

## Textilbeton: Tragverhalten – Bemessung – Sicherheit

Josef Hegger<sup>1</sup>, Norbert Will<sup>2</sup>, Maike Schneider<sup>3</sup>

**Zusammenfassung:** Für die Anwendung des Verbundwerkstoffes „Textilbewehrter Beton“ sind die numerischen und experimentellen Grundlagenerkenntnisse zum Tragverhalten von Bauteilen in für die Baupraxis geeignete Nachweismodelle und Konstruktionsregeln zu überführen. Die aus dem Stahlbetonbau bekannten Ansätze müssen wegen der abweichenden Material- und Verbundeigenschaften für textilbewehrte Betonbauteile angepasst werden. Im Beitrag werden die grundlegenden Tragmechanismen textilbewehrter Elemente unter Zug-, Biege- und Querkraftbeanspruchung sowie punktförmiger Zugbeanspruchung beschrieben und die aus den Untersuchungsergebnissen abgeleiteten Nachweismodelle vorgestellt. Darauf aufbauend werden Sicherheitsbeiwerte für die textile Bewehrung ermittelt und die Berechnungsmodelle in ein Sicherheitskonzept eingebunden. Als einheitlicher Teilsicherheitsbeiwert für Textilbeton wird  $\gamma_{tex} = 1,5$  vorgeschlagen.

**Summary:** For the application of the composite material Textile Reinforced Concrete (TRC) the numerical and experimental knowledge of the load bearing behaviour of construction elements has to be transferred into design models and construction rules applicable for the practice. Due to differences in the material and bond properties the design approach known for steel reinforced concrete has to be adjusted for textile reinforced concrete construction parts. In this paper the basic load-bearing mechanisms of textile reinforced concrete under tension, bending and shear loading as well as under concentrated tensile loading are described and empirically derived design models are presented. Based on the experimental results safety factors for the textile reinforcements are determined and the design models are integrated into an overall safety concept. A partial safety factor for textile reinforced concrete of  $\gamma_{tex} = 1,5$  is recommended.

---

<sup>1</sup> Prof. Dr.-Ing., Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

<sup>2</sup> Dr.-Ing., Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

<sup>3</sup> Dipl.-Ing., Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

## 1 Einleitung

### 1.1 Allgemeines

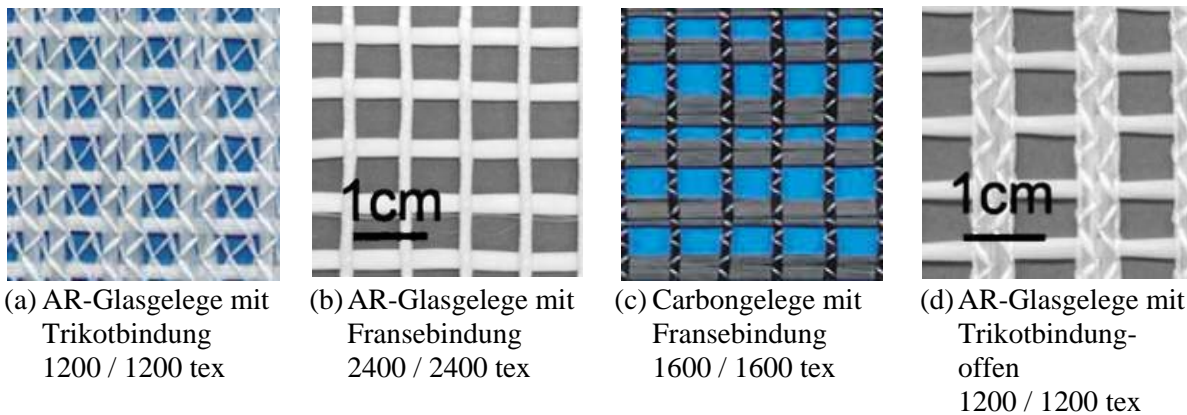
Der innovative Verbundwerkstoff textildbewehrter Beton (kurz: Textilbeton) erschließt neue Anwendungsgebiete im Betonbau. Durch die Verwendung nicht-korrozierender technischer Textilien aus alkaliresistentem Glas oder Carbon können die Betondeckungen minimiert und extrem schlanke Betonbauteile realisiert werden. Die Herstellung dauerhaft gebrauchstauglicher Bauteile aus textildbewehrtem Beton erfordert Bemessungs- und Konstruktionsregeln, die das Tragverhalten des Baustoffes wirklichkeitsnah wiedergeben. Somit sind konsistente Bemessungsmodelle und Konstruktionsregeln für Textilbetonbauteile unter Berücksichtigung verschiedener Materialeigenschaften, Belastungszustände, Herstellungsmethoden (Produktionsverfahren / Bewehrungstechnik), Betriebsbeanspruchungen sowie sicherheitstheoretischer Aspekte bereitzustellen.

Das Tragverhalten textildbewehrter Bauteile wird maßgeblich von den Eigenschaften der textilen Bewehrung bestimmt, deren Multifilamentgarne andere Material- und Verbundeigenschaften als Betonstähle aufweisen. Deshalb kann das Tragverhalten von Textilbeton nicht mit den aus dem Stahlbetonbau bekannten Modellen beschrieben werden. Aufgrund der inhomogenen Querschnitte der Rovings und der daraus resultierenden ungleichmäßigen Spannungsverteilung kann die theoretische Bruchkraft eines Garnes nicht ohne zusätzliche Anpassung als Produkt aus Filamentfestigkeit und Rovingfläche berechnet werden.

Zur systematischen Untersuchung des Tragverhaltens von textildbewehrtem Beton wurden im SFB 532 an der RWTH Aachen das Tragverhalten und die Tragfähigkeit in Bauteilversuchen untersucht. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse dargestellt, die Mechanismen des Tragverhaltens beschrieben und empirisch abgeleitete Berechnungsmodelle vorgestellt. Wegen der Streuungen der Materialkennwerte werden zur Berücksichtigung der Modellunsicherheiten in den Ingenieurmodellen Teilsicherheitsbeiwerte zur Einbindung der Berechnungsmodelle in ein Sicherheitskonzept hergeleitet.

### 1.2 Materialien

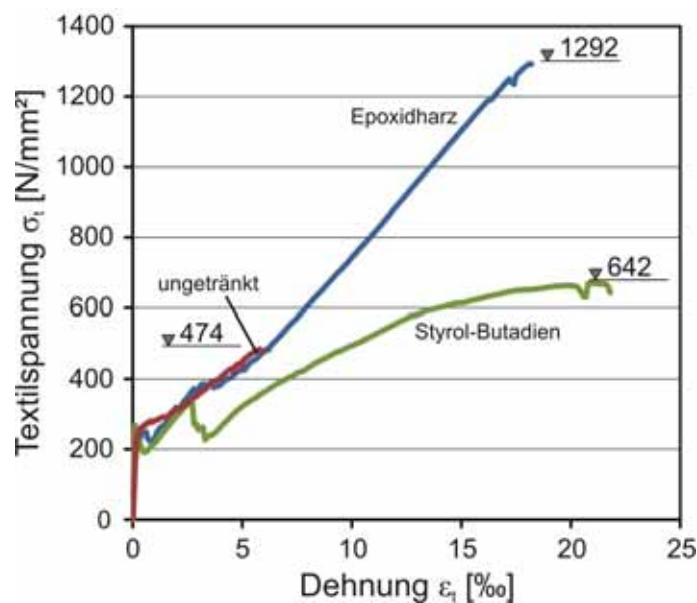
Als Beispiele für die verwendeten textilen Bewehrungen zeigt Bild 1 zweidimensionale Gelege aus AR-Glas oder Carbon. Die textile Bindung beeinflusst über die Verbundeigenschaften und Verschiebefestigungen der Rovings sowohl die Tragfähigkeit als auch die Verarbeitbarkeit. Die Trikotbindung (Bild 1a) erzeugt einen deutlich weniger komprimierten Rovingquerschnitt als die Fransebindung (Bild 1b+c). Deshalb werden Gelege mit Trikotbindung aufgrund der besseren Matrixpenetration besser ausgenutzt als vergleichbare Gelege mit Fransebindung, haben aber eine geringere Strukturstabilität.



**Bild 1:** Auswahl untersuchter Textiler Bewehrungen

**Fig. 1:** Different types of textile reinforcement

Der Einsatz ungetränkter Textilien als Bewehrung bietet sich wegen der besseren Verformungsfähigkeit u. a. für gekrümmte flächige Schalentragwerke an. Werden die Textilien in einem weiteren Arbeitsschritt mit Tränkungssystemen (z. B. Styrol-Butadien oder Epoxidharz) getränkt, lassen sich die Bruchspannungen der Textilien und damit deren Effektivität erheblich steigern. Exemplarisch zeigt Bild 2 Spannungs-Dehnungslinien von ungetränktem AR-Glas im Vergleich zu getränkten Textilien mit Styrol-Butadien und Epoxidharz.



**Bild 2:** Vergleich der Textilspannungen für unterschiedliche Tränkungsmaterialien (AR-Glas 2400 tex, Textilspannungen am Verbundkörper ermittelt) aus [1]

**Fig. 2:** Comparison of different impregnations (AR-glass 2400 tex, textile stresses determined at composite section) in [1]

Mit einer Epoxidharztränkung wurde eine Verdreifachung der Bruchspannungen erreicht. Neben den besseren Trageigenschaften lassen sich getränkte Textilien einfacher im Fertigteilwerk handhaben, sind robuster beim Bewehrungseinbau und formstabiler beim Betonieren. Weiterhin können damit Formbewehrungen z.B. für Plattenbalken hergestellt werden.

Die geometrischen Eigenschaften der textilen Bewehrungsstrukturen erfordern besondere rheologische Beschaffenheit und spezielle Größtkorndurchmesser des Betons, um die Bewehrung durchdringen zu können. Daher wurden im SFB 532 auf den textilbewehrten Beton ausgerichtete Betonmischungen entwickelt [3]. Die für die Bemessung erforderliche Spannungsdehnungslinie des Feinbetons kann mit dem Ansatz nach DIN 1045-1 [4] unter Berücksichtigung der experimentell ermittelten Bruchdehnungen zutreffend beschrieben werden. Für bereits realisierte Praxisanwendungen wurden auch Betone mit einem Größtkorn bis zu 8 mm mit entsprechend angepassten Textilien eingesetzt [1], [5].

## **2 Tragverhalten und Ingenieurmodelle**

### **2.1 Allgemeines**

Die Trag- und Verbundeigenschaften textiler Bewehrungen im Verbundquerschnitt wurden in axialen Dehnkörperversuchen unter statischer und dynamischer Last [6], [7] ermittelt. Nach den vorliegenden Ergebnissen wird das Tragverhalten des Verbundbauteiles im Wesentlichen vom Fasermaterial, der textilen Bindung, einer textilen Tränkung, der Garnorientierung zur Krafrichtung, dem Auftreten von Querspannungen und der Herstelltechnik beeinflusst. Die untersuchten Parameter, z.B. die Textilstruktur und Orientierung der Bewehrung zur Krafrichtung, gehen in die empirischen Beiwerte der Bemessungsgleichungen ein und werden in [7] detailliert beschrieben. Die ungleichmäßige Aktivierung einzelner Filamente im Garnquerschnitt, die aus der Heterogenität der Garn- und Verbundstruktur resultiert [8], wird ebenfalls durch empirische Beiwerte erfasst. Insbesondere das ungleichmäßige Eindringen der Matrix in das Garn und die Welligkeit einzelner Filamente führen zu einem reißverschlussartigem Versagen im Riss. Im Vergleich mit der reinen Filamentfestigkeit ergibt sich somit ein deutlich niedrigeres Spannungsniveau [9]. Zusätzlich sind bei der Bemessung von Textilien aus AR-Glasfasern Festigkeitsverluste aufgrund der Alkalität des Betons zu berücksichtigen.

### **2.2 Zugbeanspruchung**

Im Bruchzustand wird die Tragfähigkeit des textilbewehrten Elements nur von der Zugtragfähigkeit der Bewehrung bestimmt. Rissüberbrückende Zugspannungen im Beton können

aufgrund der beobachteten Rissbreiten ausgeschlossen werden. Die Zugtragfähigkeit  $F_t$  des Verbundquerschnitts wird nach Gleichung (1) ermittelt:

$$F_t = A_t \cdot f_{fil} \cdot k_1 \cdot k_{0,\alpha} \cdot k_2 \quad (1)$$

mit  $A_t$  Querschnittsfläche der Bewehrung [mm<sup>2</sup>]

$f_{fil}$  Filamentzugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$$k_1 \text{ Effektivitätsfaktor nach Tabelle 1: } k_1 = \frac{\sigma_{tex,max}}{f_{fil}} \quad [-] \quad (2)$$

$$k_{0,\alpha} \text{ Beiwert für schiefwinklige Beanspruchung: } k_{0,\alpha} = 1 - \frac{\alpha}{90} \quad [-] \quad (3)$$

$\alpha$  Winkel zwischen Kraft- und Kettfadenrichtung

$k_2$  Beiwert für zweiaxiale Beanspruchung [-]

$$k_2 = \begin{cases} 0,74 & \text{bei Querzug} \\ 1,0 & \text{bei Querdruck} \end{cases}$$

$\sigma_{tex,max}$  Textilbruchspannung im Beton [N/mm<sup>2</sup>].

Als Bezugsgröße für die Effektivität  $k_1$  der textilen Bewehrung wird die Filamentzugfestigkeit  $f_{fil}$  eingesetzt. Der Beiwert  $k_1$  ergibt sich nach Gleichung (2) als Verhältnis der Textilbruchspannung  $\sigma_{tex,max}$  im Beton zur Filamentzugfestigkeit  $f_{fil}$  und ist für eine Vielzahl unterschiedlicher Gelege in Tabelle 1 angegeben.

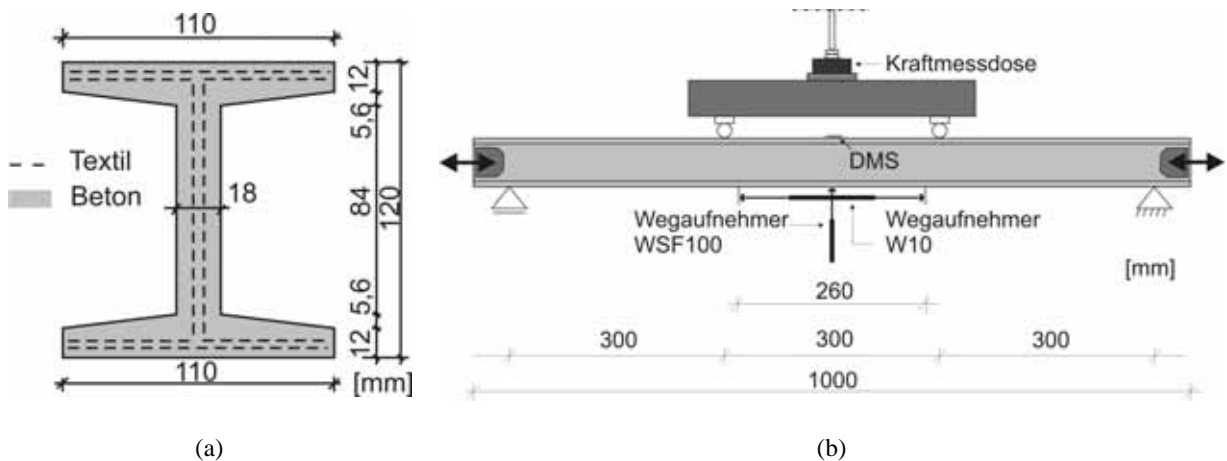
**Tabelle 1:** Effektivität  $k_1$  für die Kettrichtung verschiedener Gelege (Herstellverfahren: Gießen)

**Table 1:** Efficiency factor  $k_1$  for the warp threads of the textile reinforcement (fabrication method: pouring of the concrete)

Fasermaterial	Rovingtiter	Bindung	Stichlänge [mm]	$k_{1,Kett}$ [-]
AR-Glas	1200 tex	Trikot	2,1	0,29
			4,2	0,32
			6,3	0,31
		Franse	2,1	0,22
			4,2	0,26
			6,3	0,27
	2400 tex	Trikot	2,1	-
			4,2	0,26
			6,3	0,30
		Franse	2,1	0,24
			4,2	0,22
			3100 tex	Franse
Carbon	1600 tex	Trikot	6,3	0,19
		Franse	2,1	0,23
	1650 tex	Franse mit Teilschuss	-	0,15

### 2.3 Biegebeanspruchung

Das Tragverhalten unter Biegebeanspruchung wurde in Vier-Punkt-Biegeversuchen mit Doppel-T-Profil untersucht (siehe Bild 3).



**Bild 3:** Querschnitt der I-Profil-Balken (a); Aufbau der Biegeversuche (b)

**Fig. 3:** Cross-section of I-beam (a); test-set-up of bending tests (b)

Bei Carbon- und Glasgelegen mit Trikotbindung wurde wegen der Bauteilbiegung eine höhere Ausnutzung der textilen Bewehrung als bei axialer Beanspruchung in Dehnkörperversuchen ermittelt. In der Berechnung des Biegetragverhaltens wird dies mit dem Faktor  $k_{fl}$  nach Gleichung (4) erfasst.

$$k_{fl} = \frac{\sigma_{tex,max,fl}}{\sigma_{tex,max}} \quad (4)$$

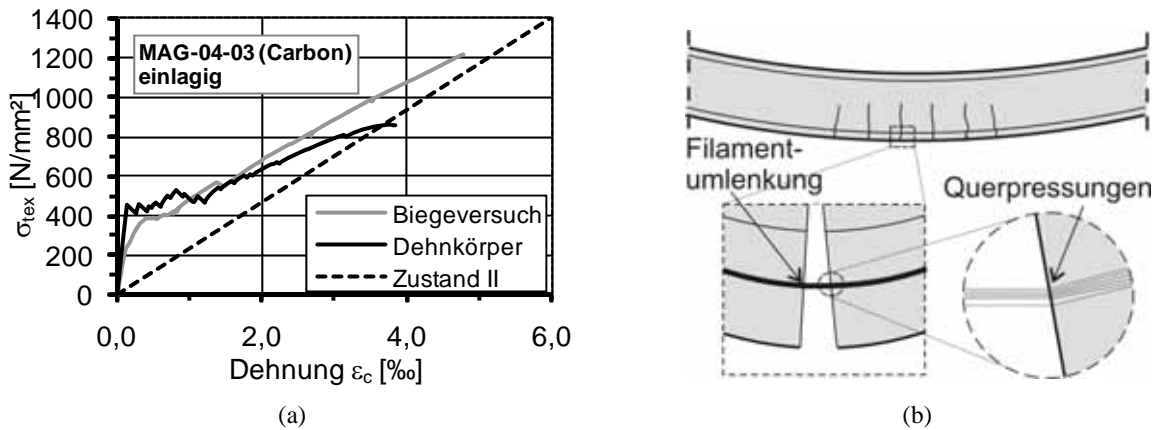
mit  $\sigma_{tex,max,fl}$  Textilbruchspannung im Biegeversuch

$\sigma_{tex,max}$  Textilbruchspannung im Dehnkörperversuch

Neben der höheren Bruchspannung wurde beim Biegeversuch im Zustand II auch ein steiferes Tragverhalten als im Dehnkörperversuch festgestellt (Bild 4a).

Beide Effekte sind auf die größeren Verbundspannungen zwischen den inneren Filamenten aufgrund der Bauteilkrümmung zurückzuführen (Bild 4b). Die damit verbundenen Querpressungen verbessern die Verbundkraftübertragung zwischen den inneren Filamenten, so dass sich diese mehr an der Aufnahme der Zugkraft beteiligen; die Bewehrung wird besser ausgenutzt. Nach [7] ist bei den im Bauteil auftretenden Krümmungen auch keine signifikante Schädigung durch die auftretende Filamentumlenkung der textilen Bewehrung zu erwarten. Die mit steigendem Bewehrungsgrad zunehmende Bauteil-Bruchdehnung verursacht eine

größere Dehnung der inneren Filamente und damit ebenfalls in eine bessere Aktivierung der Bewehrung.



**Bild 4:** Textilspannungs-Dehnungsverläufe im Dehnkörper- und Biegeversuch (a); Filamentumlenkung an den Risskanten (b)

**Fig. 4:** Textile stress-strain-diagrams (bending and tensile tests) (a); direction change of the filaments at the crack edges (b)

Das für das Biegetragverhalten angenommene Ingenieurmodell basiert auf dem Stahlbetonbau. Die Biegetragfähigkeit wird somit durch die Zugtragfähigkeit der Bewehrung  $F_t$ , die Tragfähigkeit der Betondruckzone, den inneren Hebelarm  $z$  sowie dem zuvor beschriebenen Einfluss  $k_{fl}$  aus der Bauteilbiegung bestimmt. Für die Biegetragfähigkeit  $M_u$  textilbewehrter Elemente ergibt sich damit:

$$M_u = F_t \cdot k_{fl} \cdot z \quad (5)$$

mit  $F_t$  Zugtragfähigkeit nach Gleichung (1)

$k_{fl}$  Beiwert für Biegebeanspruchung und Bewehrungsgrad in Abhängigkeit des Fasermaterials und des textilen Bindungstyps:

AR-Glas:  $k_{fl} = 1,0$  (Fransebindung)

$k_{fl} = 1,0 + 0,11 \cdot \rho_{geom}$  (Trikotbindung)

Carbon:  $k_{fl} = 1,0 + 0,35 \cdot \rho_{geom}$  (Fransebindung)

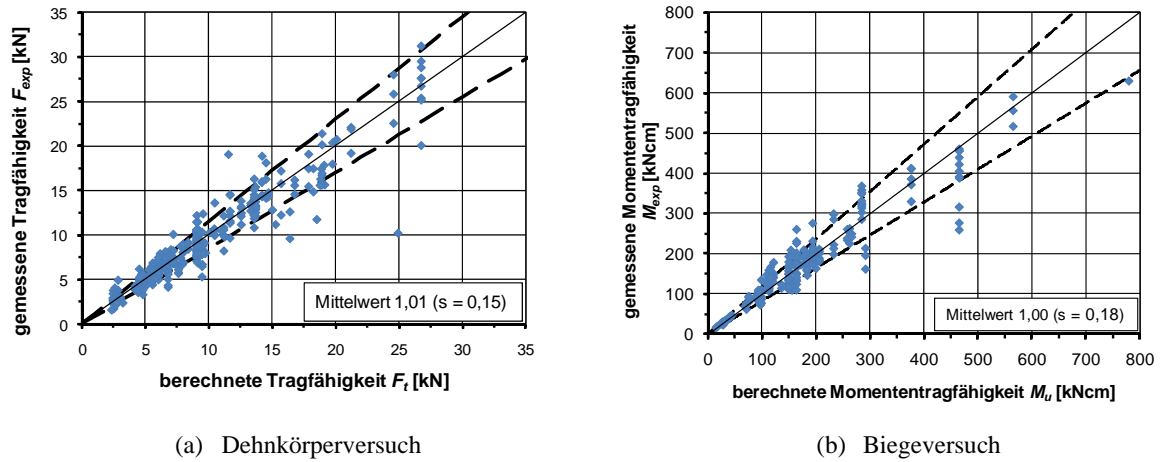
$k_{fl} = 1,0 + 0,99 \cdot \rho_{geom}$  (Fransebindung mit Teilschuss)

$\rho_{geom}$  geometrischer Längsbewehrungsgrad in [%]

$z$  innerer Hebelarm

Der innere Hebelarm  $z$  ergibt sich aus der Iteration der Dehnungsebene. Als Materialgesetz für den Beton wird nach [3] das Parabel-Rechteckdiagramm nach DIN 1045-1 angenommen,

wobei die größeren Dehnungswerte des Feinbetons zu berücksichtigen sind. Das linear-elastische Spannungs-Dehnungsverhalten der textilen Bewehrung wird mit dem Elastizitätsmodul und der Zugfestigkeit nach Herstellerangabe beschrieben. Die Gegenüberstellung der im Versuch erreichten Zug- und Biegetragfähigkeiten mit den berechneten Werten nach Gleichung (1) bzw. Gleichung (5) und die daraus ermittelten Mittelwerte und Standardabweichungen zeigt Bild 5.

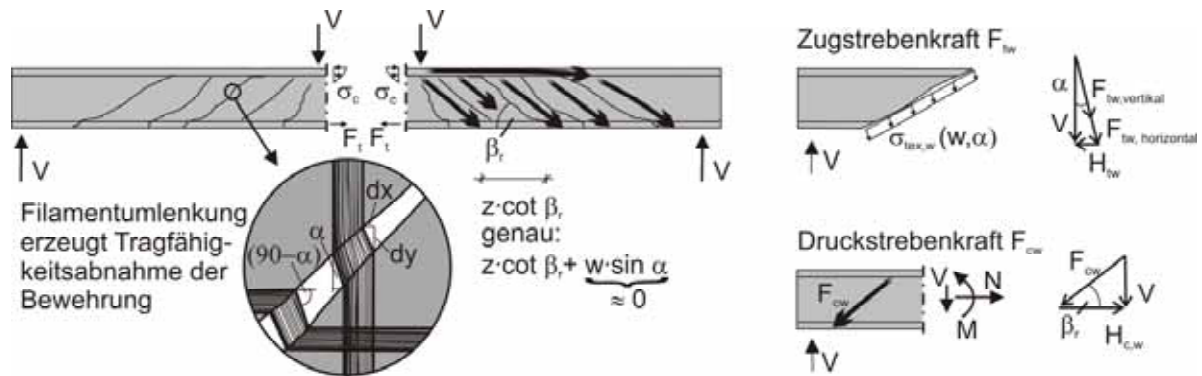


**Bild 5:** Vergleich experimenteller und rechnerischer Tragfähigkeit

**Fig. 5:** Comparison of experimental and calculated load-bearing capacity

### 2.4 Querkraftbeanspruchung

Die Tragmodelle der Querkrafttragfähigkeit für Bauteile mit und ohne Querkraftbewehrung sind in [7] beschrieben (Bild 6).



**Bild 6:** Tragmechanismen des Fachwerkmodells

**Fig. 6:** Load-bearing behaviour with strut-and-tie model



Für Bauteile ohne Querkraftbewehrung stellt der Lastabtrag über die ungerissene Druckzone den maßgebenden Tragmechanismus dar und im Bruchzustand ist aufgrund der vollständigen Separation der Rissufer keine Rissreibung vorhanden. In Bauteilen mit Querkraftbewehrung treten neben der Fachwerktragwirkung weitere Tragmechanismen auf, deren Einfluss mit zunehmendem Querkraftbewehrungsgrad abnimmt. Dabei beteiligt sich neben der lotrechten und schräg geneigten Stegbewehrung auch die Steglängsbewehrung aufgrund der Umlenkung an den Risskanten an der Querkrafttragfähigkeit (Bild 6).

Die Querkrafttragfähigkeit ergibt sich als Summe aus Betontraganteil  $V_c$  und Fachwerktraganteil  $V_f$ . Da die Druckstrebentragfähigkeit textilbewehrter Bauteile durch die Gefügeschädigung des Betons infolge der geringeren Rissabstände und zusätzlicher Querkraftspannungen aus den Kraftumlenkungen um die weiche textile Stegbewehrung abnimmt, ist für querkraftbewehrte Bauteile das Steifigkeitsverhältnis zwischen Betontraganteil und Fachwerktraganteil analog zum Modell von Goertz [11] mit dem Beiwert  $\kappa_f$  nach Gleichung (7) zu erfassen.

$$V = V_F + \kappa_f \cdot V_c \quad (6)$$

mit  $V_F$  Fachwerktraganteil

$$\kappa_f \quad \text{Steifigkeitsbeiwert des Betontraganteils: } \kappa_f = 1 - 17 \cdot \omega_E \geq 0 \quad (7)$$

$$\omega_E \quad \text{steifigkeitsbezogener Querkraftbewehrungsgrad: } \omega_E = \frac{a_{tw} \cdot E_{fil}}{b_{s,eff} \cdot E_c}$$

$$a_{tw} \quad \text{Stegbewehrung; bei biaxialen Textilien: } a_{tw} = a_{tw,0^\circ} + a_{tw,90^\circ}$$

Das abgeleitete Ingenieurmodell basiert auf dem Vorgehen nach DIN 1045-1 [4]. Der Betontraganteil kann durch die empirisch ermittelte Querkrafttragfähigkeit des Bauteils ohne Querkraftbewehrung nach Gleichung (8) angesetzt werden:

$$V_c = 0,117 \cdot \beta \cdot \eta_1 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot \frac{\sigma_{tex}}{f_{yk}} \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot b_{s,eff} \cdot d \quad (8)$$

$$\text{mit } \beta = \frac{3,42}{a/d} > 1,0 \quad \text{Faktor für Sprengwerktragwirkung}$$

$$\eta_1 = 1,0 \quad \text{Tragfähigkeitsbeiwert}$$

$$\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{Maßstabsfaktor}$$

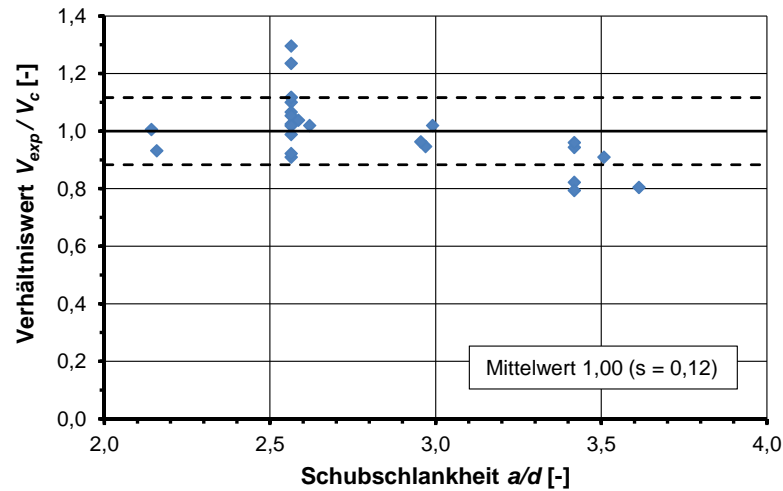
$$\rho_l = \frac{A_l}{b_w \cdot d} \quad \text{Längsbewehrungsgrad}$$

$$\sigma_{tex} = f_{fil, Kett} \cdot k_{1, Kett} \cdot k_{0, \alpha} \quad \text{Textilspannung der Längsbewehrung}$$

$$f_{yk} \quad \text{Zugfestigkeit des Betonstahls an der Streckgrenze (500 N/mm}^2\text{)}$$

$f_{cm}$	mittlere Betondruckfestigkeit
$b_{s,eff}$	wirksame Stegbreite
$a$	Auflagerabstand
$d$	statische Nutzhöhe
$A_t$	Querschnittsfläche der Biegebewehrung
$z$	innerer Hebelarm

Den Vergleich der im Versuch erreichten Querkrafttragfähigkeiten mit den berechneten Werten nach Gleichung (6) bis (8) in Abhängigkeit von der Schubslankheit  $a/d$  zeigt Bild 7.



**Bild 7:** Vergleich experimentelle zu rechnerische Querkrafttragfähigkeit (ohne Querkraftbewehrung)

**Fig. 7:** Comparison of experimental and calculated shear-capacity without shear reinforcement

Der Fachwerktraganteil  $V_F$  ergibt sich bei einer orthogonalen Querkraftbewehrung als Minimum der Zug- und Druckstreben­tragfähigkeit nach Gleichung (9):

$$V_F = \min \left\{ \begin{array}{l} (a_{tw,0^\circ} \cdot f_{t,res} + a_{tw,90^\circ} \cdot f_{t,res}) \cdot z \cdot \cot \beta_r \cdot \cos \alpha \\ \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b_{w,red} \cdot z / (\cot \beta_r + \tan \beta_r) \end{array} \right. \quad (9)$$

- mit  $a_{tw,0^\circ}$  Querschnittsfläche der vertikal verlaufenden Querkraftbewehrung  
 $a_{tw,90^\circ}$  Querschnittsfläche der horizontal verlaufenden Querkraftbewehrung  
 $f_{t,res} = k_1 \cdot k_{0,\alpha} \cdot f_{fil}$   
 $\alpha$  Umlenkwinkel der vertikalen Querkraftbewehrung  
 $\beta_r$  Schub­riss­winkel:

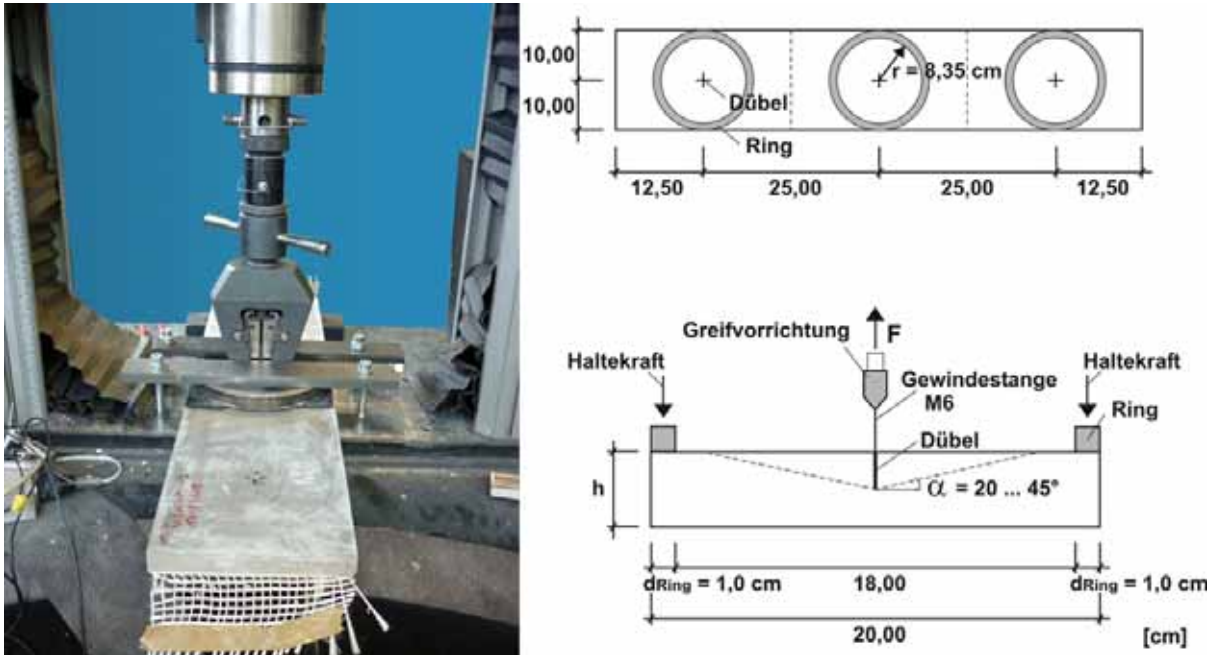
$$\cot \beta_r = 1,1 - 0,55 \cdot \frac{\sigma_x}{f_{ctm}} \leq \begin{cases} 2,15 \\ a/d \end{cases}$$

- $\sigma_x$  Betonspannung in Bauteillängsrichtung  
 $f_{ctm}$  Mittlere Betonzugfestigkeit

$\alpha_c$  Abminderungsbeiwert für Druckstreben­tragfähigkeit:  $\alpha_c = 0,297$

## 2.5 Punktförmige Zugbeanspruchung

Das Tragverhalten unter punktförmiger Zugbeanspruchung wurde in Versuchen an plattenartigen Bauteilen bei Variation der textilen Bewehrung untersucht. Die Lasteinleitung erfolgte mit Hinterschnittankern. Die Rückverankerung der Zugkraft in die Prüfmaschine wurde mit einem Haltering sichergestellt. Das Tragmodell und den Versuchsaufbau zeigt Bild 8.



**Bild 8:** Versuchsaufbau der Ausziehversuche

**Fig. 8:** Test-set-up of the tests under concentrated tensile loading

Die Bewehrungsmenge beeinflusst entscheidend das Tragverhalten. Mit abnehmender Bauteilhöhe nimmt die Tragfähigkeit wegen der damit verbundenen geringeren Plattensteifigkeit und anwachsenden Biegebeanspruchung ab.

Grundlage des abgeleiteten Ingenieurmodells ist das Concrete Capacity Verfahren (CC-Verfahrens) nach [10]. Danach wird die Tragfähigkeit auf die Betonausbruchlast eines störungsfreien Betonausbruchs bezogen. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse kann die Tragfähigkeit textilbewehrter Bauteile unter punktförmiger Zugbeanspruchung wie folgt bestimmt werden:

$$F_{Zug,max,c} = 0,012 \cdot k_{\rho} \cdot k_{\alpha} \cdot k_{\nu} \cdot f_{cm}^{2/3} \cdot h_{cf}^{1,7} \quad [\text{kN}] \quad (10)$$

mit:  $F_{Zug,max,c}$  charakteristischer Wert der Betonausbruchlast

$k_\rho$	Faktor zur Erfassung des Bewehrungsgehaltes: $k_\rho = 1 + 0,0034 \cdot \rho$
$\rho$	volumenbezogener Bewehrungsgrad [g/(m <sup>2</sup> *mm)]
	$\rho = \frac{m_A \cdot n_{Lagen}}{h_{ef}}$ ; $m_A$ : Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]
	$\rho \geq 8 \cdot (f_{ctm}^{[N/mm^2]})^{2/3}$ Mindestbewehrung nach [14]
$k_a$	Faktor zur Berücksichtigung des Winkels zwischen textiler Bewehrung und Hauptzugspannungsrichtung nach [14] [-]
	$k_a = 1,0$ für biaxiale Gelege
	$k_a = 1,1$ für multiaxiale Gelege
$k_v$	Faktor zur Erfassung des Verhältnisses $h_{ef}/h$ : $k_v = 1,75 - 1,5 \cdot h_{ef}/h$
$f_{ctm}$	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$h_{ef}$	Einbindetiefe der Dübel [mm]

Die angegebene Gleichung wurde an Versuchen mit AR-Glas (biaxiales Gelege mit 2400 tex, Maschenweite 8,4 mm, nicht getränkt) und Hinterschnittankern (Typ KEIL KH AA M6-15) abgeleitet. Für andere textile Bewehrungen oder andere Verbindungsmittel sind die angegebenen empirischen Faktoren zu überprüfen.

### 3 Sicherheitskonzept und Bauteilbemessung

#### 3.1 Statistische Auswertung und Ermittlung von Teilsicherheitsbeiwerten

Das Ziel der Bemessung eines Bauteils besteht darin, die Mindestanforderung an die Sicherheit gegenüber einem Bauteilversagen einzuhalten. Damit dies erreicht wird, muss die Bemessung mit einer ausreichenden Sicherheit erfolgen. Die Unsicherheiten auf der Seite der Einwirkungen sind bekannt, die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte sind unabhängig vom verwendeten Beton. Für den Tragwiderstand fehlen die erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte. Diese müssen neben den Unsicherheiten aus der Streuung der Materialkennwerte auch die Ungenauigkeiten in den Ingenieurmodellen erfassen, insbesondere wenn hieraus empirische Berechnungsansätze abgeleitet werden.

Das im Rahmen des SFB 532 entwickelte Sicherheitskonzept basiert auf den Angaben in DIN 1055 [15] und EUROCODE 0 [16]. Auf Basis der Versuchsergebnisse können charakteristischen Werte des Tragwiderstands ermittelt werden. Mit dem in [15], [16] beschriebenen Stufe II – Verfahren lassen sich dann unter Berücksichtigung der Zielwerte für den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  die erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte für die Tragfähigkeit berechnen.

Unter Beachtung, dass der Bezugszeitraum für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf 50 Jahre beschränkt wird, beträgt nach [15], [16] der Zuverlässigkeitsindex  $\beta = 3,8$  für die Zuverlässigkeitsklasse RC 2. Wird eine Normalverteilung der Streuungen von ständigen Lasten (Einwirkung) und Bauteilabmessungen (Widerstand) angenommen, können die Bemessungswerte  $X_d$  und die charakteristischen Werte  $X_k$  berechnet werden.

Der Bemessungswert des Widerstands  $R_d$  berechnet sich zu:

$$R_d = m_R - \alpha_R \cdot \beta \cdot s_R \quad (11)$$

mit  $m_R$  Mittelwert des Widerstands  
 $\beta$  Zuverlässigkeitsindex:  $\beta = 3,8$   
 $\alpha_R$  Wichtungsfaktor des Widerstands:  $\alpha_R = 0,8$  für  $\beta = 3,8$   
 $s_R$  Standardabweichung des Widerstands

Der charakteristische Wert  $R_k$  ergibt sich zu:

$$R_k = m_R - k_n \cdot s_R \quad (12)$$

mit  $m_R$  Mittelwert des Widerstands  
 $k_n$  statistischer Beiwert nach Tabelle 2  
 $s_R$  Standardabweichung des Widerstands

**Tabelle 2** Werte  $k_n$  für die charakteristischen Werte (5%-Fraktile) für „ $V_x$  bekannt“ [16]

**Table 2:** Value  $k_n$  of the characteristic values (5%-Fractile) for “ $V_x$  known”[16]

Versuchszahl $n$	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$k_n$	2,31	2,01	1,89	1,83	1,8	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64

Dieser charakteristische Wert des Widerstands ist der 5%-Quantilwert, der für eine zuverlässigkeitsorientierte Bemessung als unterer Grenzwert und auf der sicheren Seite liegend für das Versagen eines Bauteils verwendet wird. Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{tex}$  ergibt sich aus dem Quotient des charakteristischen Wertes des Widerstands  $R_k$  und des Bemessungswertes des Widerstands  $R_d$  zu:

$$\gamma_{tex} = \frac{R_k}{R_d} \quad (13)$$

Die mit diesem Vorgehen für die verschiedenen Belastungsarten und die im SFB 532 eingesetzten Materialkombinationen ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte für den Tragwiderstand von Textilbeton sind in Tabelle 3 in Abhängigkeit von der Beanspruchung zusammengestellt. Dabei wurden in die obigen Gleichungen (11) bis (13) statt des Mittelwerts des Widerstands  $m_R$  bzw. der Standardabweichung des Widerstands  $s_R$  der Mittelwert bzw. die Stan-

Standardabweichung der Verhältniswerte von gemessener zu berechneter Tragfähigkeit eingesetzt. Eine detaillierte Darstellung findet sich in [17].

**Tabelle 3 Statistische Werte und Teilsicherheitsbeiwerte in Abhängigkeit von der Bruchtragfähigkeit**

**Table 3: Statistic values and partial safety factors in the Ultimate Limit State (ULS)**

	Quotient experimentelle / berechnete Tragfähigkeit		Charakteristischer Wert $R_k$	Bemessungs- wert $R_d$	Teilsicherheits- beiwert $\gamma_{tex} = R_k / R_d$
	Mittelwert $m_R$	Standardabweichung $s_R$			
Zug	1,01	0,15	0,76	0,54	1,40
Moment	1,00	0,17	0,72	0,48	1,50
Querkraft	1,00	0,12	0,81	0,65	1,25

Der größte Teilsicherheitsbeiwert ergibt aus der Berechnung der Momenten Tragfähigkeit. Nach dem gleichen Verfahren wurden für die Versagensarten „Punktförmige Zugbeanspruchung“ ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{tex} = 1,15$  bzw. „Punktförmige Druckbeanspruchung“ ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{tex} = 1,40$  bestimmt. Als einheitlicher Teilsicherheitsbeiwert wird für die untersuchten Textilbetone im SFB 532  $\gamma_{tex} = 1,5$  vorgeschlagen.

### 3.2 Bemessungsmodelle

Die in Abschnitt 2 vorgestellten Berechnungsansätze können die in den Versuchen ermittelten Tragfähigkeiten ausreichend genau vorhersagen. Der vorgeschlagene Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{tex} = 1,5$  deckt für die Randbedingungen der im SFB 532 untersuchten Materialkombinationen und Herstellungsverfahren die Unsicherheiten für die Berechnungsansätze ab.

Unter Einbeziehung des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_{tex}$  ergeben sich die nachfolgenden Bemessungsgleichungen:

- Zugbeanspruchung: 
$$F_d = \frac{1}{\gamma_{tex}} (A_t \cdot f_{fil} \cdot k_1 \cdot k_{0,\alpha} \cdot k_2)$$

- Biegebeanspruchung: 
$$M_d = \frac{1}{\gamma_{tex}} (A_t \cdot f_{fil} \cdot k_{fl} \cdot k_1 \cdot k_{0,\alpha} \cdot k_2 \cdot z)$$

- Querkraftbeanspruchung 
$$V_d = \frac{1}{\gamma_{tex}} (0,117 \cdot \beta \cdot \eta_1 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot \frac{\sigma_{tex}}{f_{yk}} \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot b_{s,eff} \cdot d)$$

- punktförmige Zugbeanspruchung: 
$$F_{Zug,mac,d} = \frac{1}{\gamma_{tex}} \cdot 0,012 \cdot k_{\rho} \cdot k_{\alpha} \cdot k_{\nu} \cdot f_{ctm}^{2/3} \cdot h_{cf}^{1,7}$$

Diese gelten für die im SFB 532 verwendeten Materialien und Herstellverfahren. Weiterhin sind sie nur für Kurzzeitversuche unter Raumtemperatur anwendbar. Für die Tragwerksplanung, in der auch Dauerbelastungen und höhere Temperaturen zu berücksichtigen sind, können größere Teilsicherheitsbeiwerte erforderlich sein. So sind in Abhängigkeit der klimatischen Umgebungsbedingungen des Bauteils bei der Verwendung von AR-Glasfasern Festigkeitsverluste zu berücksichtigen. Für nähere Informationen zu der Dauerhaftigkeit von AR-Glasbewehrungen sei auf [12], [13] verwiesen.

Die entwickelten Ingenieurmodelle, das zugehörige Sicherheitskonzept und die daraus abgeleiteten Bemessungsmodelle stellen einen ersten Vorschlag dar, der die allgemeinen sicherheitstheoretischen Grundlagen im Bauwesen und die bekannten Nachweiskonzepte aus dem Stahlbetonbau berücksichtigt. Auf dieser Basis können weitere Einflussgrößen wie die Herstellverfahren und die Dauerhaftigkeit erfasst werden.

#### 4 Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“ an der RWTH Aachen.

#### 5 Literatur

- [1] KULAS, C.; SCHNEIDER, M.; WILL, N.; GREBE, R.: *Hinterlüftete Vorhangfassaden aus Textilbeton - Tragverhalten und Ausführung*. Bautechnik 88, Heft 5, 2011, S. 271-280.
- [2] RAUPACH, M.; ORLOWSKY, J.; BÜTTNER, T., DILTHEY, U.; SCHLESER, M.: *Epoxy-impregnated textiles in concrete – load bearing capacity and durability*. In: Hegger, J., Brameshuber, W., Will, N. (Hrsg.): *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International RILEM Conference, Aachen (2006)*. RILEM Proceedings PRO 75. RILEM Publications S.A.R.L., ISBN 2-912143-97-7, S. 77-88.
- [3] BROCKMANN, T.: *Mechanical and fracture mechanical properties of fine grained concrete for textile reinforced composites*. RWTH Aachen, Institut für Bauforschung, 2006 – Dissertation.
- [4] DIN 1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton- und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Juli 2001
- [5] HEGGER, J.; KULAS, C.; RAUPACH, M.; BÜTTNER, T.: *Tragverhalten und Dauerhaftigkeit einer schlanken Textilbetonbrücke*. Beton- und Stahlbetonbau 106, Heft 2, 2011, S. 72-80.

- [6] HEGGER, J.; HORSTMANN, M.; VOSS, S.; WILL, N.: *Textilbewehrter Beton – Tragverhalten, Bemessung und Anwendungen*. Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 6, 2007, S. 362–370.
- [7] VOSS, S.: *Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton*. RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, 2008 – Dissertation. Schriftenreihe des Lehrstuhls und Instituts für Massivbau (IMB) der RWTH Aachen, Heft 24, 2008, ISBN 3-939051-03-9.
- [8] HEGGER, J.; WILL, N.; BRUCKERMANN, O.; VOSS, S.: *Load-bearing behavior and simulation of textile reinforced concrete*. Materials and Structures 39 (2006). S. 765-776.
- [9] KONRAD, M.; CHUDOBA, R.: *Tensile Behavior of Cementitious Composite Reinforced with Epoxy Impregnated Multifilament Yarns*. International Journal for Multiscale Computational Engineering 7 (2009), no. 2, S. 115-133.
- [10] FUCHS, W.; ELIGEHAUSEN, R.: *Das CC-Verfahren für die Berechnung der Betonausbruchlast von Verankerungen*. Beton- und Stahlbetonbau 90, 1995, S. 6-9, 38-44, 73-76.
- [11] GÖRTZ, S.: *Zum Schubrissverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen aus Normal- und Hochleistungsbeton*. RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, 2008 – Dissertation. Schriftenreihe des Lehrstuhls und Instituts für Massivbau (IMB) der RWTH Aachen, Heft 18, RWTH Aachen, 2004, ISBN 3-9807302-8-X.
- [12] BÜTTNER, T.; ORLOWSKY, J.; RAUPACH, M.: *Dauerhaftigkeit von AR-Glas*. In: 49. DAfStb-Forschungskolloquium, 5.-6. Juni, 2008, Aachen, S. 57-65.
- [13] ORLOWSKY, J.; RAUPACH, M.: *Durability Model for AR-glass Fibres in Textile Reinforced Concrete : Dauerhaftigkeitsmodell für AR-Glasfasern im Textilbeton*. Materials and Structures (RILEM) 41 (2008), Nr. 7, S. 1225-1233.
- [14] CURBACH, M.; SPECK, K.: *Lasteinleitung in dünnwandige Bauteile aus textilbewehrtem Beton mit kleinen Dübeln*. Abschlussbericht zum DAfStb-Forschungsvorhaben V426, TU Dresden, Institut für Massivbau, 2003.
- [15] DIN 1055-100: *Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*. Ausgabe März 2001.
- [16] DIN EN 1990, EUROCODE: *Grundlagen der Tragwerksplanung (Deutsche Fassung)*. Ausgabe Dezember 2010.
- [17] SCHNEIDER, M.: *Zur Bemessung und Konstruktion von textilbewehrten Betonbauteilen*. RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, Dissertation in Vorbereitung.