35-8BSt-F20-0.5	15/35/30.5	8 φ 12 BSt	20/0.25	0.5	1.98	174

Note: St = St1375/1570, BSt = BSt 500S

Die Balken besaßen eine Gesamtlänge von 200 cm und einen Rechteckquerschnitt mit einer Breite von 15 cm sowie eine Höhe von 15 oder 35 cm (Bild 15). Zusätzlich zur durchgehenden unteren Längsbewehrung wurden außerhalb des Messbereiches eine ausreichende Querkraftbewehrung und eine konstruktive obere Längsbewehrung angeordnet. Die Betondeckung an der Balkenunterseite betrug 30 mm.

it shows an expected, but not proportional, rising of the fibre efficiency at ascending fibre content.

The compressive tests on cylinders provided for the series UF1 compressive strength in a range from 143.5 to 155.8 MPa and E-Modulus from 44,293 to 48,042 MPa. In similar tests for the series UF2 compressive strength in a range from 182.2 to 205.3 MPa and E-Modulus from 46,663 to 49,061 MPa could be found. In flexural tensile tests on unnotched prisms of the series UF2 mean flexural strength from 10.8 to 26.1 MPa could be determined.

#### 4.5 Tests on UHPC-Beams with a Combined Reinforcement

Ten 4-point-bending tests were conducted, with the changing parameter height of the beam, fibre type, fibre content, steel rebar type, and steel rebar content, see Table 7.

The beams had a length of 200 cm and a rectangular cross-section with a width of 15 cm and a height of 15 and 35 cm, respectively (Figure 15). Additionally to the continuous longitudinal reinforcement at the bottom of the beam, there was adequate shear reinforcement and a structural upper longitudinal reinforcement set outside the monitoring area. The concrete cover was 30 mm for the bottom side.

Es wurde ein Feinkorn-UHPC der Mischung M3Q (b) verwendet. Die Druckfestigkeit der einzelnen Chargen wurde in Referenzversuchen zu 197,3 bis 210,5 N/mm<sup>2</sup> und der E-Modul zu 45.338 bis 51.346 N/mm<sup>2</sup> ermittelt.

Als Fasern wurden im Regelfall runde, gerade Fasern  $l_f/d_f = 20 \text{ mm}/0,25 \text{ mm}$ , als Variation auch Fasern mit Endhaken  $l_f/d_f = 30 \text{ mm}/0,385 \text{ mm}$  (siehe Tabelle 7) zugegeben. Die aus zentrischen Zugversuchen an gekerbten Prismen ermittelte mittlere Faserwirksamkeit der Faserbetone mit Fasern  $l_f/d_f = 20 \text{ mm}/0,25 \text{ mm}$  erreichte  $\sigma_{cf0} = 4,0 \text{ N/mm}^2$  bei einem Fasergehalt von 0,5 Vol.-% und bei einem Fasergehalt von 1,5 Vol.-%  $\sigma_{cf0} = 10,3 \text{ N/mm}^2$ . Bei Fasern mit Endhaken  $l_f/d_f = 30 \text{ mm}/0,385 \text{ mm}$  konnte eine Faserwirksamkeit von  $\sigma_{cf0} = 5,4 \text{ N/mm}^2$  bei 0,5 Vol.-% bestimmt werden.

Als Stabstahlbewehrung wurde im Regelfall profilierter hochfester Stahl mit  $\phi = 10,5 \text{ mm}$  und  $\phi = 11,5 \text{ mm}$  eingesetzt. Als Variation wurde zudem Betonstahl BSt 500 S mit dem Durchmesser  $\phi = 12 \text{ mm}$  verwendet (siehe Tabelle 7).

Die Biegeversuche wurden in einer hydraulisch gesteuerten Prüfmaschine mit einer Kapazität von 6,3 MN durchgeführt. Die Versuchsanordnung ist in Bild 15 dargestellt. Im Bereich annähernd konstanter Momentenbeanspruchung wurde ein Messbereich von 70 cm Länge definiert. Zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Verformungen wurden 18 induktive Wegaufnehmer eingesetzt. Während der Versuche wurden die eingeleitete Gesamtkraft, der Maschinenweg, die horizontalen Längenänderungen in der Zug- und Druckzone des Balkens, die Durchbiegungen und die horizontalen Verformung am Balkenende aufgezeichnet.

Neben den kontinuierlichen Messungen wurden die Versuche auf verschiedenen Kraftniveaus gestoppt, um Risse auf zwei Messstrecken an der Unterseite des Balkens in jeweils unterschiedlichen Farben zu markieren und mit einer digitalen Mikroskopkamera aufzunehmen. Auf diese Weise konnten nach dem Versuch zu jedem Stopp die Rissanzahl und die Rissabstände ermittelt werden. Weiterhin wurde auf den Seitenflächen innerhalb des Messbereichs der Rissverlauf über die Balkenhöhe angezeichnet. Eine festgelegte Farbfolge ermöglichte die nachträgliche Bestimmung und Zuordnung der Risstiefe, der Rissanzahl und der Rissabstände an der Unterkante des Balkens zu jedem Stopp.

A fine-coarse UHPC of type M3Q(b) was used. The compressive strength of every mixture was determined in reference tests in a range from 197.3 to 210.5 MPa and the E-modulus in a range from 45,338 to 51,346 MPa.

In general, smooth fibres  $l_f/d_f = 20 \text{ mm}/0.25 \text{ mm}$  and as a variation hooked fibres  $l_f/d_f = 30 \text{ mm}/0.385 \text{ mm}$  (see Table 7) were applied. Tensile tests on notched prism were executed and generated fibre efficiencies of the concrete with fibres  $l_f/d_f = 20 \text{ mm}/0.25 \text{ mm}$  of  $\sigma_{cf0} = 4.0 \text{ MPa}$  with fibre content of 0.5 % by volume and  $\sigma_{cf0} = 10.3 \text{ MPa}$  with a fibre content of 1.5 % by volume. For the concrete with hooked fibres  $l_f/d_f = 30 \text{ mm}/0.385 \text{ mm}$  a fibre efficiency of  $\sigma_{cf0} = 5.4 \text{ MPa}$  with a fibre content of 0.5 % by volume could be derived.

In general, ribbed high strength steel was used as reinforcing bars with a diameter of  $\phi = 10.5 \text{ mm}$  and  $\phi = 11.5 \text{ mm}$ . As a variation hot rolled reinforcing steel BSt 500 S with a diameter of  $\phi = 12 \text{ mm}$  was used (see Table 7).

The bending tests were conducted in a hydraulically controlled testing machine with a loading capacity of 6.3 MN. The test set up is outlined in Figure 15. In the area of a nearly constant bending load a monitoring area of a length of 70 cm was defined. For continuous recording of the deformations 18 LDVT's were used. During the tests, the induced total force, the machine displacement, the horizontal deformations of the compressive and tensile zone of the beam, the vertical deformation of the beam, and the horizontal deformation of the ends of the beam were recorded.

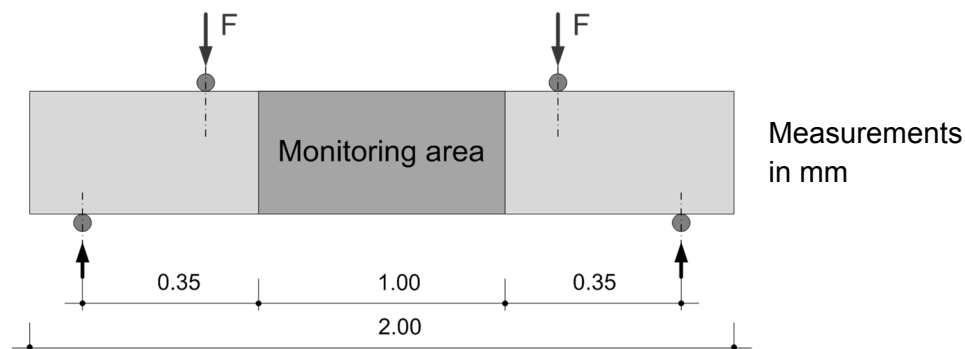
In addition to the continuous measuring the testing was stopped at certain levels of force to mark cracks on the down side of the beams with different colours and to take a photo of each crack with a microscope camera. By this means, the number of cracks and the crack distances could be related to the particular stop after the test was over. Furthermore, the crack development was marked on the side surface of the monitoring area. A defined order of colours allowed the subsequent detection of the crack depth, numbers of cracks, and crack distances at the bottom side of the beam related to every stop.

The tests were conducted using displacement control with a machine speed of 0.005 mm/s to 0.05 mm/s. The force level, at which the test was stopped, was orientated on the integral prolongation at the bottom side of the beam. So every bending test was stopped when the lower mean

Die Versuche wurden weggesteuert mit Maschinengeschwindigkeiten von 0,005 mm/s bis 0,05 mm/s gefahren. Die Laststufen, bei denen die Maschine angehalten wurde, orientierten sich an der integralen Dehnung an der Balkenunterseite. So wurde jeder Biegeversuch angehalten, wenn die untere mittlere Dehnung die Werte 0,5 ‰, 1,5 ‰, 4,0 ‰ und bei hochfester Längsbewehrung 8,0 ‰ erreicht hatte. Daneben wurden nach Bedarf Stopps an weiteren Laststufen zwischengeschaltet. Im plastischen Verformungsbereich wurden nur die Rissbreiten der lokalisierten Risse auf der Balkenseite in Höhe der Bewehrung gemessen. Die Versuche endeten entweder mit Reißen der Bewehrung oder wurden durch Betondruckversagen mit starkem Lastabfall im Nachbruchbereich beendet. Nach dem Versuch wurden die Rissabstände an den beiden unteren Messstrecken und an der Unterkante der Seitenflächen gemessen. Dazu wurde die Risstiefe der Hauptrisse erfasst. Die Rissbreiten während des Versuchs wurden den Rissfotos entnommen.

prolongation reached the values of 0.5 %, 1.5 %, and 4.0 % as well as, for the high strength reinforcement, 8.0 %. Besides this, there were more stops at different load steps when needed. In the plastic deformation range only the crack width of the localised cracks in the height of the reinforcement were measured. The bending tests ended either with rupture of the reinforcement or failure of the compression zone connected with a steep load drop. After the test the crack distances at the two measuring tracks and at the lower edge of the sides were recorded. Additionally the crack depth of the main cracks was determined. The development of the crack width was observed during the test by photographs.

The failure of the beams was marked as tensile failure with distinct crack localisation and ruptures of reinforcing bars and always came along with a failure of the compression zone. The reason for the latter lies in a nearly linear-elastic material behaviour of UHPC, which results in high stress values at the compression edge.



**Bild 15.** Versuchskörper und Versuchsaufbau nach [12].

**Fig. 15.** Test specimen and test set up after [12].

Das Versagen der Balken war gekennzeichnet als Zugversagen mit ausgeprägter Risslokalisierung und Reißen des Bewehrungsstahls und war immer auch begleitet von einem Versagen der Druckzone. Grund für letzteres ist das bis zum Bruch annähernd linear-elastische Materialverhalten des UHPC, welches in großen Spannungswerten am Bauteilrand resultiert.

Die Bilder 16 und 17 zeigen die Ergebnisse der Versuche für Balkenhöhe von 15 bzw. 35 cm. Die Bruchmomente sind in Tabelle 7 angegeben.

Aufgrund der gewählten Bewehrungskonfigurationen erlauben die Ergebnisse Aussagen zum Einfluss des Fasergehalts, Fasertyps, Bewehrungsgrads, Stahltyps und der Bauteilhöhe. Eine ausführliche Darstellung der Einzelergebnisse findet sich in [12].

Figures 16 and 17 show the results of the tests separated for beam height of 15 and 35 cm, respectively. The ultimate bending moments are listed in Table 7.

Because of the chosen configurations of reinforcement, the results allow conclusions about the influence of fibre content, fibre type, reinforcement ratio, type of reinforcing steel bars and height of the member. An extensive presentation of the single results is arranged in [12].



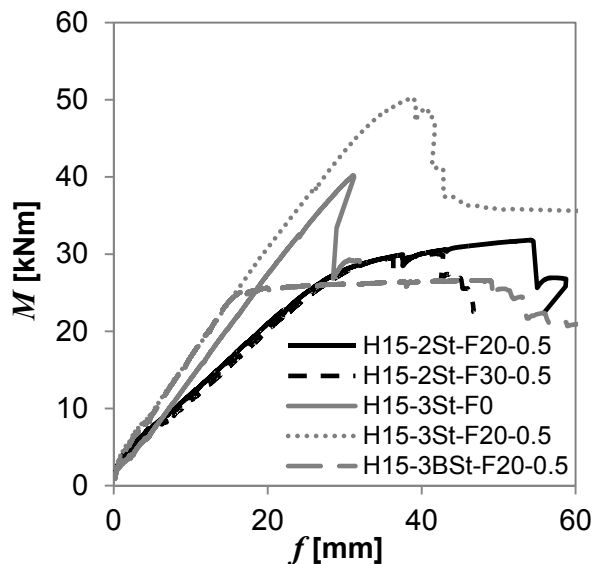


Bild 16. Moment-Durchbiegungslinie der Balken H15.

Fig. 16. Moment-deflection-line of beams H15.

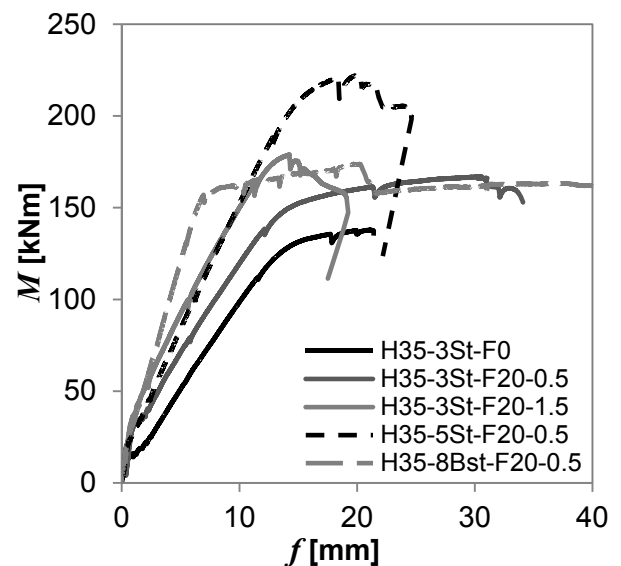


Bild 17. Moment-Durchbiegungslinie der Balken H35.

Fig. 17. Moment-deflection-line of beams H35.

## 5 UHPC-Bauteile unter Querkraftbeanspruchung

### 5.1 Zielsetzung und Arbeitsprogramm

Für ein umfassendes Verständnis des Tragverhaltens von UHPC in biege- und querkraftbeanspruchten Bauteilen wurden in der dritten Förderperiode Untersuchungen zum Verhalten von Bauteilen aus UHPC mit kombinierter Bewehrung aus Stabstahl und Fasern unter Querkraftbeanspruchung durchgeführt.

Dabei wurden schlaff bewehrte und stark profilierte Balken für verschiedene Querkraftbewehrungsgrade und Fasergehalte zur Bestimmung der Tragfähigkeit und Schubrissentwicklung durchgeführt. Aus den Versuchen wurden Erkenntnisse über das lastabhängige Auftreten von Schubrissen, das Einstellen der Schubrisswinkel, die Entwicklung von Rissbreiten im Verlauf des Versuchs sowie der Einfluss der Schubrisse auf die Bruchtragfähigkeit gewonnen. Aus ebenfalls durchgeführten zentrischen Zugversuchen an gekerbten Prismen wurden Spannungs-Rissöffnungs-Beziehungen und zugehörige Faserwirksamkeit ermittelt.

### 5.2 Versuchsprogramm

Es wurden Balken mit einer Länge von 210 cm und einem rechteckförmigen Querschnitt mit einem Verhältnis Breite/Höhe von 20 cm/32 cm hergestellt. Das Querkraftversagen sollte sich in einem Untersuchungsbereich auf der rechten Seite des in Bild 18 dargestellten Balkens einstellen. Hier war der Querschnitt durch Verdrängungskörper beim Betonieren doppel-T-förmig

## 5 UHPC Beams subject to Shear Loading

### 5.1 Aims of Research and Working Schedule

For a broad understanding of the structural behaviour of UHPC under bending and shear loading, research on the behaviour of UHPC-members with a combined shear reinforcement of steel bars and steel fibres under shear loading was undertaken.

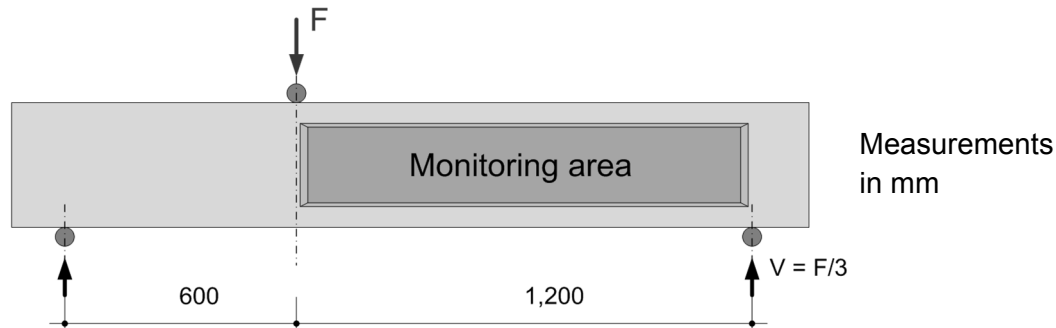
Therefore, conventionally reinforced and strongly profiled beams with different shear reinforcement ratios and fibre contents were used to examine the load bearing capacity and shear crack development. From the tests, findings to the load induced appearance of shear cracks, the adjustment of the compression strut inclination, the development of crack width during the test, as well as the influence of the shear cracks on the ultimate load bearing capacity were gathered. Also, tensile tests on notched prisms were carried out to detect stress-crack opening-relationships and the corresponding fibre efficiency.

### 5.2 Test Programme

Beams with a length of 210 cm and a rectangular cross-section with a width to height ratio of 20 cm/32 cm were produced. The shear failure was supposed to occur in a monitoring area on the right hand side of the beam drafted in Figure 18. In this monitoring area the cross-section was reduced to an I-shape by using displacers while casting the beams. The cross-section in the reduced area was made up of upper and lower

reduziert hergestellt worden. Der Untersuchungsbereich besaß eine Stegdicke von 3 cm. Unter- und Obergurt wiesen hier eine mittlere Dicke von 5,5 cm (Bild 18) auf. Die Länge des Untersuchungsbereiches betrug 120 cm, die Höhe 20 cm (Bild 18).

chord with a mean thickness of 5.5 cm and a web with a thickness of 3 cm (Figure 18). The length of the monitoring area was 120 cm, the height 20 cm.



**Bild 18.** Versuchsaufbau [13].

**Fig. 18.** Test setup [13].

Die Versuchskörper dieses Forschungsprojekts bestanden aus der Feinkornmischung M3Q. Für die Grundbewehrung (vgl. Bild 19) wurde Stabstahl BSt 500 S ( $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$ ) verwendet. Die Biegezugbewehrung bestand aus 4  $\phi 25 \text{ mm}$ . Außerhalb des Untersuchungsbereiches wurden Bügel mit einem Durchmesser von  $\phi = 8 \text{ mm}$  in einem Abstand von 100 mm angeordnet. In den Gurten wurde eine Querbewehrung eingebaut. Die Größe der Biegezugbewehrung ergab sich aus der Forderung, ein Biegeversagen auch für Balken mit kombinierter Querkraftbewehrung aus Stabstahl und Fasern auszuschließen.

Bei der Herstellung ergaben sich für die Balken der ersten Betonagen, Q1-1, Q1-F1-1, Q1-B1-1 und Q1-F1-B1-1, ungünstige Temperaturbedingungen während des Aushärtens, die in eine starke Rissneigung im Untersuchungsbereich aufgrund von Schwinden und Temperaturunterschied resultierten. Von diesen vertikal über den Steg im Untersuchungsbereich laufenden Rissen waren die Balken ohne Faserbewehrung stärker in Rissanzahl und Rissbreite geprägt als die Balken mit Faserbewehrung.

Um den Traganteil der jeweiligen Querkraftbewehrungsart und ihre Interaktion bei kombinierter Anordnung zu identifizieren, wurden UHPC-Balken mit verschiedener Querkraftbewehrung hergestellt. Die Bügelstäbe hatten einen Durchmesser von  $\phi = 5 \text{ mm}$  und wurden in einem Abstand von 105 mm angeordnet. Sie zeigten in Zugversuchen eine Fließgrenze von  $694 \text{ N/mm}^2$ . Die Stahlfasern besaßen einen Durchmesser  $d_f = 0,175 \text{ mm}$  und eine Länge von 13 mm. Ihre Zugfestigkeit wird vom Hersteller mit ca.  $2.500 \text{ N/mm}^2$  angegeben. Sie wurden

The specimens of this project were made of a fine-grain UHPC of type M3Q. The basic reinforcement (see Figure 19) consisted of conventional steel bars of grade BSt 500 S ( $f_y = 500 \text{ MPa}$ ). The longitudinal reinforcement was formed by 4  $\phi 25 \text{ mm}$ . Outside the monitoring area, stirrups with a diameter of  $\phi = 8 \text{ mm}$  and a spacing of 100 mm were arranged. The chords were supported by transverse reinforcement. The size of the longitudinal reinforcement had to make sure to prevent a failure due to bending also for the beams with a combined shear reinforcement of steel bars and steel fibres.

During the first casting process, which means for the beams Q1-1, Q1-F1-1, Q1-B1-1 und Q1-F1-B1-1, inappropriate environmental temperatures during hardening resulted in a strong crack disposition in the monitoring area due to shrinkage and temperature difference. In contrast to the specimens with fibre reinforcement, the beams without fibre reinforcement were more affected by the vertical running cracks in terms of number and crack width.

To identify the load bearing capacity of the particular shear reinforcement and their interaction when combined arranged, UHPC-beams with different shear reinforcement were produced. The stirrups had a diameter of  $\phi = 5 \text{ mm}$  and a distance of 105 mm. Tensile tests on reference specimens showed a average yield stress of  $694 \text{ MPa}$ . The applied steel fibres had a diameter of  $d_f = 0,175 \text{ mm}$  and a length of 13 mm. Their tensile strength was given by the producer to about  $2,500 \text{ MPa}$ . The fibres were applied with two fibre contents of 1.0 % by volume (F1) and

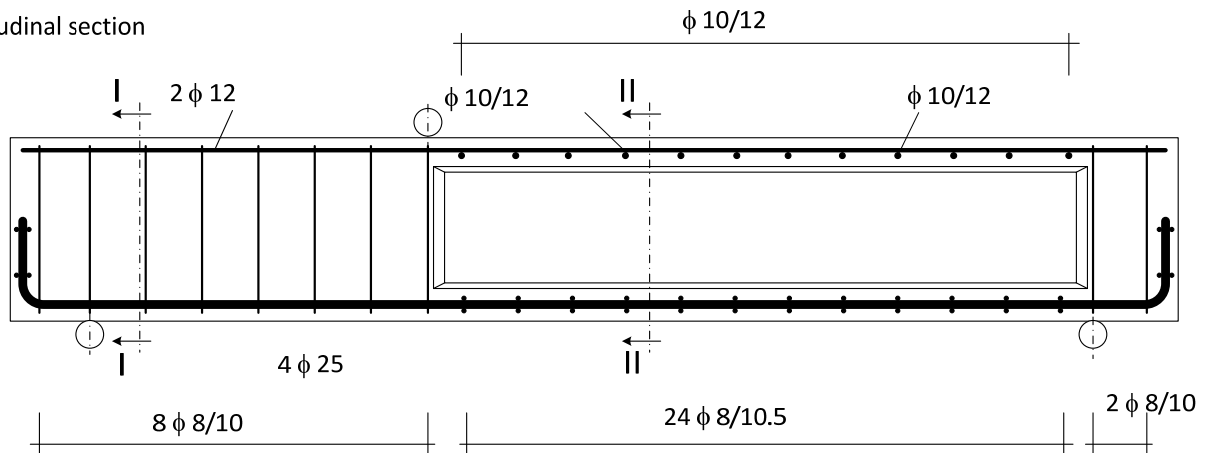
in zwei Fasergehalten von 1,0 Vol.-% (F1) und 0,5 Vol.-% (F2) verwendet. Tabelle 8 zeigt u. a. die Querkraftbewehrungsvariationen.

Um die Materialeigenschaften der UHPC-Mischungen zu bestimmen und zu kontrollieren, wurden aus jeder Mischung sowohl Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm als auch Prismen mit einem Querschnitt von 40 mm x 40 mm und einer Länge von 160 mm hergestellt. Die Prüfung dieser Referenzkörper ergab die ebenfalls in Tabelle 8 zusammengestellten Ergebnisse.

0.5 % by volume (F2). Table 8 shows amongst others the shear reinforcement variation.

To determine and control the material properties of the UHPC-mixtures, reference cylinders with a diameter of 100 mm and a height of 200 mm as well as prisms with a cross-section of 40 mm x 40 mm and a length of 160 mm were cast. The testing results of these specimens are also presented in Table 8.

Longitudinal section



**Bild 19.** Grundbewehrung [13].  
**Fig. 19.** Basic reinforcement [13].

**Tab. 8.** Materialeigenschaften.  
**Tab. 8.** Material properties.

Specimen	Shear reinforcement		Material properties		Flexural tensile strength	Fibre efficiency	Ultimate shear force
	Stirrups	Fibres	Young's modulus	Compressive strength			
			MPa	MPa	MPa	MPa	kN
Q1-1	–	–	48.162	212.9	7.4	–	41.3
Q1-B1-1	B1	–	48.240	224.3	9.6	–	91.8
Q1-B1-2	B1	–	46.488	195.3	–	–	98.2
Q1-F1-1	–	F1	45.829	198.7	21.5	7.7	–
Q1-F1-2	–	F1	45.873	201.2	23.2	9.6	110
Q1-F1-3	–	F1	48.528	207.9	24.1	–	100
Q2-F1-1	–	F1	49.641	185.6	14.0	–	109
Q1-F2-1	–	F2	46.998	213.0	14.3	5.3	76.3
Q1-F1-B1-1	B1	F1	45.717	197.8	23.6	8.0	147
Q1-F1-B1-2	B1	F1	46.386	197.4	26.0	–	170
Q1-F2-B1-1	B1	F2	47.425	211.1	15.5	4.0	140

Note: F1 = 13 mm/0,175 mm/1.0 % by volume, F2 = 13 mm/0,175 mm/0.5 % by volume, Stirrups B1 =  $\phi$  5 mm, distance: 10.5 cm

### 5.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden als 3-Punkt-Biegeversuche in einer hydraulisch gesteuerten Prüfmaschine durchgeführt. Dabei erfolgte die Lasteinleitung asymmetrisch (Bild 18), um das Versagen an einem Balkenende zu provozieren. Die Versuchsanordnung ergab für die rechte Balkenhälfte eine Schubslankheit von vier.

Zur Vermeidung von Zwängungen wurden die Balken auf Rollen gelagert. Die Lasteinleitung erfolgte über ein Kugelgelenk auf eine Lastverteilungsplatte. Die aufgebrachte Last wurde mittels einer Kraftmessdose gemessen. Über induktive Wegaufnehmer (Bild 20, links) wurden die Durchbiegung der Balken unter der Lasteinleitung, die horizontalen Verformungen der Gurte in Nähe der Lasteinleitung und die Schubverformungen an drei Stellen des Steges/Untersuchungsgebietes gemessen.

Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt. Die Anfangsgeschwindigkeit betrug 0,01 mm/s. Im Versuchsverlauf wurde die Geschwindigkeit auf 0,02 bis 0,1 mm/s gesteigert. Zu ausgewählten Laststufen wurden die Versuche unter Halten der erreichten Verformung gestoppt, die Rissentwicklung am Balken farblich dokumentiert und die Rissbreitenentwicklung mit einer Risslupe mit Datenübertragungsmöglichkeit an den PC verfolgt.

### 5.4 Versuchsergebnisse der UHPC-Balken ohne und mit Querkraftbewehrung ausschließlich aus Stabstahl

Im Untersuchungsbereich des Balkens ohne Querkraftbewehrung (keine Fasern, keine stabförmige Bewehrung) traten Schubrisse schon auf einem niedrigen Querkraftniveau von etwa 18 kN (Bild 20, rechts) auf. Die bereits vor Versuchsbeginn existierenden Risse aus Schwinden und Temperaturunterschied waren Ausgangspunkt für die Schubrisse und wurden von ihnen im Verlauf gekreuzt. Im Wechsel von Lastabfall und Lastanstieg bildete sich innerhalb kurzer Zeit das komplette Rissbild im Untersuchungsbereich mit einer hauptsächlichen Rissneigung von etwa 30° heraus.

Eine weitere, im Vergleich zum Zeitpunkt des Auftretens der Schubrisse erhebliche Laststeigerung auf ein Querkraftniveau von etwa 42 kN konnte auf Grund der starken Dübelwirkung der Biegezugbewehrung beobachtet werden. Hierbei kam es zu einer deutlichen Zunahme der Schubrissbreiten im Untersuchungsbereich. Das Durchschlagen der Versagensrisse in die

### 5.3 Test Procedure

The tests were carried out as 3-point-bending tests in a hydraulic controlled testing machine. Thereby, the load application took place in an asymmetrical way (Figure 18) to provoke the failure at one end of the beam. The test setup produced a shear slenderness of four on the right hand side of the beam.

To avoid restraint, the support consisted of cylindrical roller bearing. The load application took place over a spherical joint on a load distribution plate. The applied load was quantified by a load cell. The vertical deformation of the beams directly under the load application, the horizontal deformation of the chords near the load application and the shear deformation on three positions in the monitoring area of the web were gauged by LDVT's (Figure 20, left).

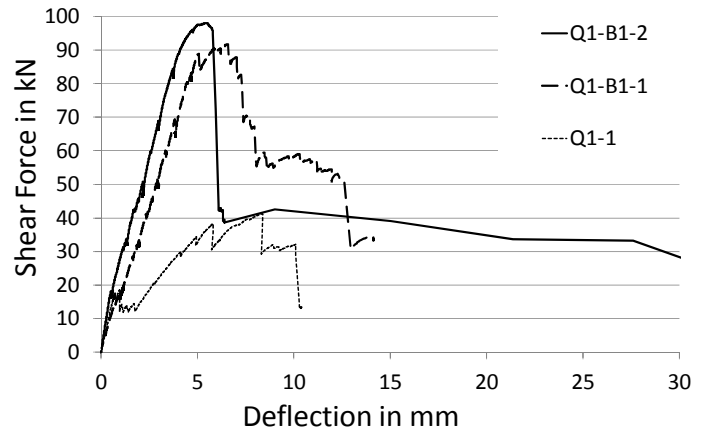
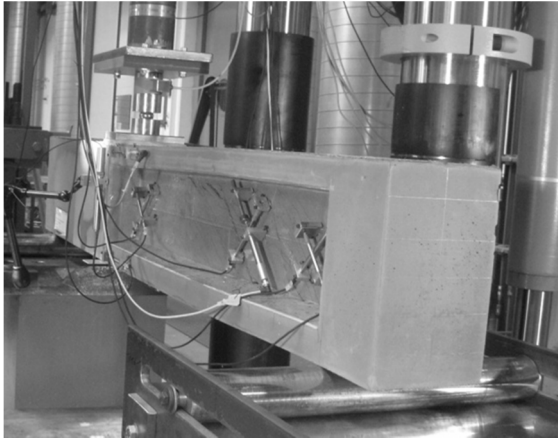
The tests were conducted by displacement control. The starting test rate was 0.01 mm/s. During the tests, the rate was raised up to 0.02 and 0.1 mm/s. At selected load steps, the tests were stopped with keeping the reached deformation of the beam constant. The crack development was documented in terms of colour at the surface of the monitoring area, and the change of the crack width was tracked with the help of a magnifying glass with data transfer facility to a PC.

### 5.4 Test Results of UHPC-Beams without and with Shear Reinforcement of Stirrups only

In the monitoring area of the beam without shear reinforcement (no fibres, no stirrups), shear cracks occurred already on a low shear force level of about 18 kN (Figure 20, right). The already existing cracks due to shrinkage and temperature difference formed the starting points for the shear cracks and were crossed by them during the testing process. While load drop and load raise alternated, the complete shear crack pattern developed in a short time. The main inclination of the cracks was about 30°.

Compared to the force level when the complete shear crack pattern developed, a further significant load increase up to a shear force level of 42 kN based on the pronounced dowel effect could be observed. In that process, the cracks width in the monitoring area grew significantly. The failure crack snapped through to the compression zone and led to a blast-off of the compression chord. In the test, a maximum load of  $F_u = 126$  kN was reached.

Druckzone führte zum Absprennen des Druckgurtes. Für den gewählten Versuchsaufbau bedeutet dies eine maximale Last von  $F_u = 126$  kN.



**Bild 20.** Instrumentierung mit Wegaufnehmern (links); Balken ohne und mit Querkraftbewehrung ausschließlich aus Stabstahl (rechts) [13].

**Fig. 20.** Instrumentation with LDVTs (left); Beams without shear reinforcement or with stirrups only [13].

Zwei Balken wurden mit stabförmiger Querkraftbewehrung getestet. Die Schubrisse im Balken Q1-B1-1 entwickelten sich ebenfalls aus den bereits vorhandenen Rissen aus Schwinden und Temperaturunterschied und kreuzten diese. Der Balken Q1-B1-2 mit geänderten Aushärtebedingungen und daher ohne Schwindrisse, aber sonst mit gleicher Konfiguration, erreichte eine höhere Steifigkeit, allerdings keine signifikant höhere Traglast. Die Neigung der Schubrisse betrug etwa  $40^\circ$ .

Nach Erreichen der Höchstlast wurde eine weitere Verformung auf die Balken aufgebracht, welche zur Lokalisierung der Verformung in jeweils zwei Versagensrissen und zum Reißen der Bügelstäbe, die diese Versagensrisse kreuzten führte. Das Bauteilversagen stellte sich als Durchschlagen eines der Risse in die Druckzone dar, welches zum Abplatzen eines Teils des Druckgurtes führte.

### 5.5 Versuchsergebnisse der UHPC-Balken mit Querkraftbewehrung ausschließlich aus Stahlfasern

Es wurden vier Balken mit einer Querkraftbewehrung aus 1,0 Vol.-% Fasern hergestellt, von denen jedoch nur drei getestet wurden. Die erreichte Querkrafttragfähigkeit dieser Balken lag mit etwa 100 bis 110 kN, entsprechend einer Maximallast von 300 bis 330 kN, leicht über der Querkrafttragfähigkeit der bügelbewehrten Balken (Bild 21). Im Versuch zeigten diese Balken im Vergleich zu den Balken ohne Faserzugabe eine größere Anzahl von Rissen im Untersuchungsbereich mit kleineren Rissbreiten und

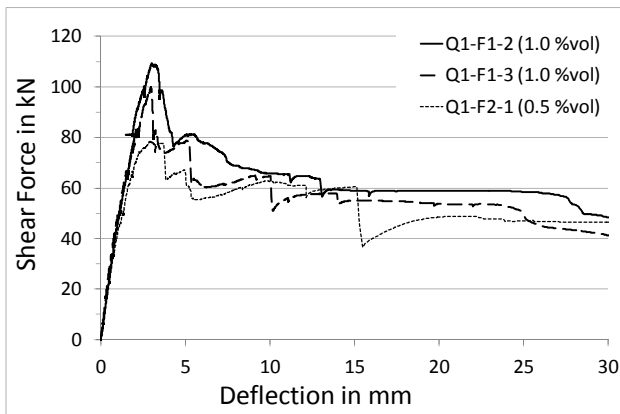
Two beams with stirrups only were tested. The shear cracks of beam Q1-B1-1 again started from the cracks that already existed due to shrinkage and temperature difference and crossed them. The beam Q1-B1-2, which underwent different hardening conditions and showed therefore no cracks before the test, but had else wise identical configuration, performed a higher stiffness, but however no significant higher ultimate load. The inclination of the compression struts was about  $40^\circ$ .

After reaching the ultimate load, the further deformation was applied to the beam, which led to a localisation of the deformation in two failure cracks, and led to rupture of the stirrups crossing these failure cracks. The failure of the beam was constituted by a snapping-through of one failure crack to the compression zone followed by the blast-off of the compression chord.

### 5.5 Test Results of UHPC-Beams with Shear Reinforcement consisting of Fibres only

Four beams with shear reinforcement of fibres only with a fibre content of 1.0 % by volume were cast, but only three of them were tested. The reached shear load capacity of these beams laid slightly above the capacity of beams with stirrups only at about 100 to 110 kN, which corresponds to a maximum load of about 300 and 330 kN (Figure 21). Compared to the beams with stirrups, these beams showed a larger amount of cracks with smaller crack width and crack spacings in the monitoring area. The inclination

kleineren Rissabständen. Die Neigung der Risse betrug zwischen  $30^\circ$  und  $45^\circ$ .



**Bild 21.** Balken mit Querkraftbewehrung ausschließlich aus Fasern.

**Fig. 21.** Beam with shear reinforcement consisting of fibres only.

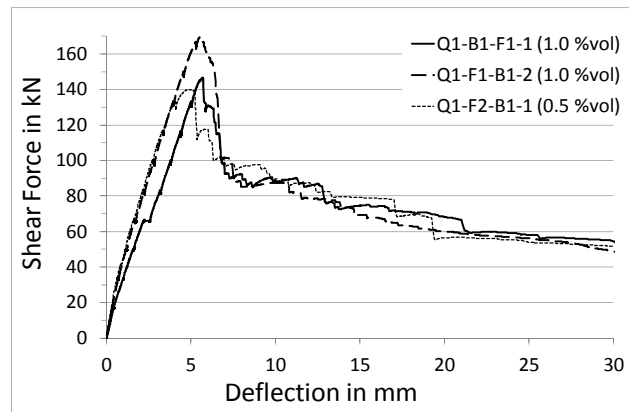
Als Variation wurde ein Balken mit einem Fasergehalt von 0,5 Vol.-% hergestellt und getestet. Die erreichte Querkrafttragfähigkeit lag bei 76,3 kN bzw. die Maximallast bei 229 kN. Im Vergleich zu den Balken mit 1,0 Vol.-% Fasern zeigten sich eine geringere Anzahl an Rissen mit größeren Rissabständen und Rissbreiten. Die Neigung der Druckstrebe betrug ca.  $40^\circ$ .

Zwei Versagensrisse traten jeweils auf. Einer von ihnen wuchs zunächst längs der Biegezugbewehrung in Richtung Auflager und dann in Richtung der Druckzone. Das Versagen stellte sich als Verbundversagen der Biegezugbewehrung am Auflager dar.

### 5.6 Versuchsergebnisse der UHPC-Balken mit kombinierter Querkraftbewehrung aus Stabstahl und Stahlfasern

Zwei Balken mit identischer Bewehrungskonfiguration mit kombinierter Querkraftbewehrung aus Bügelstäben und einer Faserzugabe von 1,0 Vol.-% wurden getestet. Die erreichten Querkrafttragfähigkeiten lagen bei 147 und 170 kN, die maximale Lasten bei 440 und 509 kN. Die Ergebnisse sind damit mit Unsicherheiten behaftet (Einfluss der verschiedenen Aushärtebedingungen und/oder hohe Sensitivität gegenüber Streuung der Materialeigenschaften). Beide Versuchskörper zeigten eine ähnliche Rissentwicklung wie die Balken mit reiner Faserbewehrung, allerdings hatten die Druckstreben eine steilere Neigung von etwa  $50^\circ$ . Nach Erreichen der Höchstlast rissen die Stäbe, die die Versagensrisse kreuzten. Einer der Versagensrisse wuchs ebenfalls wie bei den Balken mit ausschließlicher Querkraftbewehrung aus

of the compression struts was between  $30^\circ$  and  $45^\circ$ .



**Bild 22.** Balken mit kombinierter Querkraftbewehrung.

**Fig. 22.** Beam with combined shear reinforcement.

As a variation, a beam with a fibre content of 0.5 % by volume was produced and tested. The achieved shear load capacity was 76.3 kN, equal to a maximum load of 229 kN. Compared to beams with a fibre content of 1.0 % by volume, a lesser amount of cracks occurred with larger crack spacings and crack widths. The inclination of the compression strut was about  $40^\circ$ .

Two failure cracks developed in each case. One of them grew along the longitudinal reinforcement in the direction of the support as well as in the direction of the compression zone. The failure of the beam was constituted as a bond failure of the longitudinal reinforcement at the support.

### 5.6 Test Results of UHPC-Beams with Combined Shear Reinforcement consisting of Stirrups and Fibres

Two identical beams with combined shear reinforcement of stirrups and a fibre content of 1.0 % by volume were tested. The obtained shear bearing capacity of 147 and 170 kN, thus means maximum loads of 440 and 509 kN, didn't show a reliable result (influence of different hardening conditions and/or high sensitivity against scatter of material properties). Both specimens developed shear cracks in a similar way as beams with a shear reinforcement of fibres only, but the inclination of the compression struts of  $50^\circ$  was steeper. After reaching the maximum load, the stirrups crossing the main failure crack ruptured. Comparable to beams with a shear reinforcement consisting of fibres only, one of the failure cracks grew along the longitudinal reinforcement in the direction of the support. The end of the test

Fasern längs der Biegezugbewehrung in Richtung Auflager. Das Versuchsende war durch das Verbundversagen der Biegezugbewehrung am Auflager gekennzeichnet.

Die Balken mit kombinierter Querkraftbewehrung erreichten signifikant höhere Lasten (Bild 22) als die nur mit Stabstahl oder nur mit Fasern querkräftbewehrten Balken.

Als Variation wurde ein Balken mit einer kombinierten Querkraftbewehrung aus Bügelstäben und einer Faserzugabe von 0,5 Vol.-% hergestellt und getestet. Die Querkrafttragfähigkeit lag bei 140 kN, die Maximallast bei 420 kN. Wie bei den Balken mit Querkraftbewehrung ausschließlich aus 0,5 Vol.-% Fasern zeigten sich auch hier eine geringere Anzahl von Rissen im Untersuchungsbereich mit größeren Rissbreiten und größeren Rissabständen im Vergleich zu den Balken mit einer Faserzugabe von 1,0 Vol.-%. Die Neigung der Druckstrebe betrug ca. 45° bis 50°.

## **6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

In der ersten und zweiten Förderperiode wurden Versuche zum Verbundverhalten zwischen UHPC und darin eingebetteten gerippten Bewehrungsstäben durchgeführt (Pull-Out-Versuche). Bei kurzen Verbundlängen von  $1,5 \phi$  ergaben sich sehr hohe Verbundspannungen, die für Betonstahl bis zu etwa 81 N/mm<sup>2</sup> und für hochfesten gerippten Spannstahldraht bis zu etwa 54 N/mm<sup>2</sup> betragen. Bei reduzierter Betondeckung  $c \leq 2,5 \phi$  wurde Spalten des Betons und zum Teil schlagartiges Verbundversagen beobachtet. Die Verbundfestigkeit wird bei Betonstahl bereits bei sehr kleinen Verschiebungen von 0,1 bis 0,2 mm erreicht. Für hochfesten gerippten Spannstahldraht, der gegenüber Betonstahl eine sehr viel kleinere bezogene Rippenfläche  $f_R$  besitzt, ist das Verbundverhalten deutlich weicher.

Die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung von faserbewehrtem UHPC wurde in mehreren Versuchsreihen für verschiedene Faserbetonmischungen an gekerbten Prismen ermittelt. Zum Teil wurden die Bruchflächen der Proben nach dem Versuch in Hinblick auf Faseranzahl und Faserorientierung optisch analysiert. Es zeigte sich, dass die Faserwirksamkeit der untersuchten Faserbetonmischungen ab einem Fasergehalt von etwa 1,0 Vol.-% nur noch unterproportional zum Fasergehalt wächst. Die geringere Effektivität hoher Fasergehalte wird offensichtlich

was marked by a bond failure of the longitudinal reinforcement at the support.

The beams with combined shear reinforcement achieved significant higher maximum loads (Figure 22) than the beams with shear reinforcement consisting of either steel bars or steel fibres only.

As a variation, a beam with a combined shear reinforcement of stirrups and fibres, but with a fibre content of 0.5 % by volume, was produced and tested. The shear bearing capacity was achieved at 140 kN, corresponding to a maximum load of 420 kN. Comparable to beams with a shear reinforcement consisting of fibres only, but with a fibre content of 0.5 % by volume, the cracks added up to a lesser number with greater crack width and crack spacings compared to beams with a fibre content of 1.0 % by volume. The inclination of the compression strut was about 45° to 50°.

## **6 Summary and Conclusions**

In the first and second funding period, tests on the bond behaviour between UHPC and embedded ribbed bar reinforcement were conducted (pull-out tests). For short bond lengths of  $1.5 \phi$ , very high bond stresses were obtained that reached values of up to 81 MPa for rebars and up to 54 MPa for ribbed high strength steel. For reduced concrete cover  $c \leq 2.5 \phi$ , splitting failure could be observed that sometimes occurred suddenly. The bond strength of the rebars is already reached at very small slips of 0.1 up to 0.2 mm. Due to the much smaller relative rib area  $f_R$ , the bond behaviour of the ribbed high strength steel was significantly softer than that of the rebars.

The stress-crack opening relationship of fibre reinforced UHPC was investigated in several test series for various fibre reinforced concrete mixtures. Notched prisms served as test specimens. Partially, the cracked cross-sections of the specimens were analysed optically with respect to the actual number of fibres and fibre orientation. It turned out that the fibre efficiency of the tested fibre reinforced concrete mixtures grows only less than proportional for fibre contents of more than 1.0 % by volume. The lower effectivity of high fibre contents is obviously influenced by the interaction of the individual fibres in their pull-out behaviour and – especially for very slender fibres – by the lower workability

durch die gegenseitige Beeinflussung der Fasern in ihrem Ausziehverhalten und – besonders bei sehr schlanken Fasern – die erschwerte Verarbeitbarkeit der Faserbetonmischung (Inhomogenität) verursacht.

Zur Untersuchung des Verbundmechanismus der Fasern wurden eigens Pull-Out-Versuche an Einzelfasern, Faserreihen und Fasergruppen durchgeführt. Die Ergebnisse unterlagen starken Streuungen, vor allem bei kurzen Verbundlängen. Der Ausziehwiderstand der geneigten Fasern war im Allgemeinen höher als der der parallel zur Zugrichtung orientierten Fasern. Versagensart war in der Regel Faserauszug. Nur bei den Fasergruppen wurde bei großen Verbundlängen und großer Faserneigung vereinzelt Faserreißen beobachtet.

Die an gemischt bewehrten Dehnkörpern (Stabstahl + Fasern) durchgeführten Zugversuche zeigten, dass bereits eine geringe Faserzugabe die Rissverteilung nachhaltig verbessert. Für hohe Fasergehalte wurden nur unwesentlich kleinere Rissabstände erhalten. Ursachen hierfür sind die mit zunehmendem Fasergehalt nur unterproportional anwachsende Faserwirksamkeit und die gleichzeitig mit der Faserwirksamkeit zunehmende Risskraft des Faserbetons, die durch Stabstahl und Fasern über Verbund in den Beton eingeleitet werden muss. Die in den Versuchen beobachtete Entwicklung der Rissabstände und Rissbreiten kann mit dem in [2] vorgestellten mechanischen Modell gut nachvollzogen werden.

Die Versuche an scheibenförmigen Bauteilen zur biaxialen Druck-Zug-Festigkeit lieferten für die faserfreien, ausschließlich stabstahlbewehrten UHPC-Scheiben höhere Abminderungen der Tragfähigkeit als für die kombiniert bewehrten Proben. Die Abminderung ist bis etwa  $\varepsilon_1 = 2 \text{ ‰}$  deutlich von der Größe der Zugdehnung abhängig und im Anschluss annähernd konstant. Als Ursache hierfür wird die mit zunehmender Dehnung (Rissöffnung) allmählich verloren gehende Kornverzahnung vermutet, die dann bei sehr großen Dehnungen nicht mehr zur Verfügung steht. Als untere Grenze der Druckfestigkeit bei großen Zugdehnungen kann aus den Versuchen etwa  $0,5 f_{c,cyl}$  für stabstahlbewehrten UHPC ohne Fasern und etwa  $0,7 f_{c,cyl}$  für stabstahlbewehrten UHPC mit Fasern abgeleitet werden.

Das Trag- und Verformungsverhalten unter Biegebeanspruchung wurde an kombiniert bewehrten Biegebalken untersucht. Dabei wurden die Parameter Bauteilhöhe, Fasertyp, Fasergehalt,

of the fibre reinforced concrete mix (inhomogeneity).

In order to investigate the bond mechanism of the fibres, pull-out tests on single fibres, fibre rows, and fibre groups were specially performed. The results offered a wide spreading especially for short bond lengths. The pull-out resistance of the inclined fibres was, in general, higher than that of the fibres oriented parallel to the tensile direction. The typical failure mode was fibre pull-out. Only for the fibre groups with long bond lengths and high fibre inclination a few times fibre rupture could be observed.

The tensile tests executed on mixed reinforced tensile members (bar reinforcement + fibres) demonstrated that already a small addition of fibres can improve the crack distribution effectively. For high fibre contents insignificantly smaller crack spacings were observed. Reasons for this are the less than proportional increase of the fibre efficiency for higher fibre contents and the simultaneously increasing cracking stress of the fibre reinforced concrete that has to be transferred from the bar reinforcement and the fibres to the concrete matrix by bond action. The development of the crack spacings and crack widths observed in the tests can be reproduced very well by the mechanical model presented in [2].

The tests on panel-shaped structural elements concerning the biaxial compression-tension strength showed higher reductions of the bearing capacity for the UHPC panels exclusively reinforced with bar reinforcement than for the specimens with combined reinforcement. The reduction significantly depends on the magnitude of the tensile strain as long as  $\varepsilon_1$  is below about 2 ‰ and then is almost constant. The aggregate interlock, that decreases gradually with increasing tensile strain (crack opening) and is not available anymore for very large strains, is assumed to be the reason for this. For UHPC exclusively reinforced with bar reinforcement, a lower limit of the compressive strength at large tensile strains of about  $0.5 f_{c,cyl}$  can be derived from the tests. For UHPC with combined reinforcement, this value amounts to about 0.7.

The load bearing capacity and the deformation behaviour under bending load of beams with combined reinforcement was researched. In this respect, the parameters height of the member, fibre type, fibre content, grade of rebars and reinforcement ratio were varied. Fibres prevented a brittle, explosive failure and contributed to the bond safety. In the tests, increasing fibre content



Stabstahltyp und Stabstahlgehalt variiert. Fasern verhinderten ein sprödes, explosives Versagen und trugen zur Verbundsicherung bei. Bei den Versuchen zeigten sich mit steigendem Fasergehalt ein höheres Rissmoment, eine ausgeprägtere Zugversteifung und eine höhere Maximallast. Allerdings konnte bei hohem Fasergehalt eine Begünstigung der Lokalisierung der Verformungen beobachtet werden, sodass die Verformungsfähigkeit geringer war. Der Stabstahltyp hatte gemäß der unterschiedlichen Materialeigenschaften und Oberflächenbeschaffenheit Auswirkungen auf das Verbundverhalten und die Rissbildung.

Die Querkrafttragfähigkeit von UHPC-Balken wurde an Balken mit verschiedener Querkraftbewehrung experimentell untersucht. Risse infolge frühen Zwangs (Schwinden und Temperaturdifferenz) haben auf die Tragfähigkeit keinen Einfluss. Die Zugabe von Fasern bewirkt eine Abnahme der Rissabstände und -breiten. Mit Zunahme des Querkraftbewehrungsgrades nimmt der Winkel zwischen Rissen und Balkenachse zu. Die Zugabe von Fasern steigert die Tragfähigkeit der Balken. Balken mit kombinierter Bewehrung erreichen folgerichtig die höchsten Traglasten. Nach Erreichen der Höchstlast war eine weitere Verformung der Balken möglich. Dabei zeigten die Balken mit Faserbewehrung eine größere Verformungsfähigkeit als die Balken ohne Faserbewehrung. Der steile Lastabfall nach Erreichen der Höchstlast führte auf ein nahezu konstantes Lastniveau, welches den Einfluss der Dübelwirkung der Längsbewehrung erkennen lässt.

Während des gesamten Projektzeitraums wurden in Aufsätzen in Zeitschriften sowie in Beiträgen zu internationalen und nationalen Tagungen und Workshops die Teilprojekte in Intention, Durchführung und Ergebnissen vorgestellt und diskutiert [2, 6-9, 11-13, 15-24].

## **7 Literatur - References**

- [1] Habel, K.; Denarié, E.; Brühwiler, E.: Experimental Investigation of Composite Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete and Conventional Concrete Members. *ACI Structural Journal* 104 (1), pp. 93-101, 2007.
- [2] Leutbecher, T.: Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC). Dissertation, Universität Kassel, *Structural Materials and Engineering Series No. 9*, Kassel University Press, 2008.
- [3] RILEM: RC 6 Bond test for reinforcement steel, 2. Pull-out test, 1983. *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials*, pp. 218-220, E & FN SPON, London, 1994.
- [4] Li, V. C.; Leung, Ch. K. Y.: Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites. *Journal of Engineering Mechanics* 188 (11), pp. 2246-2264, 1992.
- [5] Pfyl, Th.: Tragverhalten von Stahlfaserbeton. Dissertation, ETH Zürich, ETH Nr. 15005, 2003.

resulted in a higher crack moment, significant tension stiffening, and a higher maximum load. However, it could be observed, that a privileged localisation of the deformation went along with high fibre content, so that the deformation capacity was lower. The grade of steel influenced the bond behaviour and crack propagation with respect to the different material and properties surface conditions.

The shear bearing capacity of UHPC-beams with different shear reinforcement was researched experimentally. Cracks due to early-age restraint (shrinkage and temperature difference) have no influence on the bearing capacity. Adding of fibre results in decrease of crack spacings and width. With increase of shear reinforcing ratio the inclination between cracks and beam axis grows. Adding of fibre increases the shear load bearing capacity of beams. Therefore, beams with combined shear reinforcement achieve the highest loads. After reaching the maximum load a further deformation of the beams was possible. In the process beams with steel fibre reinforcement showed a higher deformation capacity than beams without steel fibre reinforcement. The steep load drop leads to a nearly constant load level, which can be recognised as the dowel action.

During the entire project period, the intention, realisation and results of the sub-projects were presented and discussed [12, 6-9, 11-13, 15-24].

- [6] Leutbecher, T.; Fehling, E.: Tensile Behavior of Ultra-High-Performance Concrete Reinforced with Reinforcing Bars and Fibers: Minimizing Fiber Content. *ACI Structural Journal* 109 (2), pp. 253-263, 2012.
- [7] Leutbecher, T.; Fehling, E.: Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Fasern verstärktem Stahlbeton am Beispiel ultrahochfesten Betons – Teil 1: Rissmechanische Zusammenhänge. *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (6), pp. 357-367, 2009.
- [8] Leutbecher, T.; Fehling, E.: Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Fasern verstärktem Stahlbeton am Beispiel ultrahochfesten Betons – Teil 2: Experimentelle Untersuchungen und Anwendungsbeispiele. *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (7), pp. 406-415, 2009.
- [9] Fehling, E.; Leutbecher, T.; Röder, F.-K.; Stürwald, S.: Structural behavior of UHPC under biaxial loading. *Proc. of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Structural Materials and Engineering Series No.10* (Eds.: Fehling, E. et al.), pp. 569-576, kassel university press, Kassel, 2008.
- [10] Fehling, E.; Leutbecher, T.; Röder, F.-K.: Zur Druck-Querzug-Festigkeit von Stahlbeton und stahlfaserverstärktem Stahlbeton in scheibenförmigen Bauteilen (Biaxial Compression-Tension-Strength of Reinforced Concrete and Reinforced Steel Fibre Concrete in Structural Panels). *Structural Materials and Engineering Series, No.11*, kassel university press, Kassel, 2008.
- [11] Fehling, E.; Leutbecher, T.; Röder, F.-K.: Structural behaviour of normal strength and ultra high strength reinforced concrete with and without fibres under biaxial loading. *Recent Developments in Structural Engineering, Mechanics and Computation* (Ed.: Zingoni, A.), pp. 557-558, Millpress, Rotterdam, 2007.
- [12] Stürwald, S.: Versuche zum Biegetragverhalten von UHPC mit kombinierter Bewehrung. *Forschungsbericht, Fe 497/4-2*, DFG, Universität Kassel, 2011.
- [13] Thiemicke, J.; Fehling, E.: Experimental Investigations on I-Shaped UHPC-Beams with Combined Reinforcement under Shear Load. *Proc. of HiPerMat 2012 - 3<sup>rd</sup> International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Structural Materials and Engineering Series No.19* (Eds.: Schmidt, M. et al.), kassel university press, pp. 477-484, Kassel, 2012
- [14] Lange, J.: Mess- und Auswertetechnik zur Riss- und Faserdetektion bei Betonbauteilen. *Dissertation*, RWTH Aachen, 2009.
- [15] Fehling, E.; Stürwald, S.; Leutbecher, T.: Tragfähigkeit von Biegebauteilen aus UHPC; in: *Baustoff und Konstruktion: Festschrift zum 60. Geburtstag von Harald Budelmann* (Eds.: Nothnagel, R.; Twelmeier, H.), pp. 445-455, Heidelberg, Springer, 2012.
- [16] Fehling, E.; Leutbecher, T.: Tensile behavior of ultra high performance concrete (UHPC) reinforced with a combination of steel-fibers and rebars; in: *Recent Developments in Structural Engineering, Mechanics and Computation* (Ed.: Zingoni, A.), pp. 549-550, Rotterdam, Millpress, 2007.
- [17] Leutbecher, T.; Fehling, E.: Crack Formation and Tensile Behaviour of UHPC Reinforced with a Combination of Rebars and Fibres. *Proc. of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Structural Materials and Engineering Series No.10* (Eds.: Fehling, E. et al.), pp. 497-504, kassel university press, Kassel, 2008.
- [18] Fehling, E.; Leutbecher, T.; Stürwald, S.: Structural Behavior of Ultra High Performance Concrete Reinforced with Steel Fibers and Rebars. *Proc. of 2010 fib Congress and PCI Convention Bridge Conference, Washington D.C.* (Ed.: Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago), 2010.
- [19] Fehling, E.; Stürwald, S.: Flexural Behaviour of UHPC with Fibres and Rebars. *Proc. of fib Symposium „Concrete engineering for excellence and efficiency“*, Prague, June 8-10, 2011, vol. 2, pp. 535-542.
- [20] Stürwald, S.: Bending Behaviour of UHPFRC combined with Rebars. *Proc. of 8<sup>th</sup> fib PhD Symposium in civil engineering*, Kgs. Lyngby, June 13-20, 2010, pp. 261-266.
- [21] Thiemicke, J.; Fehling, E.: Zum Tragverhalten von UHPC unter Querkraftbeanspruchung. *Beiträge zum 51. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton*, TU Kaiserslautern, 11. und 12. November 2010, pp. 157-167.
- [22] Fehling, E.; Thiemicke, J.: Shear Bearing Behaviour of Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Proc. of fib Symposium „Concrete engineering for excellence and efficiency“*, Prague, June 8-10, 2011, vol. 2, pp. 975-978.
- [23] Leutbecher, T.; Fehling, E.: Design for serviceability of ultra high performance concrete structures; in: *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6* (Eds.: Parra-Montesinos, G. J.; Reinhardt, H. W.; Naaman, A. E.), *Proc. of the 6<sup>th</sup> International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC6)*, pp. 445-452, Ann Arbor, MI, USA, Springer, Dordrecht, 2011.
- [24] Thiemicke, J.; Fehling, E.: Experimentelle Untersuchungen an profilierten UHPC-Balken mit kombinierter Bewehrung unter Querkraftbeanspruchungen. *Beiträge zum 53. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton*, Universität Kassel, 09. und 10. Oktober 2012, pp. 11-20.