

Schalentragwerke mit funktionaler Gradierung | Shell structures with functional grading

- ▶ Sandy Illguth, Dirk Lowke, Thomas Kränkel, Christoph Gehlen
- ▶ Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), TU München

1 Motivation

Betone für schlanke Schalentragwerke weisen zur Sicherstellung ausreichender Zugfestigkeiten oft einen hohen Stahlfasergehalt auf. Dies ist mit hohen ökologischen und monetären Kosten verbunden. Das Ziel war es daher, die Voraussetzungen für die Herstellung effizienter Schalentragwerke aus funktional fasergradierten Betonfertigteilen zu schaffen.

2 Betone für Schalentragwerke – Entwurfsraum

Es wurden eigens entworfene Betone sowie Standard-Normalbetone (NB) und ultrahochfeste Betone (UHFB) aus Literaturangaben ökologisch bilanziert. Die Ergebnisse zeigten, dass ein stahlfaserfreier NB mit 320 kg/m^3 Zement ein CO_2 -Äquivalent von rd. 300 kg/m^3 besitzt. Ein UHFB mit 785 kg/m^3 Stahlfasern und 810 kg/m^3 Zement weist bereits ein CO_2 -Äquivalent von 1.650 kg/m^3 auf. Zur Reduzierung der ökologischen Auswirkungen müssen somit der Zement- und der Stahlfasergehalt möglichst gering sein.

Gemeinsam mit dem TP Bletzinger (S. 18 ff. in diesem Buch) wurden die Filigranität sowie die ökologischen Auswirkungen eines druckoptimierten Schalentragwerks [1] bei vorgegebener Traglast für die Betone bestimmt, s. Bild 1. Zur Sicherstellung einer vollständigen Ausfüllung der Schalung mit Beton muss diese eine Mindestdicke aufweisen, sodass sich der Beton darin durch freies Fließen ausbreiten kann. Aus diesem Grund wurde festgelegt, dass die Dicke

1 Motivation

Concrete for slender load-bearing shell structures often has a high steel fibre content to ensure sufficient tensile strength. This is associated with high ecological and financial costs. Thus, the aim of this project was to create the prerequisites for the production of efficient shell structures made of functional fibre-graded precast concrete elements.

2 Concrete for shell structures – design scope

Life cycle analyses were carried out for specially designed concretes as well as standard normal concretes (NB) and ultra-high strength concretes (UHFB) with compositions taken from the literature. The results showed that a normal concrete without steel fibres and 320 kg/m^3 cement possesses a CO_2 equivalent of approximately 300 kg/m^3 . In contrast, a UHFB with 785 kg/m^3 steel fibres and 810 kg/m^3 cement has a CO_2 equivalent of $1,650 \text{ kg/m}^3$. Consequently, the cement and steel fibre content must be as low as possible in order to reduce the environmental impact.

In cooperation with the project Bletzinger (see page 18 seq. in this book), the filigranity and ecological effect of a shell structure optimized for compression [1] and under a given load-bearing conditions were determined the concrete, Fig. 1. A minimum formwork thickness is necessary to that the fresh concrete can flow freely and completely fill the formwork. For this reason,

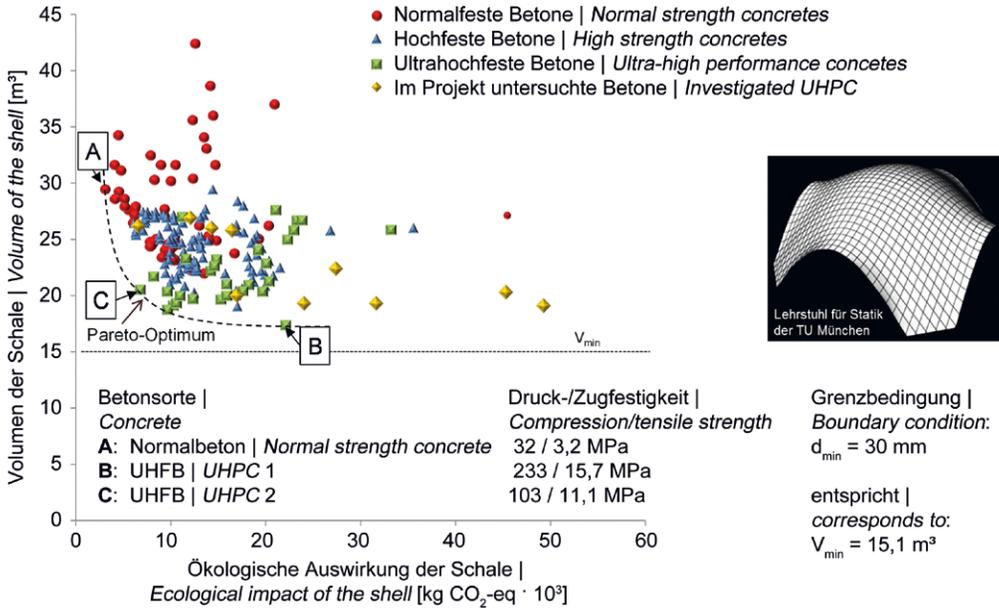


Bild 1: Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Filigranität und die ökologischen Auswirkungen (links) einer druckoptimierten Schale (rechts) | Fig. 1: Effect of concrete composition on filigranity and ecological effects (left) of a compression-optimized shell (right)

der Schale 30 mm nicht unterschreiten darf. Je nach Festigkeit des Betons muss die Schalendicke für den Lastabtrag vergrößert werden.

the thickness of the shell should not be below 30 mm. Depending on the strength of the concrete, the shell thickness necessary for load transfer has be increased.

Alle Betone auf dem Pareto-Optimum in Bild 1 weisen minimale Werte hinsichtlich Volumen bzw. CO₂-Ausstoß auf. Die ökologischen Auswirkungen sind am geringsten, wenn Normalbeton mit einer Druckfestigkeit von 32 N/mm² verwendet wird (Beton **A**). Die höchste Filigranität wird mit UHFB mit einer Druckfestigkeit von 233 N/mm² (Beton **B** = UHFB 1) erreicht. Wird jedoch das Volumen der Schale um nur 8 % erhöht (Beton **C** = UHFB 2), reduziert sich der CO₂-Ausstoß um über 56 %.

All the concretes on the pareto optimum in Fig. 1 exhibit minimal values in terms of volume or CO₂ emissions. The ecological effect is lowest when normal concrete with a compressive strength of 32 MPa is used (concrete **A**). The highest filigranity is obtained for UHFB with a compressive strength of 233 MPa (concrete **B** = UHFB 1). However, if the volume of the shell is increased by only 8% (concrete **C** = UHFB 2), the CO₂ emissions are reduced by more than 56%.

3 Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz von Betonfertigteilen

3 Ways to increase the efficiency of precast concrete components

Mit Stahlfasern lässt sich die Zugfestigkeit von Beton erhöhen. Da die Beanspruchungen in Fertigteilen i. d. R. über den Querschnitt nicht konstant hoch sind, kann die Effizienz der Fasern durch deren funktionale Gradierung ge-

Steel fibres are used to increase the tensile strength of concrete. Since the stress in precast elements is not usually constant over the element cross-section, the efficiency of the fibres can be increased by functional grading. The pre-

steigert werden. Im vorliegenden Projekt wurden dafür die Voraussetzungen geschaffen.

3.1 Erhöhung der Effektivität der Faser

3.1.1 Vorarbeiten

Die Effektivität von Fasern wurde in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung, Fasergeometrie und Faserflächenbeschaffenheit untersucht [2]. Die Untersuchungen ergaben einen alles dominierenden Einfluss des Faserdurchmessers auf die Faserleistungskennzahl FLK_f (mittlere Faserausziehungskraft pro Volumen Faser). So stieg die FLK_f für einen Faserdurchmesser $d = 0,48$ mm von 38 N/mm^3 auf 129 N/mm^3 bei $d = 0,15$ mm. Zunehmende Faserlängen l führten zur Reduktion der FLK_f . Das Aufrauen von Fasern ($d = 0,48$ mm) erhöhte die FLK_f um lediglich 7 %. Der Einsatz gewellter Fasern ergab bei geradem Faserauszug einen Anstieg der FLK_f um rd. 30 % im Vergleich zu glatten Fasern.

Um die Zugfestigkeit der Betone zu maximieren, ist es demnach entscheidend, kleine Faserdurchmesser zu verwenden. Der Einsatz kurzer Fasern ist im Hinblick auf die hohe FLK_f und zur Gewährleistung guter Verarbeitbarkeit bei hohen Fasergehalten zielführend.

3.1.2 Steigerung der Biegezugfestigkeit

Die Untersuchungen erfolgten an zwei UHFB (UHFB_A, UHFB_B), die bereits in Vorarbeiten [2] hinsichtlich der Kraftübertragung der Fasern und der ökologischen Auswirkungen aussichtsreich waren [3]. UHFB_A mit einem Zementgehalt von 220 kg/m^3 repräsentiert eine ökologisch optimierte Rezeptur, UHFB_B mit 667 kg/m^3 Zement einen konventionellen UHFB [3], [4]. Beiden Betonen wurden Mikrostahtfasern ($l = 6$ mm) mit Durchmesser von $d = 0,20$ mm (-1) bzw. $d = 0,14$ mm (-2) zugegeben. Der Fasergehalt der Betone wurde schrittweise bis auf 10 Vol.-% erhöht.

Die alleinige Erhöhung des Fasergehaltes führte nicht zwangsläufig zu höheren Biegezugfestigkeiten. So erreichte UHFB_A-1 bereits bei

requisites for this approach have been created in this project.

3.1 Increasing the effectiveness of the fibres

3.1.1 Preliminary work

The effectiveness of the fibres was investigated in terms of concrete composition, fibre geometry and the surface properties of the fibres [2]. The investigations revealed a dominating effect of fibre diameter on the fibre performance index FLK_f (average fibre pull-out force per fibre volume). Thus the FLK_f for a fibre diameter $d = 0.48$ mm increased from 38 MPa to 129 MPa for $d = 0.15$ mm. Increasing the fibre length l led to a reduction in FLK_f . Roughening the fibres ($d = 0.48$ mm) increased FLK_f by only 7%. The use of corrugated fibres resulted in an increase of FLK_f for straight pull-out by approximately 30% compared with smooth fibres.

The use of small fibre diameters is therefore decisive for maximizing the tensile strength of the concrete. Short fibres are beneficial owing to their high FLK_f and the good workability obtained at high fibre contents.

3.1.2 Increasing flexural strength

The investigations were carried out with two UHFB (UHFB_A, UHFB_B) which, based on earlier work [2], were promising with respect to force transmission of the fibres and the ecological effects [3]. UHFB_A with a cement content of 220 kg/m^3 represents an ecologically optimized composition whereas UHFB_B, with 667 kg/m^3 cement, is a conventional UHFB [3], [4]. Micro steel fibres ($l = 6$ mm) with diameters of $d = 0.20$ mm (fibre 1) or $d = 0.14$ mm (fibre 2) were added to the concretes. The fibre content of the concretes was increased in steps up to 10 vol.%.

Increasing in the fibre content alone did not necessarily result in higher flexural strengths. UHFB_A-1 reached 20.7 MPa flexural strength with 3 vol.% fibres for which UHFB_B-1 would have required about 8.6 vol.% fibres (Fig. 2, left).

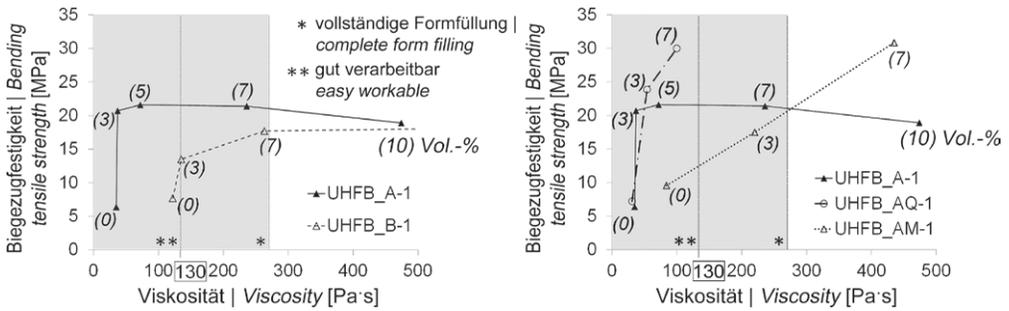


Bild 2: Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit der Viskosität; UHFB_A und UHFB_B (links); UHFB_A + Ersatz von 25 Vol.-% Kalksteinmehl durch Quarzmehl (UHFB_AQ) und Metakaolin (UHFB_AM) (rechts) | **Fig. 2:** Bending tensile strength as a function of viscosity; UHFB_A and UHFB_B (left); UHFB_A + substitution of 25 vol.% limestone powder (KSM) by quartz powder (QM) (UHFB_AQ) and metakaolin (MK) (UHFB_AM) (right)

3 Vol.-% eine Biegezugfestigkeit von 20,7 MPa, für die mit UHFB_B-1 Fasergehalte von ca. 8,6 Vol.-% benötigt worden wären (Bild 2, links).

Mit steigenden Fasergehalten stiegen auch die dynamische Fließgrenze τ_0 und die plastische Viskosität μ der Betone. Unter Berücksichtigung der beiden im System vorhandenen größten Partikel Sand und Fasern kann der relative Feststoffanteil $\text{rel } \varphi$ auf maximal 0,8 erhöht werden, bevor die rheologischen Kennwerte exponentiell ansteigen und so die Formfüllung negativ beeinflussen [3], [4], vgl. auch Abschnitt 4. Daher sollte die Viskosität für die durchgeführten Untersuchungen einen Wert von $\mu = 130 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ nicht überschreiten. Der UHFB_B besaß bereits ohne Fasern eine Viskosität von $\mu = 122 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, sodass diesem nur max. 3 Vol.-% der Faser 1 zugegeben werden konnten, ohne die Verarbeitbarkeit zu verschlechtern. Demnach ist es für die Konzeption eines Betons für filigrane Betonteile entscheidend, die faserfreie Betonrezeptur möglichst niedrigviskos einzustellen, was die Zugabe größerer Fasermengen zur Steigerung der Zugfestigkeit erlaubt.

Zudem sind die ökologischen und ökonomischen Kosten bei der Herstellung des Betons entscheidend. Mikrostaalfasern und Zement dominieren diese maßgeblich. 3 Vol.-% der Faser 2 im UHFB_B führten zwar zu einer hohen Biegezugfestigkeit von 24,0 MPa, jedoch auch zu einer gesteigerten Viskosität, sodass der Beton nur bedingt verarbeitbar war. Im Vergleich zur dickeren Faser 1 sind zudem die monetären

The dynamic yield stress τ_0 and plastic viscosity μ of the concretes both increased with the fibre content of the fresh concrete. Taking into account the two coarsest particles present in the system, namely sand and fibres, the relative solids content φ_{rel} can be increased to at most 0.8 before the rheological parameters increase exponentially thus adversely affecting mould filling [3], [4], cf. section 4. Thus the viscosity in the present tests should not exceed $130 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Without fibres UHFB_B already had a viscosity of $122 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. In this case, it was only possible to add 3 vol.% fibre 1 without worsening workability. Consequently, it is decisive for the design of concrete for filigree concrete components that the viscosity of the fibre-free fresh concrete mix is set as low as possible in order to enable the addition of larger amounts of fibres to increase tensile strength.

The ecological and economic costs of concrete production are decisive and are dominated by the micro steel fibres and cement. Although 3 vol.% of fibre 2 in UHFB_B led to a high flexural strength of 24.0 MPa, the viscosity of the mix increased and the fresh concrete was only workable to a limited extent. Compared with the thicker fibre 1, the expenditure is about 20% lower and the ecological impact (mainly due to the wet wire drawing process [5]) about 25% higher.

In summary, UHFB_A-1 is much more efficient because it has a high flexural strength with low cement and fibre contents as well as good workability of the fresh concrete.

Kosten um rd. 20 % und die ökologischen Auswirkungen (wesentlich bedingt durch den Nassziehpprozess [5]) um rund 25 % höher.

Zusammenfassend ist UHFB_A-1 wesentlich effizienter, da er hohe Biegezugfestigkeiten bei geringen Zement- und Fasergehalten und gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit aufweist.

Zur weiteren Steigerung der Zugfestigkeit des UHFB_A-1, wurden jeweils 25 Vol.-% Kalksteinmehl (KSM) durch Quarzmehl (QM) bei UHFB_AQ (inert, $d_{50} = 2 \mu\text{m}$; vergleichbar mit KSM) oder durch Metakaolin (MK) bei UHFB_AM (puzzolanisch, $d_{50} = 6,5 \mu\text{m}$) ersetzt [4]. Bild 3 zeigt KSM, QM und MK in 4.500-facher Vergrößerung mittels REM. Das Quarzmehl weist im Gegensatz zum Kalksteinmehl deutlich scharfkantigere Bruchflächen auf, wonach eine bessere Verzahnung der Partikel und höhere Verbundfestigkeiten möglich sind. Die blätterartige Struktur des Metakaolin ist in Bild 3 rechts zu erkennen. Entsprechend ist auch die spezifische Oberfläche im Vergleich zum KSM doppelt so groß.

Bild 2, rechts, zeigt die Biegezugfestigkeiten der Rezepturen mit QM und MK für die Fasergehalte 0, 3 und 7 Vol.-% (Faser 1) mit den zugehörigen Viskositäten. Mit Quarzmehl konnte eine Steigerung der Biegezugfestigkeit erreicht werden. Selbst bei einem Fasergehalt von 7 Vol.-% war der Beton gut verarbeitbar. Der faserfreie Beton mit MK (UHFB_AM) hatte bereits eine Viskosität von $86 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, was auf die geringere Packungsdichte und auf die fächerartige Kornform des Metakaolin (zusätzliche Reibung zwischen den Partikeln) zurückgeführt

To increase the tensile strength of UHFB_A-1 further, 25 vol.% of the limestone powder (KSM) content was replaced by quartz powder (QM) in UHFB_AQ (inert, $d_{50} = 2 \mu\text{m}$, similar to KSM) or metakaolin (MK) in UHFB_AM (pozzolanic, $d_{50} = 6.5 \mu\text{m}$) [4]. Fig. 3 shows SEM images of KSM, QM and MK. In contrast to limestone powder, quartz powder clearly has more sharp-edged fracture surfaces and therefore better interlocking of the particles which enables higher bond strengths. The foliate-like structure of the metakaolin is apparent in Fig. 3, right. Correspondingly, the specific surface is twice as large as that of KSM.

Fig. 2, right, shows the flexural strengths of the mixes with quartz powder and MK for fibre contents of 0, 3, and 7 vol.% (fibre 1) as a function of the associated viscosities. An increase in flexural strength was obtained with quartz powder. This concrete possessed good workability even with a fibre content of 7 vol.%. The viscosity of fibre-free concrete with MK (UHFB_AM) was already $86 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ which can be explained by a lower packing density and the fan-like particle shape of the metakaolin (additional friction between the particles). MK was able to increase the flexural strength of the fibre-free concrete from 7.2 to 9.6 MPa. The addition of 7 vol.% fibres increased the flexural strength of UHFB_AM-1 to 30.8 MPa, but the this concrete did not fill the mould sufficiently. Consequently, UHFB_AM is not suitable for formwork for thin walls.

In conclusion, flexural strength can be increased by a suitable choice of the granular materials and fibres, but cannot be optimized independently of concrete workability.

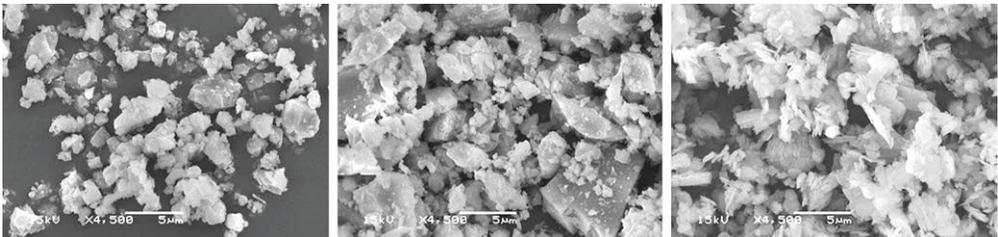


Bild 3: REM-Aufnahmen (4.500-fache Vergrößerung), v. l. n. r.: Kalksteinmehl, Quarzmehl und Metakaolin | **Fig. 3:** SEM images (magnified 4,500 times); from left to right: limestone powder, quartz flour and metakaolin

werden kann. Bereits beim faserfreien Beton konnte durch MK eine Steigerung der Biegezugfestigkeit von 7,2 MPa auf 9,6 MPa erreicht werden. Mit 7 Vol.-% Fasern stieg die Biegezugfestigkeit des UHFB_AM-1 bis auf 30,8 MPa, jedoch bei unzureichender Formfüllung, sodass UHFB_AM für dünnwandige Schalungen nicht geeignet ist.

Zusammenfassend kann die Biegezugfestigkeit durch eine gezielte Wahl der granularen Stoffe und der Fasern gesteigert, aber nicht unabhängig von der Verarbeitbarkeit optimiert werden.

3.2 Funktionale Gradierung von Fasern

Im Auflager- bzw. Anschlussbereich von einzelnen Segmenten eines Schalentragswerks treten i. d. R. höhere Momente auf. Durch Anpassung der Fasergehalte an die vorherrschenden Beanspruchungen im Bauteil ist es möglich, die Bauteildicke des gesamten Fertigteils konstant zu halten und so neben der Ästhetik des gesamten Tragwerks auch die Effizienz zu steigern. Neben einer Gradierung auf Tragwerksebene (Fertigteile mit unterschiedlichen Fasergehalten) kann die Gradierung der Fasern auch innerhalb eines Fertigteils erfolgen (vgl. Bild 4).

Im vorliegenden Projekt wurde das Prinzip einer Rotationsgradierung verfolgt. Das Verhalten von Partikeln (Glaskugeln und Stahlfasern) bei einer rotierenden Bewegung wurde in transparenten Polyacrylsäure-Gelen, deren rheologische Parameter mit denen von Beton vergleichbar sind, analysiert [7], [8]. Mithilfe einer Rotationsmaschine und einer transparenten Prismenschalung wurden Gele mit unterschiedlichen Fließgrenzen, die 1,25 Vol.-% Glaskugeln ($1,5 \text{ mm} \leq d \leq 2,0 \text{ mm}$) bzw. 0,5 Vol.-% Mikro-stahlfasern ($d / l = 0,20 / 6 \text{ mm}$) enthielten, mit variablen Geschwindigkeiten vertikal rotiert, Bild 5. Nach Überschreiten eines partikelgeometrieabhängigen Stabilitätskriteriums bewegten sich diese vom Rotationsmittelpunkt weg zu den äußeren Schalungsrändern.

Ziel dieser Untersuchungen war es, das dynamische Stabilitätskriterium der Glaskugeln zu

3.2 Functional grading of fibres

Higher torques are usually present in the supporting or connecting region of individual segments in a shell structure. By adjusting the fibre content to the prevailing stresses in the concrete component, it is possible to keep the thickness of the whole precast component constant and thus improve the efficiency as well as the aesthetics of the entire structure. As well as grading at the load-bearing level (precast components with different fibre contents), fibres can be graded within the individual precast components (Fig. 4).

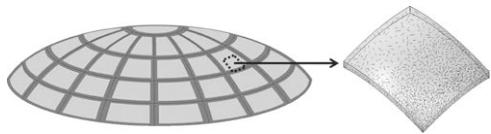


Bild 4: Funktionale Fasergradierung innerhalb eines Fertigteils – Randbereiche mit höherem Fasergehalt zum Abtrag lokal erhöhter Spannungen | **Fig. 4:** Functional fibre grading within a prefab – edge areas with higher fibre content to transfer locally increased stresses

The present project considered the principle of rotation grading. The behaviour of particles (glass beads and steel fibres) caused by rotation was analysed using transparent polyacrylic acid gels whose rheological parameters are similar to those of concrete [7], [8]. Gels with different yield stresses were investigated using a rotation machine and a transparent mould in the form of a rectangular prism. The gels contained 1.25 vol.% glass beads ($1.5 \text{ mm} \leq d \leq 2.0 \text{ mm}$) or 0.5 vol.% micro steel fibres ($d / l = 0.20 / 6 \text{ mm}$) and were vertically rotated at different speeds, Fig. 5. On exceeding a stability criterion depending on particle geometry, the particles moved

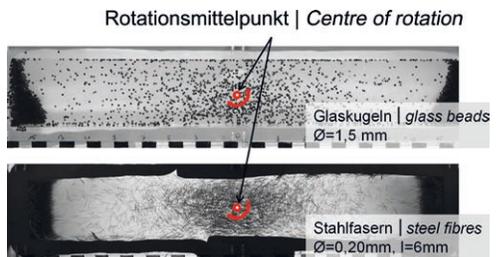


Bild 5: In Polyacrylsäure-Gel rotierte Glaskugeln (oben) und Stahlfasern (unten) | **Fig. 5:** Glass balls (top) and steel fibres (bottom) rotated in polyacrylic acid

bestimmen und mit dem in der Literatur [9] angegeben statischen Stabilitätskriterium zu vergleichen. So konnte auch das für die verwendeten Fasern ermittelte Stabilitätskriterium hinsichtlich Plausibilität geprüft und eingeordnet werden. Neben einem unteren dynamischen Stabilitätskriterium Y_{ud} (ab hier bewegen sich Fasern) wurde auch ein oberes dynamisches Stabilitätskriterium Y_{od} (keine Faserbewegung mehr, da keine Fasern mehr vorhanden) aus den beiden dynamischen Radien r_{ud} und r_{od} bestimmt, vgl. Bild 6, [7] und Gleichung (1).

$$Y_{ud/od} = \frac{\tau_0 \cdot r_{ud/od}}{\left(\frac{6 \cdot V}{\pi}\right)^{1/3} \cdot \Delta\rho \cdot v^2} \quad (1)$$

Mit: τ_0 Fließgrenze
 V Volumen der Stahlfaser
 $\Delta\rho$ Dichtedifferenz Stahl/Matrix
 v Umdrehungsgeschwindigkeit

Für die Glaskugeln wurde Y_{ud} mit 0,050 bestimmt und liegt damit leicht unter den von [9] ermittelten statischen Stabilitätskriterien mit 0,062 für raue und 0,088 für glatte Kugeln. Dort hatten die glatten Kugeln eine Rautiefe R_t von 1 μm , während die Kugeln der eigenen Untersuchungen eine Rautiefe R_t von bis zu 7 μm aufwiesen. Für die Mikrostaalfasern wurde Y_{ud} zu 0,018 er-

away from the centre of rotation to the outer edges of the mould.

The aim of these investigations was to determine the dynamic stability criterion of the glass beads and compare it with the static stability criterion given in the literature [9]. In this way, it was possible to check the plausibility of the stability criterion determined for the fibres as well as categorize it. In addition to a lower dynamic stability criterion Y_{ud} at which the fibres begin to move, an upper dynamic stability criterion Y_{od} (no more fibre movement because there are no more fibres) was determined from the two dynamic radii r_{ud} and r_{odr} , Fig. 6, [7] and Equation (1).

$$Y_{ud/od} = \frac{\tau_0 \cdot r_{ud/od}}{\left(\frac{6 \cdot V}{\pi}\right)^{1/3} \cdot \Delta\rho \cdot v^2} \quad (1)$$

Here: τ_0 Yield stress
 V Volume of steel fibres
 $\Delta\rho$ Density difference steel/matrix
 v Rotational speed

Y_{ud} was determined at 0.050 for the glass beads, a value which is slightly below the static stability criterion of 0.062 determined by

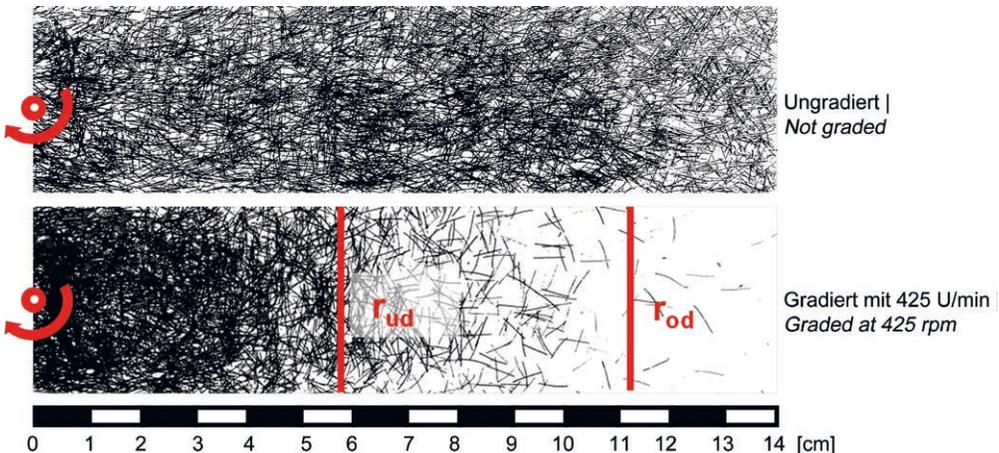


Bild 6: In Polyacrylsäure-Gel rotierte Stahlfasern mit r_{ud} und r_{od} | Fig. 6: Steel fibres rotated in polyacrylic acid gel with r_{ud} and r_{od}

mittelt. Die auf die Fasern wirkende Zentrifugalkraft nimmt mit größerem Abstand vom Rotationsmittelpunkt zu, sodass es bei Verwendung nur einer Faserart ein Bereich entsteht, in dem nahezu keine Fasern mehr vorhanden sind. Die aus diesem Bereich stammenden Fasern lagern sich am Schalungsende an. Der maximale Fasergehalt entspricht dort etwa 3 Vol.-%. Dieser Fasergehalt ermöglicht es wiederum, die Festigkeit einer durch Fügung geschwächten Zone zu steigern (vgl. Abschnitt 5). Da ein faserfreier Bereich jedoch unerwünscht ist, können auch gleichzeitig Fasern mit unterschiedlichen Abmessungen eingesetzt werden, sodass durch Steuerung der Rotationsgeschwindigkeit nur die größeren Fasern gradiert werden, während die feineren (z. B. Mikrostahtfasern) ungradiert in der Matrix verbleiben

Bild 7 zeigt eine mögliche Variante für zwei unterschiedliche Faserabmessungen, bei der bis zu einer Geschwindigkeit von rd. 225 m/s allein die größeren Fasern gradiert werden und so einen Beitrag für die Verstärkung des Randbereichs liefern. Für die Berechnung von r_{ud} und r_{od} wurde die Gleichung in Bild 6 ($\tau_0 = 8,6 \text{ Pa}$) herangezogen. Y_{ud} für die Fasern mit $d = 0,4 \text{ mm}$ wurde wie bei den feineren Fasern mit 0,018 angenommen, da die Gradiierung von Fasern mit $d/l = 0,4/16 \text{ mm}$ in Beton ein nahezu identisches Stabilitätskriterium von 0,017 ergab [10].

[9] for rough and 0.088 smooth beads, respectively. The surface roughness depth R_t of the smooth beads was $1 \mu\text{m}$ whereas the beads in the present investigations had surface roughness depths up to $7 \mu\text{m}$. Y_{ud} was found to be 0.018 for the micro steel fibres. The centrifugal force acting on the fibres increases with the distance to the centre of rotation. A region with almost no fibres forms if only one type of fibre is used. The fibres originating from this region accumulate at the edge of the mould where the maximum fibre content is about 3 vol.%. This fibre content makes it possible to increase the strength of a region weakened by construction joints (section 5). A region devoid of fibres is undesirable which can be avoided by combining fibres with different dimensions. The larger fibres can be graded by controlling the rotational speed whereas the finer (e.g. micro steel fibres) remain ungraded in the matrix.

Fig. 7 shows an example for two different fibre sizes. For speeds up about 225 m/s alone, only the larger fibres are graded thus contributing to the strength of the surface zone. The equation in Fig. 6 ($\tau_0 = 8.6 \text{ Pa}$) was used to calculate r_{ud} and r_{od} . A Y_{ud} of 0.018 for the fibres with $d = 0.4 \text{ mm}$ was also assumed to be valid for the finer fibres. This was because the grading of fibres with $d/l = 0.4/16 \text{ mm}$ in concrete yielded almost the same stability criterion, 0.017 [10].

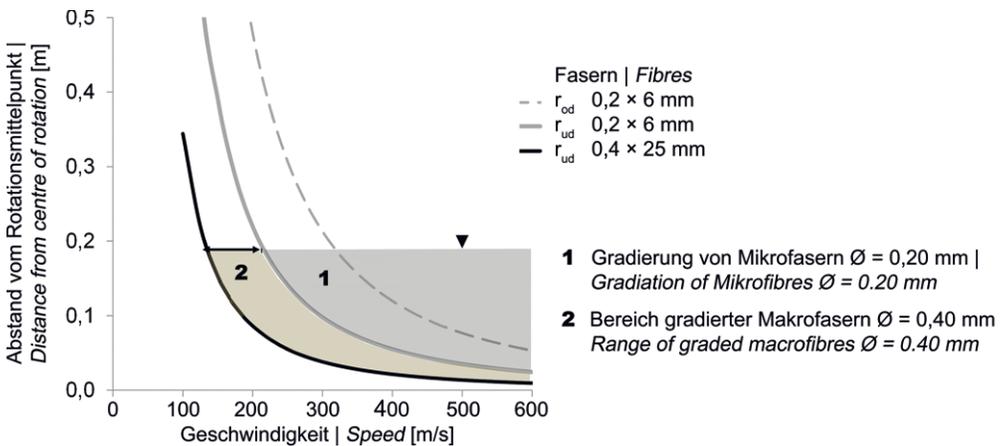


Bild 7: Benötigte Geschwindigkeit zur Gradiierung von Stahtfasern unterschiedlicher Abmessungen; oberhalb r_{ud} findet Faserbewegung statt | Fig. 7: Speed required for grading steel fibers of different dimensions; fiber movement starts above r_{ud}

Das Verfahren zur Bestimmung der Stabilitätskriterien ermöglicht es, bei bekannten Materialparametern für beliebige Betone und Fasern die Bereiche zu bestimmen, in denen eine Fasergradierung stattfindet. Damit wurde eine Grundvoraussetzung für die Schaffung effizienter Schalenträgerwerke gebildet.

4 Formfüllungseigenschaften

4.1 Experimentelle Untersuchungen

In Abschnitt 3.1.2 wurde gezeigt, dass sich mit Erhöhung des Fasergehaltes zur Steigerung der Zugfestigkeiten auch die Fließgrenze und Viskosität der Betone erhöhen. Die Verarbeitbarkeitseigenschaften verschlechtern sich. Der für die rheologischen Kenngrößen bestimmte max. relative Feststoffanteil $\text{rel } \phi$ (Fasern und Sand) von 0,8 konnte im Hinblick auf die Gewährleistung guter Formfüllung bestätigt werden. Mit $\text{rel } \phi > 0,8$ ist der Beton nicht mehr geeignet, dünnwandige Schalungen vollständig auszufüllen. Dies konnte durch Experimente zur Formfüllung von UHFB_A und UHFB_B mit Mikrostahtfasern $d / l = 0,20 / 6 \text{ mm}$ (-1) und $0,14 / 6 \text{ mm}$ (-2) in einer L-förmigen Modellschalung mit Abmessungen des horizontalen Schenkels von $1.200 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ gezeigt werden, Bild 8.

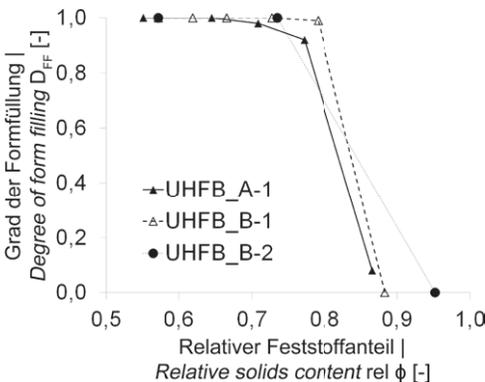


Bild 8: Grad der Formfüllung D_{FF} in L-förmiger Modellschalung (1,0 = vollständige Formfüllung; 0 = Blockieren des Betons) in Abhängigkeit von $\text{rel } \phi$ | **Fig. 8:** Degree of mould filling DFF in L-shaped model formwork (1.0 = complete mould filling; 0 = blocking of the concrete) as a function of ϕ_{rel}

If the material parameters are known, the method for determining the stability criteria enables the determination of the regions in which fibre grading takes place for any given concrete and fibres. This procedure is a basic requirement for the creation of efficient shell structures.

4 Properties affecting formwork filling

4.1 Experimental investigations

It is shown in section 3.1.2 that increasing the fibre content increases the tensile strength as well as the yield stress and viscosity of the concrete. At the same time the workability of the concrete worsens. A maximum relative solids content ϕ_{rel} (fibres and sand) of 0.8 to ensure good formwork filling was confirmed in the present work. If $\phi_{rel} > 0.8$ the concrete is no longer suitable for completely filling formwork with thin cross-sections. This was shown by the experiments for mould filling using UHFB_A and UHFB_B with micro steel fibres $d / l = 0.20 / 6 \text{ mm}$ (fibre 1) and $0.14 / 6 \text{ mm}$ (fibre 2) in an L-shaped model formwork with horizontal leg dimensions $1,200 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$, Fig. 8.

Reducing the cross-sectional height of the leg from 50 mm to 35 mm or 25 mm reduced the degree of filling of UHFB_A without fibres from 1.0 to 0.90 or 0.78, respectively. This effect was partially compensated by increasing the superplasticizer content of the mix. However, reducing the cross-sectional height also reduces the flow rate. Especially in the case of high-viscosity concretes, the low flow rate promotes thixotropic structuring which ends the flow process earlier [11]. Consequently, for cross-sections $< 50 \text{ mm}$ ϕ_{rel} (sand and fibres) < 0.8 must be observed in order to ensure complete formwork filling.

4.2 Prediction of flow properties with computational fluid dynamics

A new method based on experiments and simulations using computational fluid dynamics has

Mit Verringerung der Querschnittshöhe von 50 mm auf 35 mm bzw. 25 mm verschlechterte sich der Formfüllungsgrad des faserfreien UHFB_A von 1,0 auf 0,90 sowie 0,78. Dies konnte durch die Erhöhung des Fließmittelgehaltes der Mischung teilweise kompensiert werden. Jedoch sinkt bei Reduktion der Querschnittshöhe auch die Fließgeschwindigkeit. In der Folge kommt es gerade bei hochviskosen Betonen zu einem thixotropen Strukturaufbau und der Fließvorgang wird früher beendet [11]. Daraus folgt, dass bei Querschnitten < 50 mm rel φ (Sand und Fasern) < 80 % zur Gewährleistung einer vollständigen Formfüllung einzuhalten sind.

4.2 Vorhersage der Fließeigenschaften mit numerischer Strömungsmechanik

Um das Fließverhalten von UHFB in dünnwandigen Schalungen zu prognostizieren, wurde eine neue Methode auf Basis von Experimenten und Simulationen mit numerischer Strömungsmechanik (*Computational Fluid Dynamics*) entwickelt [12]. Durch Simulation von Versuchen im Rheometer mit der Kugelgeometrie konnten die Torsionsmomente mit den Parametern aus zwei anerkannten rheologischen Modellen (Ostwald, de Waele und Herschel-Bulkley [13]) durch Aufstellung von Ersatzfunktionen verknüpft werden. Diese Ersatzfunktionen ermöglichen es, die Parameter der rheologischen Modelle mithilfe der gemessenen Torsionsmomente direkt zu ermitteln. Mithilfe der so bestimmten Parameter wurden Simulationen zum Formfüllungsvermögen in der L-förmigen Modellschalung ($h = 50$ mm) durchgeführt, welche das experimentell ermittelte Fließverhalten bestätigen.

been developed to predict the flow behaviour of UHFB in formworks with thin cross-sections [12]. By simulating experiments in a rheometer with ball geometry, the moments of torsion can be linked to the parameters of two well-known rheological models (Ostwald, de Waele and Herschel-Bulkley [13]) with the help of substitutional functions. These functions enable the direct determination of the rheological model parameters from experimentally measured moments of torsion. Using these parameters, simulations were then performed for filling the L-shaped model formwork ($h = 50$ mm). The calculated degrees of filling confirmed the experimentally observed flow behaviour.

5 Realistic construction components with graded fibres

Simple curved shell segments were produced with both graded and constant fibre contents and then subjected to load [14]. The curvature corresponded to the maximum curvature of the shell optimized for pressure in Fig. 1 ($\kappa = 0.41 \text{ m}^{-1}$). The tests with structural components were designed so that the test specimens, supports and loads correspond to a real component with an increased fibre content in the area of joint 2 (Fig. 9, right). The mix composition was essentially that of UHFB_A. To avoid cracks due to restraint owing to the curvature, 8 wt.% CEM I 42.5 R were replaced in the mix by a shrinkage-reduced CSA cement. A minimum ductility in the region subjected to less load was ensured by a fibre content of 0.5 vol.%. The region of the joint was produced with fibre contents of either 1, 2, or 3 vol.%. For purposes of reference, joined shell sections were

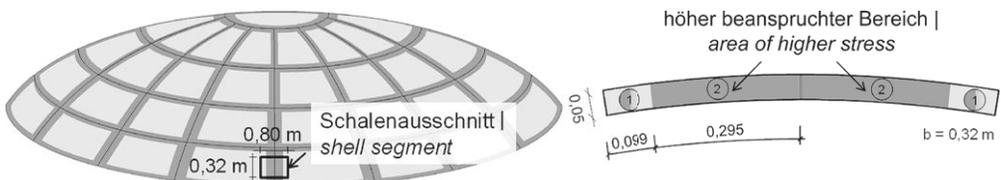


Bild 9: Mit Fertigteilen gefügte Schale (Fügebereiche mit höherem Fasergehalt aufgrund höherer Beanspruchung) und gewählter Ausschnitt für die realitätsnahe Prüfung eines gefügten Bauteils (Ansicht und Schnittdarstellung) | **Fig. 9:** Shell joined with finished parts (joining areas with higher fibre content due to higher stress) and selected section for realistic testing of a joined component (view and component section)

5 Realitätsnahe Bauteile mit gradier-tem Fasergehalt

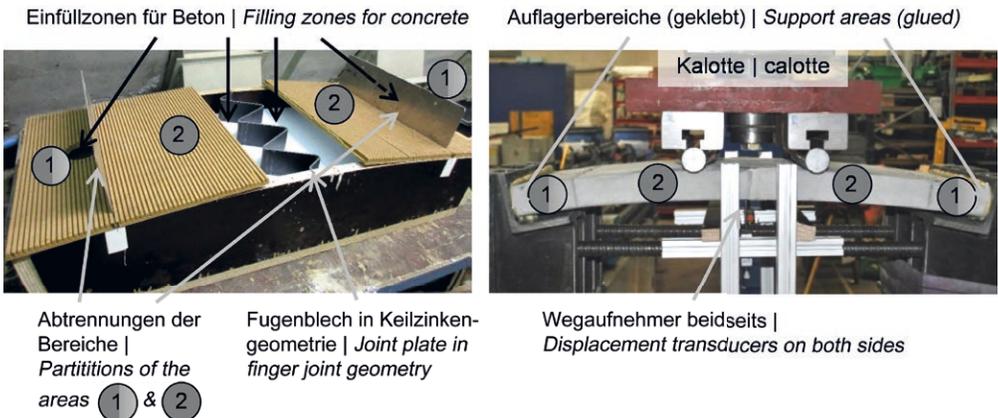
Es wurden einfach gekrümmte Schalensegmente sowohl mit gradierten als auch mit konstanten Fasergehalten hergestellt und anschließend belastet [14]. Die Krümmung entsprach der max. vorhandenen Krümmung der druckoptimierten Schale in Bild 1 ($\kappa = 0,41 \text{ m}^{-1}$). Die Bauteilversuche wurden so konzipiert, dass sowohl die Probekörper als auch Auflagerung und Belastung einem realitätsnahen Bauteil mit erhöhtem Fasergehalt im Bereich der Fügestelle 2 (Bild 9, rechts) entspricht. Die Mischungszusammensetzung entsprach im Wesentlichen UHFB_A. Zur Vermeidung von Rissen aus Zwang, bedingt durch die Krümmung, wurden 8 M.-% eines schwindreduzierten CSA-Zementes im Austausch gegen CEM I 42,5 R eingesetzt. Im geringer belasteten Bereich wurde durch einen Fasergehalt von 0,5 Vol.-% eine Mindestduktilität sichergestellt. Der Fugebereich enthielt Fasergehalte von 1, 2 bzw. 3 Vol.-%. Als Referenz wurden ungradierte gefügte Schalenabschnitte, ebenfalls mit Fasergehalten von 1, 2 bzw. 3 Vol.-%, hergestellt.

produced without grading fibre contents of 1, 2, or 3 vol.%.

In order to produce the curvature with high dimensional accuracy, the flowable concretes were poured into a mould which was almost closed. Fig. 10 shows the production (left) and testing procedures (right) of the joined shell segments. The joint was produced with a sheet metal strip based on the findings of the project Kohlmeier/Andrá (p. 412 seq.). This method ensured that both segments could be accurately joined after demoulding.

At an age of 5 d, the shell segments (Fig. 11) were heat-treated at 90 °C for 2 days in order to accelerate the development of strength. Afterwards, the joint surfaces of the segments were sandblasted which, according to [15], strengthens the bonding. A high-strength mortar HF10 supplied by the company Pagel [16] was used to fill the 3 mm wide joint.

The shell sections were subjected to a 4-point bending test (Fig. 10, right) with a maximum deflection of 22 mm; the load points were se-



- 1 **Gradierte Bauteile: Fasergehalt 0,5 Vol.-% | Graded elements: fibre content 0.5 vol.-%**
Bauteile mit **konstantem** Fasergehalt 0,5...3,0 Vol.-% | **Elements with constant fibre content 0.5...3.0 vol.-%**
- 2 **Fasergehalt 0,5...3,0 Vol.-% | Fibre content 0.5...3.0 vol.-%**

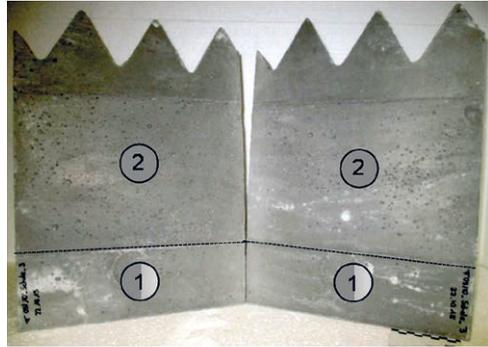
Bild 10: Schalung für gefügte Schalensegmente mit unterschiedlichen Einfüllzonen zur Realisierung der Fasergradierung (links) und Prüfung eines Schalensegments (rechts) | **Fig. 10:** Formwork for joined shell segments with different filling zones to realize fibre grading (left) and test of a shell segment (right)

Um die hohe Maßhaltigkeit insbesondere hinsichtlich der Krümmung zu erreichen, wurden die fließfähigen Betone bei nahezu geschlossener Schalung eingefüllt. Bild 10 zeigt die Herstellung (links) und Prüfung (rechts) der gefügten Schalensegmente. Es wurde ein Fugenblech, basierend auf den Erkenntnissen des TP Kohlmeier/Andrä (S. 412 ff.) eingesetzt. Dieses stellte sicher, dass nach dem Ausschalen beide Segmente exakt gefügt werden konnten.

Die Schalensegmente (vgl. Bild 11) wurden im Alter von 5 d für 2 d bei 90 °C wärmebehandelt, um die Festigkeitsentwicklung zu beschleunigen. Anschließend wurden die Fugenflächen der Segmente sandgestrahlt, was nach [15] den Haftverbund erhöht. Für die Verfüllung der 3 mm breiten Fuge wurde ein Hochfestmörtel HF10 der Fa. Pagel [16] verwendet.

Für die Prüfung wurden die Schalenabschnitte im 4-Punkt-Biegeversuch (Bild 10, rechts) mit 200 mm Abstand der Einzellasten weggeregelt mit 0,3 mm/min bis zu einer Durchbiegung von 22 mm belastet. Mit den gradierten Schalensegmenten konnte jeweils das gleiche Lastniveau erreicht werden wie bei den ungradierten, Bild 12. So stiegen die maximal aufnehmbaren Kräfte bei Erhöhung des Fasergehalts im Fugenbereich bei gradiertem bzw. im gesamten Bauelement bei ungradiertem Ausführung gleichermaßen von 0,5 auf 3,0 Vol.-% von 110 kN auf 139 kN. Werden nun die in den jeweiligen Schalenabschnitten insgesamt eingesetzten Fasergehalte auf einen ungradierten Schalenabschnitt mit 3,0 Vol.-% Fasern bezogen, zeigt sich, dass mit den gradierten Schalenabschnitten eine Einsparung von kosten- und energieintensiven Mikrostahtfasern von bis zu 21 % (0,5 / 3,0 Vol.-% – 3,0 / 3,0 Vol.-%) möglich ist.

Im Kontext eines gesamten Schalentragwerks sind die Einsparungen noch wesentlich höher, da die Fugenbereiche im Vergleich zum gesamten Tragwerk einen weit geringeren Anteil haben als bei den hier durchgeführten Bauteilversuchen. In Bild 12 ('gradiertes Tragwerk') ist dies exemplarisch unter der Annahme eines Fugenanteils von 50 % dargestellt. So können



- 1 **Gradierte Bauteile: Fasergehalt 0,5 Vol.-% | Graded elements: fibre content 0.5 Vol.-%**
Bauteile mit **konstantem** Fasergehalt 0,5 bis 3,0 Vol.-% | Elements with **constant** fibre content 0.5 to 3.0 Vol.-%
- 2 **Fasergehalt 0,5 bis 3,0 Vol.-% | Fibre content 0.5 to 3.0 Vol.-%**

Bild 11: Schalensegmente vor dem Fügen | Fig. 11: Shell segments before joining

pared by 200 mm and the deflection rate controlled at 0.3 mm/min. The same general load level was achieved with the graded shell sections as for those without fibre grading, Fig. 12. The maximum force increased from 110 to 139 kN with fibre content (0.5 to 3.0 vol.%) in the joint region of the shell section with fibre grading as well as for the sections without fibre grading. If the fibre contents used in the shell sections are related to an ungraded shell

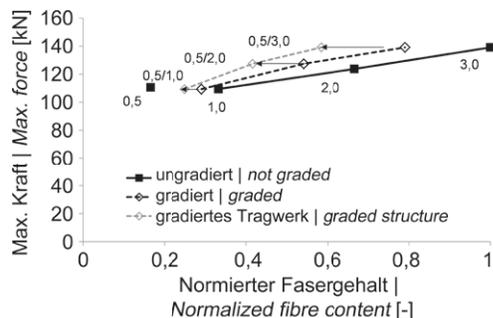


Bild 12: Maximale Kraft von gradierten und ungradierten Schalenabschnitten in Abhängigkeit des Fasergehaltes (bez. auf 3,0 Vol.-% ungradiert) | Fig. 12: Maximum force of graded and ungraded shell sections as a function of fiber content (referred to 3.0 vol.-% not graded)

über 40 % an Mikrostahtfasern eingespart werden, wenn im restlichen Querschnitt statt 3,0 Vol.-% nur 0,5 Vol.-% eingesetzt werden. Auch im Hinblick auf die Kosten der Mikrostahtfasern an den Stoffkosten des Betons (bei 3,0 Vol.-% Fasern mit 82 % der Gesamstoffkosten) ist eine beanspruchungsgerechte Gradierung des Fasergehaltes zielführend.

6 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse zur Herstellung effizienter Schalentragerwerke

Es wurde gezeigt, dass sowohl NB als auch UHFB zur Herstellung von Schalentragerwerken infrage kommen – je nachdem, ob ästhetische/ökonomische oder ökologische Anforderungen im Vordergrund stehen. Ferner wurde gezeigt, dass die Zusammensetzung des Betons und die eingesetzten Fasern aufeinander abgestimmt sein müssen, um eine ausreichende Formfüllung des Betons zu erreichen. Da die Erhöhung des Fasergehaltes zu einer Verschlechterung von Fließgrenze und Viskosität und somit der Formfüllung führt, müssen die zunächst faserfreien Betone eine möglichst geringe Viskosität aufweisen, sodass durch die spätere Faserzugabe für die Optimierung der Biegezugfestigkeit eine möglichst große Verarbeitbarkeitsspanne bleibt. Die untersuchten Betone zeigten bis zu einer Viskosität von $130 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ optimale Formfüllungseigenschaften.

Mit der Entwicklung einer Methode zur Vorhersage der Fließeigenschaften mithilfe der numerischen Strömungsmechanik wurde eine weitere wichtige Grundlage für die zielgerechte Herstellung von effizienten Betonfertigteilen geschaffen.

Durch eine funktionale Gradierung des Fasergehaltes zur Anpassung der Festigkeit an die jeweils vorherrschende Beanspruchung kann die Effizienz weiter gesteigert werden. Die Grundlagen hierzu wurden durch Rotationsuntersuchungen geschaffen, mit deren Ergebnis dynamische Stabilitätskriterien für beliebige Betone und Fasern ermittelt werden können und so der

section with 3.0 vol.% fibres, it becomes apparent that fibre grading can save up to 21% (0.5 / 3.0 vol.% to 3.0 / 3.0 vol.%) expensive and energy-intensive micro steel fibres.

Considering the shell structure as a whole, the savings are much higher because the proportion of joint regions in the whole structure is much lower than in the present tests. This is demonstrated, for example, in Fig. 12 ('graded structure') for 50% joint regions. More than 40% of micro steel fibres can be saved if the remaining cross section contains only 0.5 vol.% instead of 3.0 vol.% fibres. Since a high proportion of the cost of concrete is for micro steel fibres (82% in the case of 3.0 vol.% fibres), tailoring fibre grading to strength is very cost-effective.

6 Summary of main findings for producing efficient shell structures

It was shown that both normal concrete and UHFB can be used for the production of shell structures – depending on the particular aesthetic/economic or ecological requirements. It is also shown that the composition of the concrete and the fibres used must be matched in order to obtain a satisfactory degree of formwork filling with the fresh concrete. Since increasing the fibre content worsens yield stress and viscosity and therefore the degree of formwork filling, the initial concrete without fibres must have the lowest possible viscosity so that workability after fibre addition for optimising flexural strength is acceptable. Viscosities of up to $130 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ for the tested concretes enabled optimal mould-filling properties.

The development of a method to predict fresh concrete flow using numerical fluid mechanics provides a basis for the targeted production of efficient precast concrete components.

Efficiency is increased by functional grading the fibre content of concrete to optimise strength to the real stress distribution in the concrete component. The basis for this was created in tests with rotation whose results enable the determi-

gradierte Bereich vorab festgelegt werden kann. Versuche an großformatigen Bauteilabschnitten haben gezeigt, dass die Gradierung des Fasergehaltes zu einem gleichwertigen Tragverhalten im Vergleich zu Bauteilabschnitten mit konstant hohem Fasergehalt führt und so ökologische und ökonomische Vorteile mit sich bringt.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198068157 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

nation of dynamic stability criteria for any given concrete with fibres and the specification of the graded region in advance.

Tests on large-scale component sections have shown that the load-bearing behaviour of concrete with fibre grading is equivalent to that of component sections with a constant ungraded fibre content. Thus fibre grading is ecologically and economically advantageous.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (no. 198068157) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Breitenberger, M.; Bletzinger, K.-U.: Entwerfen, Berechnen und Optimieren von Betonschalen mit der isogeometrischen B-Rep-Analyse. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1*, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 236–241 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171462>
- [2] Stengel, T.: *Verbundverhalten und mechanische Leistungsfähigkeit von Stahlfasern in ultrahochfestem Beton*. Diss., TU München, 2013
- [3] Illguth, S.; Gehlen, C.; Lowke, D.: Ultra High Strength Fibre-Reinforced Concrete for Thin-Walled Precast Elements. In: KIVI (Hrsg.): *Future Visions – Proc. of the IASS Annual Symp. 2015*, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), Beitrag Nr. IASS2015-523421, publiziert auf USB-Stick: 11 S.
- [4] Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Faserbewehrter Ultrahochfester Beton für filigrane Bauteile. In: Ludwig, H.-M. (Hrsg.): *Tagungsband zur 19. Int. Baustofftagung ibausil*, 16.–18.09.2015 in Weimar, Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, 2015, S. 1.1311–1.1318
- [5] Stengel, T.; Schiessl, P.: Sustainable with UHSC – from Life Cycle Inventory Data Collection to Environmental Impact Assessment. In: Fehling, E.; Schmidt, M.; Stürwald, S. (Hrsg.): *Proc. of 2nd Int. Symp. on UHSC*, 05.–07.03.2008 in Kassel, Kassel: kassel university press, 2008, S. 461–468
- [6] Fehrenbach, A.: *Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Biegezugfestigkeit ultrahochfester Betone*. Bachelor's Thesis, TU München, 2015
- [7] Weger, D.: *Untersuchungen zum Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Stahlfasern mithilfe von Carbopol-Gelen*. Master's Thesis, TU München, 2013
- [8] Behounek, B.: *Untersuchungen zum Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Glaskugeln mithilfe von Carbopol-Gelen*. Bachelor's Thesis, TU München, 2015
- [9] Jossic, L.; Magnin, A.: Drag and Stability of Objects in a Yield Stress Fluid. *AIChE Journal* 47 (2001) 12, S. 2666–2672
- [10] Klein, N.: *Erste Untersuchungen zur Rotationsgradierung von Faserbeton*. Bachelor's Thesis, TU München, 2013
- [11] Kränkel, T.; Mazanec, O.; Lowke, D.; Gehlen, C.: *Anwendungsorientierte Optimierung und Klassifizierung der rheologischen Eigenschaften von UHPC – Rheologie, Verarbeitungseigenschaften und Formfüllung*. Ergebnisbericht zum DFG-Vorhaben GE 1973/8-1, TU München, 2014, 10 S.
- [12] Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: *Zum Formfüllungsvermögen dünnwandiger Schalungen – Experiment und Simulation*. In: *Förderverein-Baustoff-Forschung e.V. (Hrsg.): Tagungsband zum 12. Münchener Baustoffseminar am 27.03.2014*, München: cbm, 2014, S. 35–40
- [13] Chhabra, R. P.; Richardson, J. F.: *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology – Engineering Applications*. 2. Aufl., IChemE series, Butterworth-Heinemann, 2008 – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.X0001-7>

- [14] Winkler, L.: Einfluss der Fasergradierung auf die Bauteiltragfähigkeit von gefügten Schalenabschnitten. Master's Thesis, TU München, 2016
- [15] Oltra, J. V. C.: Einfluss von Beton- und Herstelltechnologie auf die Haftzugfestigkeit von faserbewehrten ultrahochfesten Betonen. Bachelor's Thesis, TU München, 2015
- [16] PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG: Technisches Merkblatt 0221 HF10 PAGEL-HOCHFESTVERGUSS. Online: www.pagel.com/all/pdf/de/hf10_de.pdf (geprüft am 30.07.2019)

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1, 2, 7, 8, 12: Sandy Illguth
- Bild | Picture 3: TU München, Fakultät für Chemie
- Bilder | Pictures 4, 9: Sandy Illguth, Dirk Lowke
- Bild | Picture 5 (oben | top): Benedikt Behounek
- Bilder | Pictures 5 (unten | below), 6: Daniel Weger
- Bild | Picture 10: Lisa Winkler, Sandy Illguth
- Bild | Picture 11: Lisa Winkler

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Funktionale Gradierung, Schalungs- und Herstelltechnologie unter Berücksichtigung der Segmenttopologie | Functional grading, formwork and manufacturing technology with consideration of segment topology

Antragsteller Applicant :	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen Professor und Lehrstuhlinhaber Professor and chair holder
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	GE 1973/8-1 (Projektnummer Project number: 198068157)
Adresse Address:	TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Baumbachstraße 7, 81245 München
Kontakt Contact:	+49 890 289 27061 gehlen@tum.de www.bgu.tum.de/cbm
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	10/2011–09/2014 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 30.06.2015
Team Team:	Sandy Illguth Thomas Kränkel (2014/15) Dirk Lowke

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Rheology of Fibre Reinforced Fine-Grained High Performance Concrete for Thin-Walled Elements – Effect of Type and Content of Steel Fibres. In: Roussel, N.; Bessaies-Bey, H. (Hrsg.): Proc. of the 1st Int. RILEM Conf. on Rheology and Processing of Construction Materials and the 7th RILEM Conf. on Self-Compacting Concrete, 02.–04.09.2013 in Paris (Frankreich), Paris: RILEM Publications SARL, 2017, S. 309–316
- Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Zum Formfüllungsvermögen dünnwandiger Schalungen – Experiment und Simulation. In: Förderverein-Baustoff-Forschung e.V. (Hrsg.): Tagungsband zum 12. Münchener Baustoffseminar am 27.03.2014, München: cbm, 2014, S. 35–40
- Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Effiziente Schalentragwerke aus funktional gradierten Betonfertigteilen – Funktionale Gradierung, Schalungs- und Herstelltechnologie unter Berücksichtigung der Segmenttopologie. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 152–161 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171462>
- Illguth, S.; Gehlen, C.; Lowke, D.: Ultra High Strength Fibre-Reinforced Concrete for Thin-Walled Precast Elements. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Annual Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), Beitrag Nr. IASS2015-523421, publiziert auf USB-Stick: 11 S.

- Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Faserbewehrter Ultrahochfester Beton für filigrane Bauteile. In: Ludwig, H.-M. (Hrsg.): Tagungsband zur 19. Int. Baustofftagung ibausil, 16.–18.09.2015 in Weimar, Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, 2015, S. 1.1311–1.1318

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Masterarbeiten | Master's Theses

- Faulenbach, N.: Ökologische Bewertung von Schalentragwerken. 2013
- Weger, D.: Untersuchungen zum Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Stahlfasern mithilfe von Carbopol-Gelen. 2013
- Winkler, L.: Einfluss der Fasergradierung auf die Bauteiltragfähigkeit von gefügten Schalenabschnitten. 2016

Bachelorarbeiten | Bachelor's Theses

- Klein, N.: Erste Untersuchungen zur Rotationsgradierung von Faserbeton. 2013
- Arnold, T.: Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit von stahlfasergradierten Balken. 2015
- Behounek, B.: Untersuchungen zum Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Glaskugeln mithilfe von Carbopol-Gelen. 2015
- Fehrenbach, A.: Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Biegezugfestigkeit ultrahochfester Betone. 2015
- Oltra, J. V. C.: Einfluss von Beton- und Herstelltechnologie auf die Haftzugfestigkeit von faserbewehrten ultrahochfesten Betonen. 2015