

---

# SCHALENTRAGWERKE AUS SPRITZBETON MIT TEXTILER BEWEHRUNG - AKTUELLE ENTWICKLUNGEN BEI BEMESSUNGS-, HERSTELL- UND PRÜFMETHODIK

---

## *SHELL STRUCTURES MADE OF SHOTCRETE WITH TEXTILE REINFORCEMENT – CURRENT DEVELOPMENT OF DESIGN-, PRODUCTION- AND TESTING METHODS*

Jan **Bielak**, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, Aachen, Deutschland  
Josef **Hegger**, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, Aachen, Deutschland

Mit Textilbeton bzw. Carbonbeton ist die Verwirklichung von besonders dünnwandigen, frei-geformten Schalenträgerkonstruktionen im Neubau möglich. Die Verwendung von Spritzbeton erlaubt auf aufwändige, doppelwandige Schalungen zu verzichten und den lageweisen Aufbau von engmaschiger Bewehrung umzusetzen. Demonstrator-Projekte wie der Pavillon aus Hyperbolischen-Paraboloid-Schalen und die Tonnenschalen an der RWTH Aachen zeigten in der Vergangenheit bereits die Tauglichkeit der Bauweise und des Materials. Der vorliegende Beitrag diskutiert Aspekte der Bemessung, der Herstellung und der experimentellen Untersuchung anhand ausgeführter Projekte. Darüber hinaus werden Untersuchungen für eine gespritzte Textilbetonschale (Projekt NEST HiLo) vorgestellt.

*Textile reinforced concrete and carbon concrete composites enable the implementation of especially thin, free-form shell structures for new structures. The use of shotcrete is one solution to avoid cost intensive double-walled formwork while using multi-layered small-meshed textile reinforcement. Lighthouse-Projects such as the pavilion made from hyperbolic paraboloid shells or the barrel-vault-shells at RWTH Aachen University revealed already the capability of the construction methods and the material. The present paper discusses aspects of design, production and experimental characterization for executed projects. Furthermore, current investigations for a sprayed concrete shell made of textile reinforced concrete (project NEST HiLo) are presented.*

### 1. Einleitung

Dünnwandige Schalenträgerwerke aus bewehrtem Beton verbinden effizienten Materialeinsatz mit hoher ästhetischer Qualität. Dieses Erkenntnis ist nicht neu, hat sie doch bis Ende der 1980er Jahre Ingenieure und Architekten zum verbreiteten Einsatz von massiven Schalen als tragende Elemente im Hochbau veranlasst. Auch der Einsatz von Spritzbeton für die Herstellung von Schalenträgerwerken ist seit dessen Erfindung üblich. Beispiele wie die Planetariumskuppel in Jena im System Zeiss-Dywidag [1], die Tonnenschalen der Großmarkthalle in Frankfurt [2] oder die späten Bauten von Muther [3] belegen das historische Zusammenspiel der Spritzbetonbauweise mit dem Schalenbau.

In aktuellen Neubauprojekten kommen Schalen nur selten zum Einsatz. Ein wesentlicher Grund hierfür ist der hohe personelle und finanzielle Aufwand für die Schalung, die im Gießverfahren doppelwandig, im Spritzbetonverfahren zumindest einseitig ausgeführt werden muss. Ebenso relevant sind aber die hohen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit gerade bei Außenbauteilen als limitierender Faktor für die Realisierung von dünnwandigen Schalenträgerwerken. Letzteres Problem kann durch die Verwendung von nichtmetallischer

Bewehrung umgangen werden. Eine sinnvolle Liefer- und Verlegeform dieser korrosionsbeständigen Bewehrung speziell für dünnwandige Bauteile und für Schalen besteht aus Carbon- oder Glasfasersträngen, die mit einer weichen bis steifen Matrix aus Kunststoffen (z.B. Styrol-Butadien-Kautschuk oder Epoxidharz) getränkt sind und zu textilen Gelegen verarbeitet wurden. Im Verbund mit Beton oder Mörtel spricht man bei dem Werkstoff von Textilbeton oder neuerdings bei Verwendung von Carbonfaserverbundkunststoffbewehrung (CFK-Bewehrung) auch von Carbonbeton.

Die Eignung dieses innovativen Verbundwerkstoffs speziell für Schalenträgerwerke wurde durch mehrere Forschungs- und Praxisprojekte eindrucksvoll gezeigt. Im Neubau wurden doppelt gekrümmte Flächen wie beim Demonstrator-Pavillon der RWTH Aachen (Hyperbolische Paraboloid (HP-) Schalen) [4–6] und einfach gekrümmte Tonnenschalen [7] realisiert. Ein aktuelles Beispiel ist das dünnwandige mehrfach gekrümmte Schalenträgerwerk für das Projekt NEST HiLo [8], das von der ETH Zürich begleitet wird (Bild 1). Auch die Verstärkung und Sanierung von Schalenträgerwerken ist sinnvoll mit Textilbeton möglich, beispielsweise durchgeführt bei einer Hyparschale in Schweinfurt [9] oder bei einem Tonnenschalengewölbe in Zwickau [10]. In allen vier Beispielen wurde Spritzbeton eingesetzt. Weitere Beispiele sind in [11] zusammengefasst.

Die nicht genormte Bauweise mit Carbonbeton für Schalenträgerwerke erfolgreich einzusetzen, ist für die Planer, die Prüfer und die ausführenden Firmen eine große Herausforderung. Auch in Zeiten hoch entwickelter Finite-Elemente-Software stellt sich zunächst die Frage nach der richtigen Bemessung gerade von Bauteilen mit komplexen Geometrien. Bei der Ausführung sind der Bewehrungseinbau, die Lagesicherung und der Betonaustrag zentrale Themen. Zuletzt muss durch geeignete Qualitätskontrollen und Prüfungen die Überwachung der Ausführung und die Validierung der Annahmen sichergestellt werden. Nachfolgend werden diese drei Fragestellungen mit Bezug zu ausgeführten beziehungsweise in der Planung befindlichen Beispielen diskutiert.



*Bild 1: Gesamtansicht des Herstellungsdemonstrators: auf eine Seilnetzschalung gespritzter Carbonbeton für das Projekt NEST HiLo der ETH Zürich (Foto: Jan Bielak)*

## 2. Bemessung

Der richtige Umgang mit der Bemessung von Schalenträgerwerken aus Carbonbeton wird gegenwärtig in verschiedenen Forschungsprojekten diskutiert. Grundlagen für eine einheitliche Richtlinie zur Bemessung werden derzeit im Projekt C<sup>3</sup>-V1.2 im der Verbundforschungsinitiative Carbon Concrete Composite (C<sup>3</sup>) [12] vorbereitet. Bei Schalenträgerwerken ist mit einer Kombination aus Biegespannungen und Normalspannungen zu rechnen, sofern die Geometrie nicht direkt aus der Hängefigur abgeleitet ist. Selbst dort sind durch Imperfektionen oder Horizontallasten wie Wind ungewollte Biegespannungen möglich. Zusätzlich sind die Schubbeanspruchung sowie die Verankerung bzw. Übergreifung der Bewehrung im Rahmen der Bemessung zu behandeln. Idealerweise sollte die Art des Betoneinbaus – Gießen, Spritzen, Drucken oder Laminieren – keinen Einfluss auf die Bemessungsmethodik aufweisen.

### 2.1 Biegung mit Normalkraft

Für den Fall der Biegung mit Normalkraft kristallisieren sich zwei sinnvolle Wege zur Bemessung heraus: die komponentenweise Bemessung und die Kompositbemessung. Beide Methoden nutzen als Eingangswerte Schnittgrößen, die sich aus einer linear-elastischen Berechnung beispielsweise mit einer Finite-Elemente-Software unter Verwendung von Schalenelementen ergeben. Klar ist, dass durch eine nichtlineare Berechnung unter Ansatz der Umverteilung der Schnittgrößen im Zustand II erhebliche Tragreserven in Schalenträgerwerken vorhanden sein können. An dieser Stelle soll jedoch nur auf den linearen Ansatz eingegangen werden.

Die komponentenweise Bemessung nutzt aus dem Stahlbetonbau bekannte Methoden. Ausgehend von einer angenommenen Dehnungsverteilung über den Querschnitt werden den Komponenten Beton und Bewehrung die jeweiligen Druck- und Zugkräfte zugeordnet. Wenn für den Beton eine stetige Spannungs-Dehnungs-Funktion (z.B. linear oder quadratisch) gewählt wird, ist die Ermittlung des Querschnittswiderstands für Biegung und Normalkraft für einfache Fälle sogar geschlossen lösbar. Im Unterschied zum Stahlbeton weist die Faserverbundkunststoffbewehrung (FVK-Bewehrung) kein Fließplateau auf. Damit liegt auch hier eine stetige Spannungs-Dehnungs-Funktion bis zum Bruch vor. Für gegliederte Querschnitte, komplexere (z.B. abschnittsweise definierte) Stoffgesetze für den Beton und für mehrlagige Bewehrungen kann eine iterative Biegebemessung durchgeführt werden, wobei entweder Beton- oder Bewehrungsversagen maßgebend werden kann. Diese Methode ist insbesondere für klassische Biegebauteile mit geringen Normalkräften wie Platten oder Balken mit definierter Zugzone und lokalisiert am Querschnittsrand angeordneter Bewehrung empfehlenswert. Die verwendete Bewehrung muss hierbei gute äußere und innere Verbundeigenschaften aufweisen. Nur dann können die separat ermittelten Tragfähigkeiten und Materialgesetze der Einzelkomponenten auf den Verbundwerkstoff übertragen werden [13].

Für den zweiten Weg, die Kompositbemessung, werden die Tragfähigkeiten für Biegung, Druck- und Zugbeanspruchung des Verbundwerkstoffs experimentell ermittelt. Man kann daher auch von einer versuchsgestützten Bemessung sprechen. Die ermittelten Werte bilden die Rand- und Eckpunkte der Umhüllenden des zulässigen Bereichs im Normalkraft-Momenten-Interaktionsdiagramm im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Bild 2). Für die eigentliche Bemessung muss die gesamte Wolke der Momenten-Normalkraftpunkte, die sich aus den Einwirkungen in allen Lastfallkombinationen ergibt, innerhalb der Umhüllenden liegen.

Die Bemessung für die Zustimmung im Einzelfall der beiden ausgeführten Schalenträgerwerke an der RWTH erfolgte mit dieser Methode [6; 7; 14]. Gegenüber dem dort im Druckbereich

linearisierten, vereinfachten Diagramm wird in Bild 2 ein weiterer Stützpunkt bei der Hälfte der experimentell ermittelten Drucktragfähigkeit eingeführt. Hier ist der Querschnitt gerade noch vollständig überdrückt, weshalb noch keine Risse und damit auch noch keine Beeinflussung der Biegetragfähigkeit aus der Verbundwirkung der Bewehrung vorliegen kann. Die Kompositbemessung ist insbesondere für Schalentragwerke mit ausgeprägter M-N-Interaktion sowie für dünne, über die ganze Höhe gleichmäßig bewehrte Querschnitte empfehlenswert. Weiterhin ist diese Methode bei Verwendung von ungetränkter und weich getränkter Bewehrung sinnvoll, da bei dieser Bewehrung nicht von der Tragfähigkeit der Einzelkomponenten direkt auf die Tragfähigkeit des Verbundwerkstoffs geschlossen werden kann.

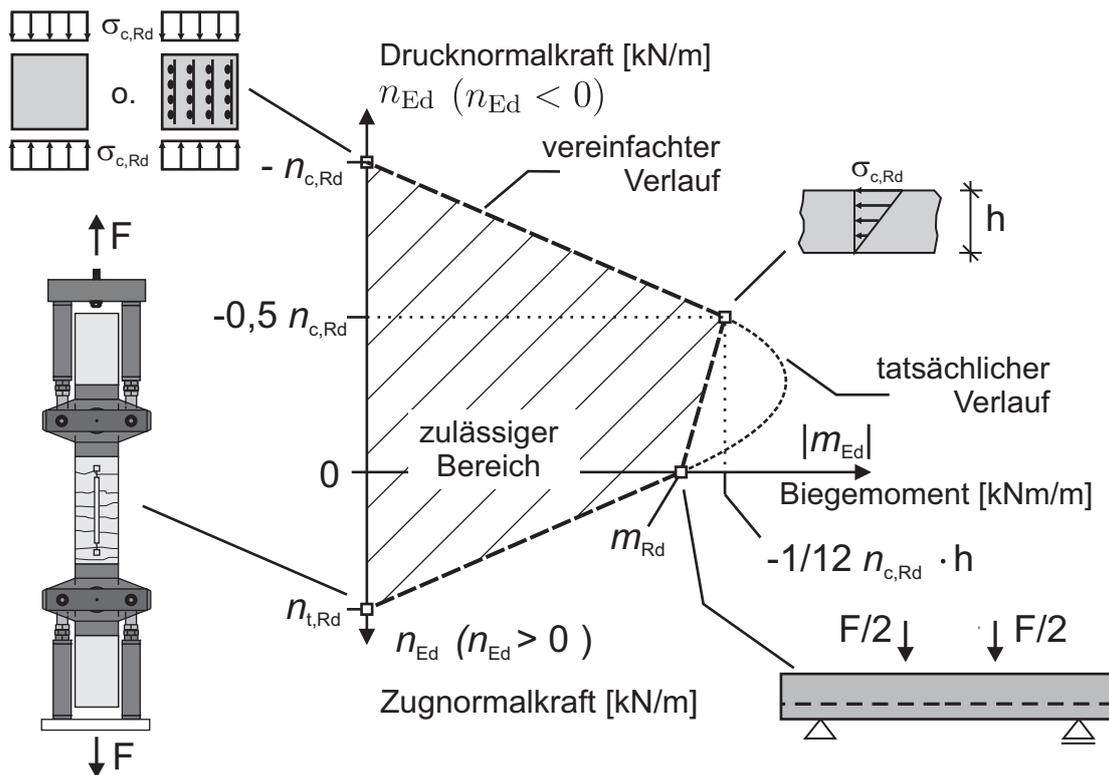


Bild 2: Interaktionsdiagramm für die Komposit- (versuchsgestützte) Bemessung (Grafik: Jan Bielak)

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass bei beiden Methoden zunächst nur eine einachsige Bemessung durchgeführt wird. Bei einer mehraxialen Beanspruchung, die für komplexere Tragwerke und insbesondere für doppelt gekrümmte Schalen die Regel sind, sind mehrere Richtungen zu untersuchen. Sicherlich kann eine Transformation der Schnittgrößen aus der linear-elastischen Berechnung auf die Bewehrungsachsen vorgenommen werden und diese als Bemessungsrichtung festgelegt werden. Dies ist die Regel bei der Bemessung von Platten, Scheiben und Schalen aus Stahlbeton. Üblicherweise wird eine biaxiale Bewehrung verwendet, die nach konstruktiven Gesichtspunkten wie den Bewehrungsabmessungen sowie der Geometrie der Schale angeordnet wird. In der Konsequenz wird es immer Bereiche und maßgebende Punkte in den Schalen geben, bei der die Achse der Bewehrung nicht zu den Hauptspannungsachsen ausgerichtet ist. Anders als bei isotroper Stahlbewehrung kann bei hochgradig anisotropen FVK-Bewehrungen eine Abminderung der Bruchfestigkeit bei schiefwinkliger Zugbeanspruchung erforderlich sein. Anhaltswerte hierfür wurden beispielsweise von Kulas oder Scholzen vorgeschlagen [15; 16]. Für aktuelle Bewehrungen und zugehörige leistungsfähige Betone werden derzeit im Rahmen der C<sup>3</sup>-Initiative entsprechende Untersuchungen zum zweiachsialen Tragverhalten und der Auswirkung von schiefwinkliger Rissbildung durchgeführt.

## 2.2 Querkraft

Die derzeit laufende Abstimmung um den neuen Eurocode 2 auf europäischer Ebene zeigt, dass für Stahlbeton das Thema Querkraftbemessung nach wie vor diskutiert wird und mitnichten abschließend gelöst ist. Im Gegensatz zur Biegebemessung liegen für die Querkraftbemessung unter anderem deshalb noch keine validierten Modelle für Carbonbeton ohne Querkraftbewehrung mit aktuellen, nichtmetallischen textilen Längsbewehrungen vor. In der Literatur sind experimentelle Untersuchungen für ungetränkte textile Längsbewehrungen dokumentiert, die auch zur Entwicklung von Ingenieurmodellen in Anlehnung an die alte DIN 1045 geführt haben [17; 18]. Die Übertragung dieser Modelle und Gleichungen auf getränkte textile Bewehrungen von Kulas [15] ist aber angesichts der geringen Variation an Parametern (E-Modul der Bewehrung, Bauteilhöhe, Betonfestigkeit, Größtkorn etc.) und dem daraus stark eingeschränkten Anwendungsbereich nicht praxistauglich.

Für stabförmige Glasfaserverbundkunststoffbewehrung (GFK-Bewehrung) wurden Ingenieurmodelle bzw. Bemessungsgleichungen für die Querkrafttragfähigkeit abgeleitet [19; 20], die auch in gültigen Zulassungen in Deutschland in ähnlicher Weise auftauchen [21]. Eine andere Herangehensweise für Carbonbeton wäre die Übernahme der Mindestquerkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung,  $v_{\min}$  aus dem aktuellen Eurocode 2. Beide Wege sind für Schalen aus Carbonbeton kritisch zu sehen. Die Dimensionen der geprüften Bauteile mit GFK-Bewehrung unterscheiden sich von textilbewehrten Schalen um Größenordnungen. Die Festlegung und Überprüfung der Mindestquerkrafttragfähigkeit im EC2 erfolgte an Balken und Platten, die zwar gering, aber mit Stahl bewehrt waren. Die spezifischen Einflüsse von sehr geringen Bauteilhöhen, dem abweichenden E-Modul (und damit geänderten Rissweiten) der Faserverbundkunststoffbewehrung sowie der potentiell höhere Abdeckungsgrad der Bewehrung in der Ebene der Textilien sind bislang ungeklärt.

Für Schalen aus Carbonbeton mit geringen Bauteildicken ist der zusätzliche Einbau von Querkraftbewehrung nicht anzustreben. Wirtschaftliche Lösungen wären beispielsweise die Verwendung von in die textile Längsbewehrung integrierte Querkraftbewehrung (3D-Textilien) oder der Ansatz von geneigten textilen Bewehrungsstücken, die auch als Abstandhalter bei mehrlagigem Einbau dienen können [22; 23]. Obwohl die Querkraft bei vielen Schalen nur eine untergeordnete Rolle spielt, ist aktuell eine versuchsgestützte Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung zu empfehlen. Zur Vorbemessung kann die räumliche Hauptzugspannung am Bemessungspunkt der Schale dem Bemessungswert der Zugfestigkeit des verwendeten Betons gegenübergestellt werden. Hierbei ist die Abminderung der Betonfläche durch die Abdeckung der textilen Bewehrung unbedingt zu beachten.

## 2.3 Verankerung und Übergreifung

In den vergangenen Jahren wurden umfangreiche Untersuchungen zum Verbundverhalten von getränkten und ungetränkten textilen Bewehrungen vorgenommen, zuletzt in der Forschungsinitiative C<sup>3</sup> [24]. Den Hersteller der textilen Bewehrung sind für eine spezifische Materialkombination aus Textil und Beton bzw. eine Betonfamilie Verbundkennwerte anzugeben, wie beispielsweise für das zugelassene TUDALIT-System [25]. Andernfalls müssen die Kennwerte projektspezifisch mit der jeweils verwendeten Kombination ermittelt werden. Möglichkeiten hierzu sind in Abschnitt 4.3 angegeben. Für die Bemessung bietet sich ein vereinfachter, auf der sicheren Seite linearisierter Ansatz für die Verbundspannung über die Einbindelänge an. Diese Vereinfachung ist mit Versuchen bei mehreren Stufen der Einbindelänge bis hin zur Endverankerungslänge zu verifizieren. Für aktuelle textile Bewehrungen scheint dieses Vorgehen gerechtfertigt, wie eigene experimentelle Untersuchungen belegen. Für die sichere Übergreifung ist je nach Tränkungsmaterial, Größe der Verbundspannung, Abstand der textilen Bewehrungslagen (und daraus resultierendem Versatzmoment), der Betondeckung sowie der Zugfestigkeit des Betons mit einer geringen bis erheblichen Vergrößerung der Länge gegenüber einer Einzelverankerung zu rechnen.

### 3. Herstellung

Mit der Komplexität der Geometrie von Schalen steigen auch der Aufwand und die Herausforderung für deren Herstellung. Der Prozess ist dabei geprägt von dem Dilemma der geringen Schalendicke, der hohen erforderlichen Genauigkeit und dem wirtschaftlichen Ressourceneinsatz für Personal, Schalung, Bewehrung und Beton. Anhand der ausgeführten Projekte lassen sich die Herstellarten Laminieren, Durchspritzen und die robotergestützte Fertigung unterscheiden.

#### 3.1 Laminiertechnik

Bei der Laminiertechnik werden Beton und Bewehrung abwechselnd lagenweise aufgebracht. Hierzu ist eine einseitige Schalung mit geschlossener Schalhaut erforderlich. Der Betonaustrag kann durch Spritzen erfolgen, wobei in der Regel eine Einarbeitung der Bewehrung in die frische Betonschicht durch Eindrücken bzw. Einrollen erforderlich ist. Prinzipiell ist die Lagenanzahl und Dicke nur durch die Verarbeitungszeit des Betons limitiert. Die Dickenkontrolle muss händisch erfolgen, wobei die Lagegenauigkeit der Bewehrung durch die Qualität der Ausführung bestimmt wird. Abstandhalter sind bei dieser Methode nicht erforderlich. Sowohl die HP-Schalen für den Textilbeton-Großdemonstrator [16] (Bild 3) als auch die Textilbeton-Tonnenschalen [7] wurden mit dieser Methode hergestellt. Bei den beiden genannten Beispielen wurden 12 bzw. 6 Textilschichten lagenweise einlaminiert. Der Herstellungsprozess kann bei Verwendung von vielen Lagen sehr zeitaufwändig werden. Übergreifungsstöße müssen sorgfältig geplant werden. Dadurch, dass der Beton nicht durch die Textillagen hindurch eingebracht werden muss, können allerdings auch Textilien mit hohem Abdeckungsgrad und geringer Maschenweite verwendet werden. Das Größtkorn muss dabei auf die Schichtdicke einer Beton- bzw. Mörtellage abgestimmt sein.



*Bild 3: Herstellung in Spritzbetonbauweise mit lagenweiser Laminiertechnik (Foto: Alexander Scholzen [16])*



*Bild 4: Herstellung von bewehrten Probekörpern in Durchspritztechnik (Foto: Martin Herbrand)*

#### 3.2 Durchspritztechnik

Bei der Durchspritztechnik erfolgt der Betonaustrag ebenfalls mittels Spritzen, wobei in diesem Fall die Bewehrung vor Beginn der Spritzarbeiten vorbereitet und an der Schalung fixiert werden muss. Bekannt ist diese Technik im Carbonbetonbau von der Anwendung bei Verstärkungsmaßnahmen, wo der Altbeton als Schalung fungiert [23]. Für den Neubau kann die Schalung konventionell aus Holz, Stahl oder Kunststoff gefertigt sein. Für das Projekt NEST HiLo kam eine innovative Schalhaut aus einem schlaffen Membrantextil zum Einsatz, dass auf einem Netz aus vorgespannten Stahlseilen drapiert war (Bild 5). Hierdurch konnte

die sehr komplizierte doppelt gekrümmte Geometrie verhältnismäßig einfach mit wiederverwendbaren Bauelementen erzeugt werden. Die Abdrücke des Seilnetzes sind auf der Unterseite der fertigen Schale sichtbar (Bild 6), was ausdrücklich architektonisch gewollt ist.

Um die Bewehrung gegen Abheben zu sichern und den Abstand zur Schalung bzw. dem Untergrund zu gewährleisten ist eine ausreichende Anzahl von speziellen Abstandhaltern erforderlich. Analog zum klassischen Spritzbetonbau mit Stahlbewehrung wird durch die Bewehrung hindurch der Beton eingebracht und verdichtet (Bild 4). Die Bewehrung muss hierzu eine ausreichende Maschenweite aufweisen und die Faserstrangquerschnittsform sollte möglichst nicht zu stark oval bzw. flach, sondern besser rund und kompaktiert sein. Mehrlagige Bewehrung muss in Dickenrichtung der Schale übereinander ausgerichtet sein. Andernfalls können sich verstärkt Spritzschatten hinter der Bewehrung bilden. Die Spritzdrücke sind auf das verwendete Bewehrungs- und Tränkungsmaterial abzustimmen. Anders als Stahlbewehrung ist das anisotrope FVK-Material querdruckempfindlich und kann leicht abgeschert werden. Bei harten Tränkungen wie Epoxidharz kann mit höheren Drücken gearbeitet werden, wohingegen bei weicheren Tränkungen und geringeren Faserstrangquerschnittsflächen bei zu hohen Spritzdrücken mit einer Beschädigung der Bewehrung zu rechnen ist. In jedem Fall sollten bei dieser Methode bewehrte Probekörper mit gleichen Spritzabständen parallel zur Bauteilherstellung angefertigt werden, um ebendiese Effekte einschätzen zu können (siehe Bild 4).



*Bild 5: Seilnetzschalung für NEST HiLo  
(Foto: ETH Zürich)*



*Bild 6: Abdrücke der innovativen  
Seilnetzschalung auf der Schalununterseite  
(Foto: Jan Bielak)*

### 3.3. Robotergestützte Fertigung / 3D-Druck

Die robotergestützte Fertigung von freigeformten Schalen verspricht die derzeit aufwendige Handarbeit zu reduzieren und dadurch die Bauweise mit Schalentragerwerken wirtschaftlicher zu machen. Insbesondere der 3D-Druck mit Beton – also der robotergestützte Spritzbetonauftrag – wird derzeit in zahlreichen Forschungsprojekten weltweit untersucht. Bisher sind den Autoren keine Textilbetonschalentragerwerke bekannt, die mit dieser Methode hergestellt wurden. Prinzipiell handelt es sich aber um eine Weiterentwicklung einer der beiden oben genannten Methoden, wobei die Bewehrung entweder sukzessive mit dem Betonauftrag oder vor Beginn des Betonauftrags installiert wird.

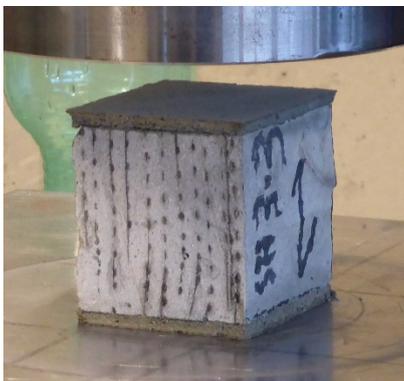
## 4. Prüfmethodik und Qualitätskontrolle

Unabhängig von der verwendeten Bemessungsmethode und der Art der Herstellung sind für die Carbonbetonbauweise Prüfmethoden zur Validierung der angenommenen Materialkennwerte sowie zur produktionsbegleitenden Qualitätskontrolle erforderlich. Für eine vollständige

Bewertung der Tragfähigkeit von Schalen sind Prüfungen für die Druckfestigkeit, die Zugfestigkeit, die Verbundfestigkeit, die Biegetragfähigkeit und Querkrafttragfähigkeit des Komposits erforderlich. Grundsätzlich gilt, dass bei Verwendung von Spritzbeton die Herstellung der Proben parallel und in gleicher Art wie die Herstellung des späteren Bauteils durchgeführt werden muss. Nur so können herstellungsbedingte Einflüsse (Spritzschatten, Verdichtungsenergie, Einfluss des Spritzvorgangs auf die Bewehrung) implizit erfasst werden.

#### 4.1 Prüfung des Komposits auf Druck

Es existieren mehrere Wege für die Überprüfung der Druckfestigkeit bei Carbonbeton: entweder am Beton allein mittels Standardprüfungen (Würfel, Zylinder, Prismen) oder durch Prüfung am bewehrten (Komposit)-Querschnitt. Hierzu können Bohrkerns oder gesägte würfelförmige Probekörper verwendet werden (Bild 7). Die Abmessungen der Probekörper sollten sich an den Dimensionen der späteren Bauteile orientieren. Für dünnwandige Schalentragerwerke ist beispielsweise die Ermittlung der Festigkeitswerte am Prisma nach [26] empfehlenswert. Die Festigkeitsermittlung am Kompositquerschnitt liefert Druckfestigkeiten, die am realen Bauteil erreicht werden können. Bei engmaschigen oder mehrlagig mit Textilien bewehrten Querschnitten entstehen bei der Druckprüfung verglichen mit dem unbewehrten Querschnitt geänderte Versagensmechanismen (Bild 8). Diese Längsrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung bzw. Lamellenbildung kann zu einer Reduktion des Querschnittswiderstands auf Druck führen, wie eigene Untersuchungen im Rahmen der Qualitätsüberprüfung des Textilbeton-Demonstrators nach 5 Jahren und Untersuchungen in der Literatur [27] belegen. Gerade für dünnwandige Schalen mit Druckbeanspruchung kann es daher erforderlich sein, die Druckfestigkeit am bewehrten Querschnitt zu ermitteln und als Eingangswert für die Bemessung bzw. das Interaktionsdiagramm (Bild 2) zu verwenden. Im Rahmen einer Qualitätskontrolle sollte wenn möglich der Druckfestigkeitswert überprüft werden, der planerisch angesetzt worden ist.



*Bild 7: Druckprüfung am bewehrten Probekörper (ca. 50x50x50 mm) (Bild: Jan Bielak)*



*Bild 8: Lamellenbildung am bewehrten Druckprobekörper im Versagenszustand (Bild: Jan Bielak)*

#### 4.2 Prüfung auf Zug

Je nach verwendetem Bemessungskonzept und verwendeter Bewehrung kann die Ermittlung der Zugtragfähigkeit am einzelnen Bewehrungselement, am Textil (Gelege) oder am bewehrten Betonprobekörper erfolgen [28]. An dieser Stelle soll nur auf die Dehnkörperprüfung eingegangen werden. Für die Ermittlung der Materialkennwerte am einzelnen Bewehrungselement ohne Beton wird auf die Literatur verwiesen [29; 30]. Bild 9 zeigt einen möglichen Prüfaufbau für die einaxiale Zugprüfung an einem bewehrten Betonstreifen. Der Aufbau entspricht der RILEM-Empfehlung [31]. Die hydraulische Klemmung des Probekörpers mit variabler Endverankerungslänge sowie der modulare Aufbau ermöglichen die Prüfung verschiedener Materialkombinationen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Aktuell

wurde mit dem Aufbau die Qualitätsüberprüfung der Carbonbeton- Dachschalen aus [7] nach ca. 3 Jahren durchgeführt. Des Weiteren wurden für das Projekt NEST HiLo über 80 Zugproben mit dem Aufbau durchgeführt. Hierzu wurden die Streifenproben aus bewehrten Platten zugeschnitten. Die Platten wurden in der gleichen Weise wie die spätere Schale auf einem Seilnetz mittels Spritzbeton hergestellt. Damit die Streifenproben eingebaut werden konnten, mussten sie wegen der aus dem Membrantextil stammenden großen Oberflächendeformationen (vgl. Bild 10) im Verankerungsbereich mit Ausgleichsmörtel nivelliert werden. Die Durchführung hat gezeigt, dass der Prüfaufbau sehr robust ist und eine effiziente Prüfung auch großer Probekörperanzahlen ermöglicht. Die Ergebnisse der Prüfungen bilden einen wichtigen Eingangswert für die tragwerksplanerische Bewertung sowie die Bemessung der Schale.

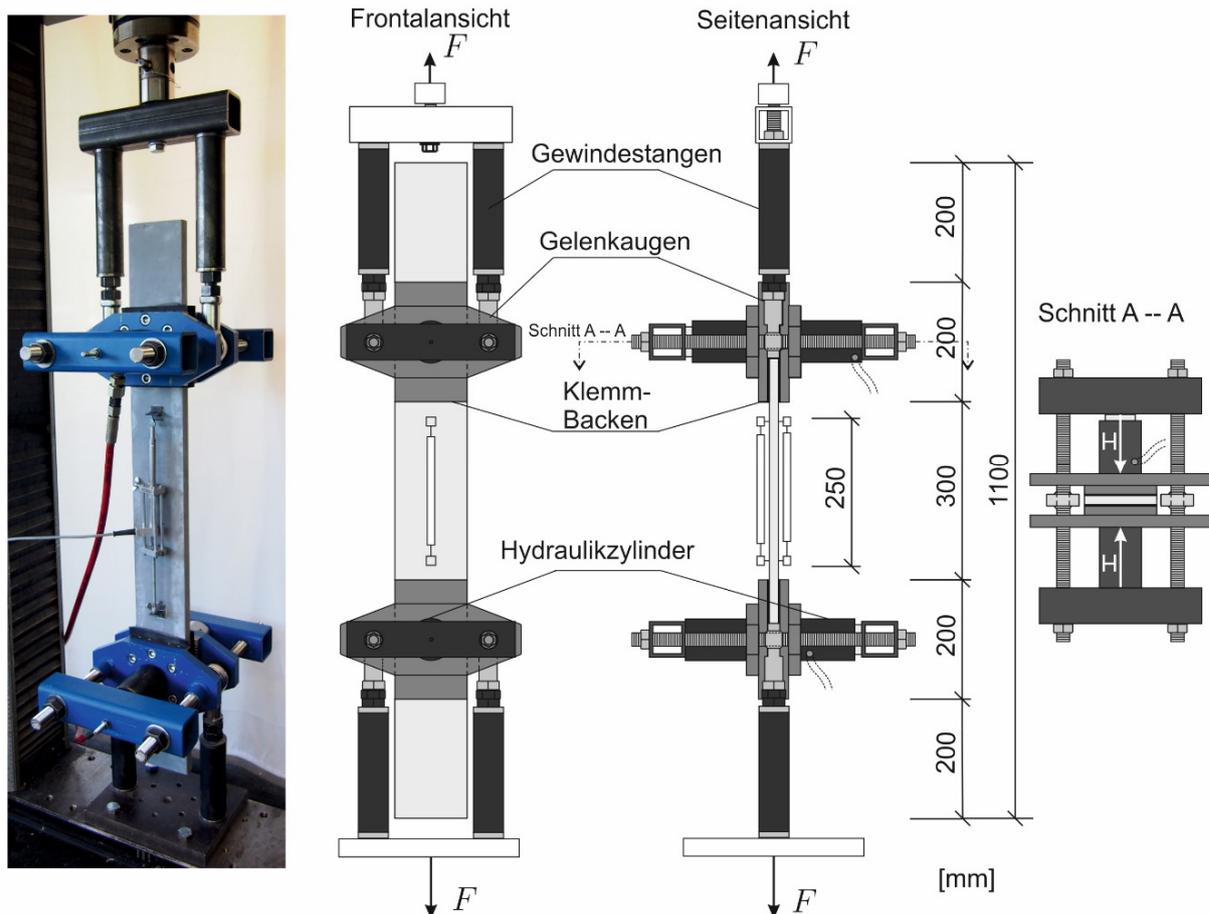


Bild 9: Prüfaufbau für die einaxiale Zugprüfung am Komposit (Foto: Jan Bielak, vgl. [31])

#### 4.3 Auszugprüfung / Verbundprüfung

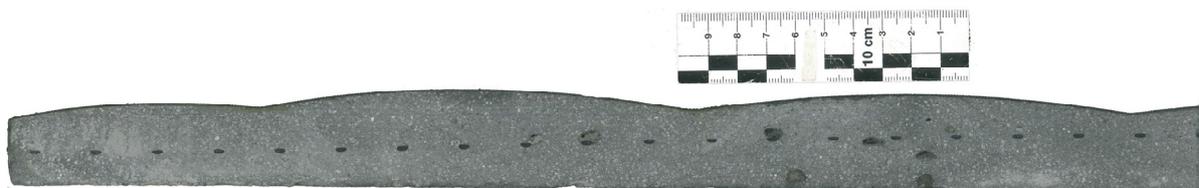
In der Literatur sind geeignete Prüfmethode wie beispielsweise der doppelseitige textile Auszugversuch (DPO-Versuch) [32] oder der einseitige textile Auszugversuch (SPO) [33] für die Ermittlung der Kennwerte für die Verbundfestigkeit und die Endverankerungslänge der Bewehrung dokumentiert. Der DPO-Versuch ermöglicht eine realitätsnahe Charakterisierung, da aus der laufenden Produktion entnommene Bauteile bzw. aus dem Bauteil gesägte Streifen als Probekörper verwendet werden können. Gerade für Schalentragwerke, die geringe Dicken und eine fehlende Umschnürungswirkung für die Verankerung der Bewehrung aufweisen, empfiehlt sich die Ermittlung der Verbundkennwerte mit dieser Methode. Für die experimentelle Beurteilung der erforderlichen Übergreifungslänge bieten sich modifizierte Dehnkörper mit Übergreifungsstoß in der Mitte des Messbereichs an.

#### 4.4 Biegeprüfung

Die vergleichsweise einfache Biegeprüfung von Carbonbeton erlaubt eine praxisnahe Evaluation der Tragfähigkeit unter Momentenbeanspruchung. Neben einem Druckzonenversagen und dem Bewehrungsversagen können damit implizit auch die Verankerung und die Längsrissneigung des Komposits überprüft werden. Die Prüfung erfolgt am bewehrten Querschnitt im Dreipunkt- bzw. Vierpunkt-Biegeversuch. Für Platten- oder Schalentragerwerke werden üblicherweise streifenförmige Proben der Breite 20 cm verwendet. Diese können direkt in den finalen Abmessungen hergestellt oder durch Sägeschnitte aus größeren Platten erzeugt werden. Die Stützweite muss sich an der Querschnittshöhe und der verwendeten Bewehrung orientieren. Beispielsweise kann ein einlagig bewehrter Plattenstreifen mit getränkter Glasbewehrung mit ca. 1,10 m Stützweite sinnvoll geprüft werden. Andere Abmessungen und Prüfaufbauten sind in der Literatur dokumentiert [15; 16].

#### 4.5 Qualitätskontrolle und Toleranzen

Bei der Qualitätskontrolle während der Produktion ist in besonderem Maße auf die Einhaltung der Toleranzen zu achten. Wegen der geringeren Abmessungen wirken sich Abweichungen zum Beispiel in der Höhenlage der Bewehrung stärker als bei Stahlbetonbauten auf die Tragfähigkeit aus. Bild 10 zeigt einen Sägeschnitt eines mit Spritzbeton hergestellten Zugprobekörpers für die Schale NEST HiLo, bei der eine signifikante Abweichung der Höhenlage der Bewehrung gegeben ist. Aus der aktuellen Diskussion im Projekt C<sup>3</sup>-V1.2 zeichnet sich ab, dass die Maßtoleranz für die Bewehrungslage im Bereich zwischen 10 mm und 70 mm gegenüber den aus dem Fertigteilbau bekannten Wert  $\pm 5$  mm [34] (für Bauteilhöhen größer 70 mm) reduziert werden muss. In der Diskussion ist beispielsweise die Festlegung einer Toleranz von 3 mm für Bauteilhöhen von 30 mm. Eine umfangreiche Auswertung von Sägeschnitten aus Praxisprojekten mit Herstellung im Gießverfahren am IMB der RWTH Aachen hat gezeigt, dass dieser Wert in 90% der Fälle eingehalten werden konnte. Ob diese Werte für Spritzbeton bzw. Ortbeton angepasst werden müssen, ist noch abzustimmen. Anders als bei Stahlbeton existieren zur Überprüfung der Betondeckung noch keine zerstörungsfreien Prüfmethoden, weshalb bis auf weiteres Sägeschnitte oder Bohrkern zur Bewertung herangezogen werden müssen.



*Bild 10: Sägeschnitt eines Zugprobekörpers aus Spritzbeton für das Projekt NEST HiLo mit Lageabweichung der Bewehrung (Foto: Jan Bielak)*

### 5. Zusammenfassung und Ausblick

Der Werkstoff Textilbeton bzw. Carbonbeton eignet sich ideal für die Herstellung von dünnwandigen, geometrisch komplexen Schalentragerwerken. Diese sind sowohl seitens der Bemessung als auch seitens der Herstellung erheblich anspruchsvoller in der Umsetzung als einachsig gespannte ebene Platten, wie sie zum Beispiel für Fassaden verwendet werden. Grundsätzlich gibt dabei die Art der Schalung vor, welche Herstellungsmethodik zum Einsatz kommen kann. Die Verwendung von Spritzbeton im Schalenbau ermöglicht hier große gestalterische Freiheiten, ohne dass auf aufwändige doppelwandige Schalungen zurückgegriffen werden muss. Hierdurch können Schalen wirtschaftlich hergestellt werden. Aus abgeschlossenen und laufenden Forschungsvorhaben ist bereits umfangreiches theoretisches und praktisches Wissen für die erfolgreiche Verwendung des innovativen Materials

für den Schalenbau vorhanden. Derzeit und in absehbarer Zukunft sind zwar keine Massen-anwendung im Neubau für Schalen aus Textilbeton oder Carbonbeton zu erwarten. Dennoch kann gerade bei Spezialanwendungen und architektonisch anspruchsvollen Einzelbauwerken der Werkstoff sein Potential und seine Stärken voll ausspielen. Damit in der Praxis auch ohne eingeführte Regelwerke sicher gebaut werden kann, muss die Planung in besonderem Maße Aspekte der Herstellung, der Materialprüfung und der Qualitätssicherung berücksichtigen und verknüpfen.

## 6. Literatur

- [1] *May, R.:*  
Von Biebrich in die ganze Welt. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), S. 385–396.
- [2] *Hankers, C., Schmidt, H.-G., Matzdorff, D.:*  
Die Großmarkthalle Frankfurt a. M. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), S. 414–420.
- [3] *Weller, B., Tasche, M.:*  
Ingenieurbaukunst. Die Betonschalen von Ulrich Müther (1934-2007). Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), S. 438–446.
- [4] *Scholzen, A., Chudoba, R., Hegger, J.:*  
Dünnwandiges Schalentragwerk aus textilbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), S. 767–776.
- [5] *Scholzen, A., Chudoba, R., Hegger, J.:*  
Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete. Part II. Structural Concrete 16 (2015), S. 115–124.
- [6] *Scholzen, A., Chudoba, R., Hegger, J.:*  
Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete. Part I. Structural Concrete 16 (2015), S. 106–114.
- [7] *Scholzen, A., Chudoba, R., Hegger, J., Will, N.:*  
Leichte Dachschaalen aus Carbonbeton. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), S. 663–675.
- [8] *Block, P., Schlueter, A., Veenendaal, D., Bakker, J., Begle, M., Hischer, I., Hofer, J., Jayathissa, P., Maxwell, I., Echenagucia, T. M., Nagy, Z., Pigram, D., Svetozarevic, B., Torsing, R., Verbeek, J., Willmann, A., Lydon, G. P.:*  
NEST HiLo. Investigating lightweight construction and adaptive energy systems. Journal of Building Engineering 12 (2017), S. 332–341.
- [9] *Curbach, M., Hauptenbuchner, B., Ortlepp, R., Weiland, S.:*  
Textilbewehrter Beton zur Verstärkung eines Hyparschalentragwerks in Schweinfurt. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), S. 353–361.
- [10] *Schladitz, F., Lorenz, E., Jesse, F., Curbach, M.:*  
Verstärkung einer denkmalgeschützten Tonnenschale mit Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), S. 432–437.
- [11] *Scheerer, S., Chudoba, R., Garibaldi, M. P., Curbach, M.:*  
Shells Made of Textile Reinforced Concrete - Applications in Germany. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures 58 (2017), S. 79–93.
- [12] *Carbon Concrete Composite e.V.:*  
Bauen neu Denken - Homepage des C<sup>3</sup>-Vereins. [www.bauen-neu-denken.de](http://www.bauen-neu-denken.de), 28.08.2017.
- [13] *Hegger, J., Will, N., Chudoba, R., Scholzen, A., Bielak, J.:*  
Bemessungsmodelle für Bauteile aus Textilbeton. In: Scheerer, S., van Stipriaan, U. (Hg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, S. 124–145.
- [14] *Sharei, E., Scholzen, A., Hegger, J., Chudoba, R.:*  
Structural behavior of a lightweight, textile-reinforced concrete barrel vault shell. Composite Structures 171 (2017), S. 505–514.
- [15] *Kulas, C.:*  
Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile. Aachen: IMB 2013.
- [16] *Scholzen, A.:*  
Flächige Tragstrukturen aus textilbewehrtem Beton. Experimentelle und numerische Charakterisierung des Tragverhaltens, Bemessung und Herstellungsmethodik. Aachen: Eigenverlag Lehrstuhl und Institut für Massivbau 2014.

- [17] *Voss, St.:*  
Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton. Dissertation. Aachen Mai 2008.
- [18] *Molter, M.:*  
Zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton. Dissertation. Aachen Juni 2005.
- [19] *Niewels, J.:*  
Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoff-Bewehrung. Dissertation. Aachen November 2008.
- [20] *Kurth, M. C.:*  
Zum Querkrafttragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoff-Bewehrung. Dissertation. Aachen Dezember 2012.
- [21] DIBT:  
Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff Nenndurchmesser: 8, 12, 16, 20 und 25 mm: DIBT - Deutsches Institut für Bautechnik.
- [22] *Solidian GmbH:*  
Bewehrungsdatenblätter auf Firmenhomepage. [www.solidian.de](http://www.solidian.de), 25.08.2017.
- [23] *Rempel, S., Hegger, J., Will, N.:*  
Schutzschichten aus textilbewehrtem Spritzmörtel zur Instandsetzung von Wasserbauwerken. In: Kusterle, W. (Hg.): Tagungsunterlagen zur Spritzbeton-Tagung 2015.
- [24] *Curbach, M., Schütze, E.:*  
Entwicklung von Bemessungs- und Sicherheitskonzepten sowie standardisierter Prüfkonzeppte zur Materialcharakterisierung von Carbonbeton. Basisvorhaben B3 - Teilvorhaben C3-B3-I-a : Abschlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2015-30.06.2016. Dresden: Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau 2016.
- [25] TUDAG:  
Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton): DIBT - Deutsches Institut für Bautechnik (2016).
- [26] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:*  
Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Berlin: Beuth Verlag GmbH (Mai 2005).
- [27] *Bochmann, J., Curbach, M., Jesse, F.:*  
Carbonbeton unter einaxialer Druckbeanspruchung. *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017), S. 293–302.
- [28] *Bielak, J., Hegger, J., Chudoba, R.:*  
Towards Standardization: Testing and Design of Carbon Concrete Composites. In: Hordijk, D., Luković, M. (Hg.): *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. Proceedings of the 2017 fib Symposium, held in Maastricht, The Netherlands, June 12-14, 2017*. Cham: Springer International Publishing, S. 313–320.
- [29] *Rempel, S., Ricker, M.:*  
Ermittlung der Materialkennwerte der Bewehrung für die Bemessung von textilbewehrten Bauteilen. *Bauingenieur* 92 (2017), S. 280–288.
- [30] *Hinzen, M.:*  
Prüfmethode zur Ermittlung des Zugtragverhaltens von textiler Bewehrung für Beton. *Bauingenieur* 92 (2017), S. 289–291.
- [31] *Brameshuber, W., Hinzen, M., Dubey, A., Peled, A., Mobasher, B., Bentur, A., Aldea, C., Silva, F., Hegger, J., Gries, T., Wastiels, J., Malaga, K., Papanicolaou, C., Taerwe, L., Curbach, M., Mechtcherine, V., Naaman, A., Orlowsky, J., Hamelin, P., Reinhardt, H.-W., Shah, S., Toledo, R., Triantafillou, T., Larbi, A., Garcia, D., Garmendia, L., Gopinath, S., Jesse, F.:*  
Recommendation of RILEM TC 232-TDT. Test methods and design of textile reinforced concrete – Uniaxial tensile test: test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile reinforced concrete. *Materials and Structures* 49 (2016), S. 4923–4927.
- [32] *Hegger, J., Will, N., Bielak, J.:*  
Standardisierung von Prüfmethode für Carbonbeton: Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung. In: Lehrstuhl für Baustofftechnik (Hg.): *Beton - Herausforderungen in Forschung und Praxis. Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher*, S. 348–358.
- [33] *Lorenz, E.:*  
Endverankerung und Übergreifung textiler Bewehrungen in Betonmatrices. Dissertation. Dresden 2014.
- [34] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:*  
DIN EN 13369 Allgemeine Regeln für Betonfertigteile (2013).

**Zu den Autoren**

Jan Bielak, M.Sc. RWTH

Studium des Bauingenieurwesens und der Wirtschaftswissenschaft an der RWTH Aachen, bis 2015 Tragwerksplaner in einem Ingenieurbüro in Frankfurt, seit 2016 wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen.

*[jbielak@imb.rwth-aachen.de](mailto:jbielak@imb.rwth-aachen.de)*

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger

Studium des Bauingenieurwesens an der RWTH Aachen, Dissertation an der TU Braunschweig 1984, 1985 bis 1993 Philipp Holzmann AG, seit 1993 Professor am Institut für Massivbau der RWTH Aachen

*[jhegger@imb.rwth-aachen.de](mailto:jhegger@imb.rwth-aachen.de)*