



Manfred Rübner

Silke Scheerer · Ulrich van Stipriaan (Herausgeber)

Festschrift
zu Ehren von
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h.
Manfred Curbach

Dresden, 28. September 2016

Impressum

Herausgeber	Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan	
Redaktion	Silke Scheerer	
Autorenfotos	<i>Fotostudio Jünger</i>	<i>S. 124 oben</i>
	<i>Edvard Krikourian</i>	<i>S. 124 unten rechts</i>
	<i>Kirsten J. Lassig</i>	<i>S. 12</i>
	<i>Bertram Lubiger</i>	<i>S. 192</i>
	<i>Juri Paulischkis</i>	<i>S. 104</i>
	<i>A. T. Schaefer, Stuttgart</i>	<i>S. 62</i>
	<i>Sylke Scholz, Dresden</i>	<i>S. 256</i>
	<i>Ulrich van Stipriaan</i>	<i>S. 80, 90, 104, 124 Mitte rechts, 146, 150, 152, 160, 216, 228, 234 Mitte links und unten links/rechts, 292, 320</i>
	<i>Nic Vermeulen</i>	<i>S. 280</i>
	<i>Irina Westermann</i>	<i>S. 42 oben</i>
	<i>Von Autoren zur Verfügung gestellt: S. 16, 24, 42 unten, 124 (2x), 178, 234 (3x)</i>	
Layout, Satz	Ulrich van Stipriaan	
Titelbild	Ulrich van Stipriaan	
Korrektur	Birgit Beckmann, Angela Heller	
Druck	addprint AG, Bannewitz	

Redaktionsschluss für dieses Buch war der 28. August 2016.

Inhalt

<i>Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan und Wolfgang Leiberg</i> Zum Geleit	8
Teil I – Texte zum Kolloquium	11
<i>Hans Müller-Steinhagen</i> Grußwort	12
<i>Harald Budelmann</i> Laudatio	16
<i>Konrad Bergmeister</i> Weniger ist manchmal mehr – ein Beitrag zur Mindestbewehrung	24
<i>Harald S. Müller und Michael Haist</i> Opus Caementitium Optimum – Der nachhaltige Beton des 21. Jahrhunderts	42
<i>Werner Sobek</i> Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume	62
Teil II – Weitere Beiträge	79
<i>Thomas Bösche</i> Mehr Mut im Ingenieurbau.....	80
<i>Harald Budelmann und Sven Lehmborg</i> Von der Küchenarbeitsplatte zum leichten Tragwerk – Was kann ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton?	90

<i>Luna Manolia Daga und Udo Wiens</i>	
Mehr als nur schwarze Buchstaben auf weißem Papier – Ein Essay	104
<i>Ulrich Häußler-Combe</i>	
Aspekte der Modellierung von Stahlbetontragwerken	108
<i>Josef Hegger, Norbert Will, Rostislav Chudoba, Alexander Scholzen und Jan Bielak</i>	
Bemessungsmodelle für Bauteile aus Textilbeton	124
<i>Frank Jesse</i>	
Über die Länge der Leine	146
<i>Peter Mark</i>	
Mit Leichtigkeit	150
<i>Steffen Marx</i>	
Gute Lehre im Konstruktiven Ingenieurbau	152
<i>Viktor Mechtcherine</i>	
Hochduktiler Beton – eine Konkurrenz zu Textilbeton?	160
<i>Karl Morgen</i>	
Deutschlands größte Kamera	178
<i>Peter Offermann</i>	
Wie alles begann	188
<i>Dirk Proske</i>	
Ist die Energiewende ein technischer Hype?	192
<i>Mike Schlaich</i>	
Die Hommage als Quelle der Inspiration	216

<i>Jürgen Schnell</i>	
Fashion Statement	228
<i>Mario Smarslik, Christoph Kämper, Patrick Forman, Tobias Stallmann, Peter Mark und Jürgen Schnell</i>	
Topologische Optimierung von Betonstrukturen	234
<i>Jürgen Stritzke</i>	
Leipziger Großmarkthalle – ein „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland“	256
<i>Luc Taerwe</i>	
Self-anchored suspension bridges with prestressed concrete deck: historic examples	280
Teil III – Institut für Massivbau	291
<i>Silke Scheerer (Text) · Ulrich van Stipriaan (Fotos)</i>	
Massivbau an der TU Dresden gestern und heute	292
<i>Angela Schmidt</i>	
Die eingeschlichenen Fehler	320
<i>Manfred Curbach</i>	
Habilitation / Promotionen	326
<i>Ulrich van Stipriaan (Fotos)</i>	
Institut für Massivbau Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	330

Teil II
Weitere Beiträge



Josef Hegger, Norbert Will, Rostislav Chudoba, Alexander Scholzen und Jan Bielak

Bemessungsmodelle für Bauteile aus Textilbeton

Das Autorenteam der RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau

Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger,
Dr.-Ing. Norbert Will,
Dr.-Ing. Rostislav Chudoba,
Dr.-Ing. Alexander Scholzen,
Jan Bielak M.Sc.

1 Einführung

Textilbewehrter Beton hat großes Potential bei der Herstellung von filigranen Tragstrukturen, (Curbach und Jesse [5]). Durch die nicht-korrosive Textilbewehrung aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) oder Carbon ist nur eine minimale Betondeckung notwendig. Die möglichen Anwendungsfelder für Textilbeton reichen von Fassadenplatten (Hegger et al. [11], Rempel et al. [23]), Sandwichelementen (Shams et al. [26]) und schlanken Fußgängerbrücken (Curbach et al. [3], Hegger et al. [12]) über Schalenkonstruktionen (Scholzen et al. [31], [32]), Bild 4, bis zu nachträglichen Verstärkungsmaßnahmen (Curbach et al. [4], Ehlig et al. [6], Weiland et al. [38]). In Abhängigkeit von den Anforderungen der jeweiligen Anwendung, der Herstellungstechnik oder den geometrischen Randbedingungen können die Materialeigenschaften des Komposits

in einer großen Bandbreite variiert werden. Maßgebend hierfür sind vor allem die Eigenschaften der verwendeten Textil-Tränkungs-Kombination sowie die Feinbetonmischung. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die wesentlichen Abhängigkeiten zwischen Materialeigenschaften, Anwendungsfeldern und verfügbaren Bemessungsansätzen.

Die Textilbewehrung, insbesondere die Art der Tränkung, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Kompositmaterials und beeinflusst direkt die Wahl der möglichen Bemessungsmethode für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT). Im Abschnitt 2 werden derzeit verfügbare Textilien auf Basis ihres Materialverhaltens klassifiziert. In Abschnitt 3 werden Ansätze zur Bemessung von Textilbetonbauteilen zunächst am Beispiel eines einfachen Balken- und Plattenelements dis-



*Bild 1
Anwendungsbeispiel einer filigranen Textil-
betonkonstruktion ist die Fußgängerbrücke
Albstadt-Lautlingen (Foto: solidian)*



Bild 2
Anwendungsbeispiel
eines filigranen Textil-
betonbaus: hinterlüf-
tete Fassadenplatten,
Nimwegen
(Foto: Ben Vulkers,
LIAG Architecten)

kutiert. Im Anschluss wird ein allgemeinerer Ansatz zur Bemessung von Freiformschalen vorgestellt, der auch komplexere Geometrien, Belastungsszenarien und die Normalkraft-Momenten-Interaktion berücksichtigt. Anhand von zwei Beispielen aus der Praxis werden die Bemessungsmethoden exemplarisch durchgespielt.

2 Einflussgrößen auf die Bemessungsmethoden

Die verfügbaren Textilarten weisen in Abhängigkeit ihres Ausgangsmaterials, der Rovingfeinheit sowie des Bindungstyps eine große Bandbreite von mechanischen Eigenschaften auf. Durch verschiedene Tränkungen wie Epoxidharz (EP) und Styrol-Buta-

dien (SBR) wird die Bandbreite zusätzlich vergrößert. In der Konsequenz werden für den Entwurf und die Bemessung von Bauten aus Textilbeton unterschiedliche Herangehensweisen benötigt, um die spezifischen mechanischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Zusätzlich müssen auch andere technische Eigenschaften wie die Formstabilität bei der Handhabung und dem Herstellungsprozess (Gießen, Spritzen oder Laminieren) beachtet werden.

2.1 Charakterisierung der textilen Bewehrung

Das mechanische Verhalten des Textilbetons ist im Wesentlichen durch die Eigenschaften der textilen Bewehrung bestimmt. Im Einzelnen sind es die Materialeigenschaften der Filamente, die Querschnittsfläche der Rovings (die Einheit „tex“ beschreibt das Gewicht der Garne in Gramm pro Kilometer Länge: $\text{tex} = \text{g/km}$), der Bindungstyp der kettengewirkten Textilien (z. B. Trikot oder Franse) und nicht zuletzt die Art des Tränkungsmaterials (z. B. Epoxidharz oder Styrol-Butadien). Die Tränkung der Rovings führt zu einer Homogenisierung des Spannungsprofils innerhalb des Querschnitts der Multifilamentgarne, was im Endeffekt zu einer besseren Aktivierung der inneren Filamente verglichen mit nicht-imprägnierten Rovings führt. Dadurch können höhere Festigkeiten und eine kürzere Verankerungslänge erzielt werden. Eine Tränkung der Rovings kann aber auch genutzt werden,

	Textilien mit Epoxidharztränkung	Textilien mit Styrol-Butadienränkung	Ungetränkte Textilien
Effizienz	hoch unabhängig von der Feinheit	mittel unabhängig von der Feinheit	mittel / gering abhängig von der Feinheit
Verankerungslänge	kurz unabhängig von der Feinheit	mittel abhängig von der Feinheit	mittel / lang abhängig von der Feinheit
Formstabilität	hoch verwendbar für vorgeformte Bewehrung	mittel verwendbar für vorgeformte Bewehrung	gering nicht verwendbar für vorgeformte Bewehrung
Mögliche Geometrien	gerade, eben Balken, Platten	gekrümmt, räumlich Schalen	

*Tabelle 1
Eigenschaften der Textilien in Abhängigkeit von verschiedenen Tränkungsmaterialien, [14]*

um die Formstabilität der Bewehrung zu erhöhen, die während der Betonage im Gießverfahren notwendig ist. Andererseits reduziert die Tränkung die Flexibilität der Bewehrung, die für die Herstellung von gekrümmten Geometrien essentiell ist. Die Materialeigenschaften für verschiedene Arten von textiler Bewehrung sind qualitativ in Tabelle 1 zusammengefasst.

Festigkeit

Um eine qualitative Einordnung für die Bemessung zu ermöglichen, lohnt der Vergleich der Festigkeiten von verschiedenen Textilien im Hinblick auf Rovingfeinheit, Bindungsart und Tränkungsmaterial. Für 3300-tex-Carbonrovings mit einer Epoxidharztränkung (Bild 3) können zum Beispiel im Dehnkörperversuch maximale Textilspannungen von bis

zu 3000 MPa erreicht werden (Rempel et al. [21]). Durch die fast vollständige Aktivierung des Rovings einschließlich der inneren Filamente wird nahezu die Materialfestigkeit der Einzelfilamente erreicht. Im Gegensatz dazu erreicht derselbe Roving mit SBR-Tränkung im Dehnkörper lediglich Spannungen von 2000 MPa (Lorenz et al. [18]). Die geringere Effizienz der Rovings mit SBR-Tränkung lässt sich mit schlechteren inneren Verbundeigenschaften und der Inhomogenität des Spannungsprofils erklären, die zu einer geringeren Aktivierung der inneren Filamente führen. Größere Verankerungslängen innerhalb des Komposits und ein teilweiser Auszug des Kernquerschnitts der Rovings nach der Rissbildung sind die Folge. Selbst bei vergrößerter Verankerungslänge lässt sich die effektive Spannung im Dehnkörper nicht weiter steigern.

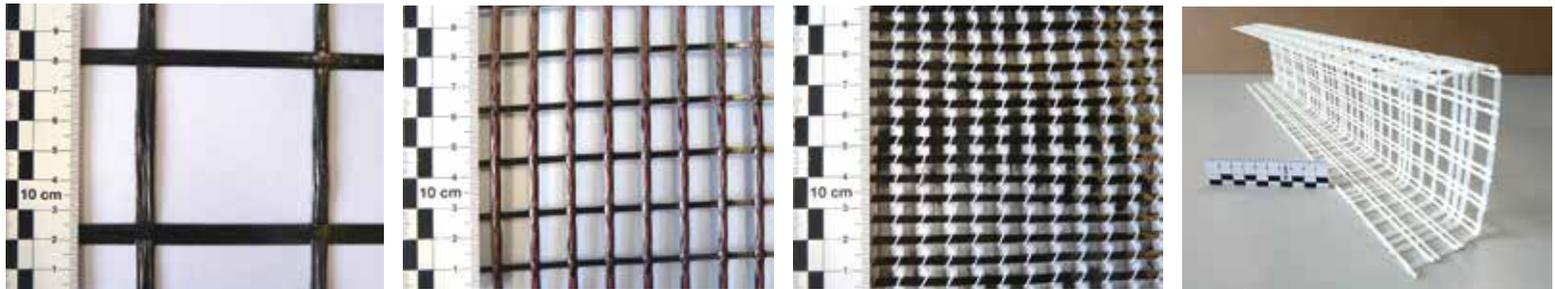


Bild 3

Beispiele textiler Bewehrung; von links nach rechts: ebenes Carbongelege mit EP-Tränkung, Carbontextil mit SBR-Tränkung, ungetränktes Textil, Formbewehrung aus alkali-resistentem Glasgelege mit EP-Tränkung

(Fotos: Alexander Scholzen)

Für ungetränkte Carbontextilien können akzeptable Spannungsniveaus im Dehnkörper von bis zu 1500 MPa erreicht werden, wenn eine geringe Feinheit der Rovings, ein flacher Rovingquerschnitt und eine offene Textilstruktur vorliegen. Dies ist beispielsweise der Fall für die in Bild 2 dargestellten ungetränkten 800-tex-Carbonrovings, die zu einem kettengewirkten Textil mit einfacher Tuchbindung verarbeitet wurden. Bei größeren Querschnitten, insbesondere mit anderen Bindungstypen, führt die unzureichende Aktivierung der inneren Filamente der Rovings zu einer deutlich reduzierten erreichbaren Textilspannung im Dehnkörper.

Formstabilität

Für die Anwendung bei geraden, rechteckigen Bauteilen wie Fassadenplatten (Bild 2), die durch das Gießen von Frischbeton in eine Schalung hergestellt werden, ist eine hohe Formstabilität von Vorteil, da sie das Platzieren der Textilmatten und die Lagesicherung in der Schalung während der Betonage vereinfacht. Die Tränkung mit Epoxid-

harz ermöglicht es sogar, vorgeformte Bewehrungselemente (Bild 3 rechts) herzustellen, die beispielsweise für die Stegbewehrung der Fußgängerbrücke in Bild 1 zum Einsatz kamen. Textilbetonstrukturen mit anspruchsvollen Geometrien wie die Hyperboloid-Schale, Bild 4, setzen allerdings eine hohe Flexibilität der Bewehrung voraus, die es erlaubt, der komplexen doppelt gekrümmten Schalengeometrie zu folgen. Hier ist die Verwendung von EP-getränkten Textilien nur eingeschränkt möglich. Für die in Bild 4 dargestellte Schale wurden daher ungetränkte, flexible Textilien in Kombination mit lagenweise eingebrachtem Spritzbeton verwendet. Ein weiterer Ansatz zur Erstellung von gekrümmten Textilbetonschalen ist in Ehlig et al. [6] beschrieben, die als Textilbetonfertigteile mit SBR-getränkten Textilien bewehrt waren. Durch die relative Formstabilität der SBR-getränkten Bewehrung sind gekrümmte Geometrien zwar möglich, allerdings sind hierzu eine doppelwandige Schalung und die Verwendung von geeigneten Abstandhaltern notwendig.

Bild 4

HP-Schale an der RWTH Aachen

(Foto: Robert Mehl)



Die genannten Anwendungsbeispiele verdeutlichen die vielfältigen Möglichkeiten beim Entwurf und der Bemessung für existierende Textilbetonvarianten. Dies kann gleichermaßen als Herausforderung und Chance gesehen werden. Die Materialeigenschaften des verwendeten Textils und Feinbetons müssen auf die jeweilige Herstellungstechnik und das Anwendungsgebiet maßgeschneidert werden.

2.2 Ermittlung der querschnittsbezogenen Tragfähigkeit

Die Verfügbarkeit querschnittsbezogener Tragfähigkeiten von häufig verwendeten Textiltypen in Verbindung mit üblichen Querschnittsformen und Bewehrungsverteilungen ist die Grundvoraussetzung für eine breite Anwendung von Textilbeton in der Praxis. Ein allgemeiner Ansatz zur Ermittlung der Tragfähigkeit muss die phänomenologischen Unterschiede des Materialverhaltens verschiedener Bewehrungstypen berücksichtigen. Während bei getränkten Textilien nur ein geringer Einfluss der gerissenen Betonmatrix auf die Textilfestigkeit feststellbar ist, zeigt sich bei ungetränkten Textilien eine starke Interaktion zwischen Rissbildungsprozess und der effektiven Textilspannung, die im Komposit erzielt werden kann (Rypl et al. [25], Li et al. [16]).

Für Textilbeton mit getränkter Textilbewehrung kann die maximale Zug- und Biegefestigkeit im

Grenzzustand der Tragfähigkeit aus dem Materialverhalten der Einzelkomponenten – also der Spannungs-Dehnungslinien des Rovings und des Betons – direkt ermittelt werden, indem das Gleichgewicht der inneren und äußeren Normalkräfte und Biegemomente an der kritischen Stelle gebildet wird. Zukünftig könnten dann textilspezifische Bemessungshilfen vergleichbar zu den aus dem Stahlbetonbau bekannten ω -Tafeln (mit ω = mechanischer Bewehrungsgrad) bereitgestellt werden. Für Biegeverstärkungen ist dies von Frenzel [9] ausführlich dargestellt worden. Voraussetzung hierfür ist die Ermittlung der Komponentenfestigkeiten anhand von Standardtests für die jeweiligen Materialien.

Für ungetränkte Textilien und für Textilien mit unvollständiger SBR-Tränkung ist die Vorhersage der querschnittsbezogenen Tragfähigkeit auf Basis der Komponenten über die Gleichgewichtsbedingungen nicht möglich. Die Interaktion aus dem Verbundverhalten der Rovings und der Rissbildung in der Matrix führt zu einer variablen Festigkeit des Textils in Abhängigkeit vom Bewehrungsgrad und der Lage im Querschnitt (Rypl et al. [25], Li et al. [16]). Die querschnittsbezogene Tragfähigkeit von Bauteilen mit ungetränkten Textilien muss daher experimentell am Komposit ermittelt werden. Die Probekörper sollten dabei den gleichen Querschnitt und die gleiche Bewehrungsverteilung wie das zu bemessende Bauteil aufweisen. Verfahren zur experimentellen Ermittlung der Zug- und Biegefestigkeit von Kompositen sowie zur Erstellung

	Textilien mit Epoxidharztränkung	Textilien mit Styrol-Butadien-tränkung	Ungetränkte Textilien
Einfluss der Rissbildung auf die Textilfestigkeit	gering	mittel	hoch
Querschnittsbezogene Tragfähigkeit	abgeleitet aus den Materialgesetzen der Komponenten Roving (Zug), Beton (Druck)		experimentell ermittelte Komposit-tragfähigkeit für gegebene Textil-Beton-Kombination Zug- und Biegeversuche
Explizite Querschnittsbemessung	ω -Tafel, basierend auf der Komponentenfestigkeit von Roving und Beton		nicht möglich
Querschnittsbezogene Umhüllende für Bemessung im GZT	n-m-Interaktionsdiagramm, basierend auf der Kompositfestigkeit		

*Tabelle 2
Ermittlung der querschnittsbezogenen Tragfähigkeit für verschiedene Arten der Tränkung von Textilbewehrung, [14]*

der n-m-Interaktionsdiagramme finden sich in Scholzen et al. [32]. Tabelle 2 liefert einen Überblick für die verschiedenen Ansätze zur Beurteilung der querschnittsbezogenen Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der Tränkung.

2.3 Klassifizierung von Ansätzen zur Bemessung im GZT

Da getränkte Textilien überwiegend für gerade Balken oder Platten zum Einsatz kommen, ist es möglich, die Bemessung im GZT auf der Basis des a priori identifizierten kritischen Querschnittes vorzunehmen, z. B. die Feldmitte eines Einfeldträgers

oder der Stützquerschnitt eines Zweifeldträgers, (Rempel et al. [21]).

Demgegenüber können für Schalen mit komplexer Belastungssituation die kritischen Querschnitte nicht a priori bestimmt werden. Der Bemessungsansatz muss folglich in der Lage sein, die kritische Querschnittsstelle unter Berücksichtigung von Momenten-Normalkraftinteraktion zu identifizieren. Außerdem muss die Anisotropie des Verbundwerkstoffes berücksichtigt werden, wenn die Hauptspannungsrichtungen nicht mit der Verlegerichtung des Textils übereinstimmen, die Rovings also gegen die Hauptspannungsrichtung verdreht

Tabelle 3
Klassifizierung von
Bemessungsansätzen
im GZT, [14]

	Balken und Platten	Schalen
Interaktion von Normalkraft und Moment	nein nur bei überwiegender Biegung	ja kombinierte Belastungsszenarien
Kritischer Querschnitt a priori bekannt	ja Ort des maximalen Biegemoments	nein Abhängigkeit von Interaktion und Materialanisotropie
Bemessung im GZT	Überprüfung des kritischen Querschnitts.	Ausnutzungsgrad für die gesamte Struktur ermitteln

sind. Wegen der Komplexität dieses Ansatzes ist eine computergestützte Bemessung notwendig (Scholzen et al. [32]). Der vorgeschlagene Weg wird exemplarisch anhand der HP-Schale in Bild 4 dargestellt. Tabelle 3 fasst die Klassifizierung der Bemessung im GZT zusammen.

3 Bemessungsmodelle für Normalkraft und Biegung

3.1 Balken- und Plattenelemente mit getränkter Textilbewehrung

Wegen des hohen Anwendungspotentials für dünne Fassadenplatten aus Textilbeton ist die Bemessung dieser Bauteile in der Praxis von besonderer Bedeutung. Die Dicke der Platten beträgt in Abhängigkeit von der Spannweite zwischen 20 mm und 40 mm. Ebene, gerade Bauteile wie Fassadenplatten werden üblicherweise mit getränkten Textilien bewehrt, da diese eine höhere aktivierbare

Spannung bieten und sich der Herstellungsprozess durch die höhere Steifigkeit der Bewehrung vereinfacht, (Hegger et al. [11]).

Anwendungsbeispiel: großformatige Fassadenplatten

Bild 5 zeigt eine Fassade aus großformatigen Textilbetonplatten ($A = 14,3 \text{ m}^2$) mit den Abmessungen $b / h = 3,20 \text{ m} / 4,50 \text{ m}$ und einer Dicke von 30 mm. Als Bewehrung wurde eine Lage Carbontextil aus 3300-tex-Rovings mit Epoxidharztränkung verwendet (links in Bild 3). Der Rovingabstand $s_{\text{tex},0}$ beträgt für die 0°-Richtung 60 mm, für die 90°-Richtung des Textils – $s_{\text{tex},90} = 62 \text{ mm}$. Die Maschenweite und die hohe Formstabilität der Bewehrung sind für die Herstellung als Fertigteil im Gießverfahren geeignet.

Zunächst wird die erste Lage Frischbeton in die Schalung eingebracht, danach die Bewehrung plat-

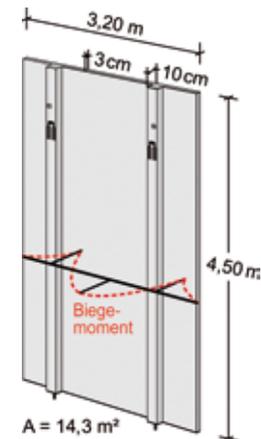
ziert und abschließend die zweite Lage Beton eingebracht.

Die Fassadenplatten sind über zwei Verstärkungsrippen der Dicke 10 cm an der Tragschale des Gebäudes befestigt (Bild 5). Da die horizontalen Windlasten von der Platte einachsig auf die Tragrippen übertragen werden, kann die Bemessung wie für einen Einfeldträger mit zwei Kragarmen und Rechteckquerschnitt erfolgen.

Ermittlung des maximalen Biegemoments

Eine explizite Querschnittsbemessung von Einfeldträgern und Plattenelementen mit getränkter textiler Bewehrung kann auf Basis der Materialeigenschaften von Bewehrung und Beton in Analogie zum klassischen Stahlbetonbau durchgeführt werden. Das Querschnittsmodell für Textilbetonbalkenelemente ist schematisch in Bild 6 für den Fall der reinen Biegung dargestellt. Ein ähnliches Vorgehen für die Bemessung von textilbetonverstärkten Stahlbetonstrukturen ist in Curbach et al. [4], Schladitz et al. [28], [29] oder Müller et al. [20] beschrieben. Ein weiteres Beispiel für die querschnittsbezogene Bemessung unter Berücksichtigung des Einflusses von Kurzfasern wird in Mobasher [19] erläutert.

Um die maximale Biegetragfähigkeit M_u für einen gegebenen Querschnitt vorherzusagen, sind die Materialgesetze des Betons und der Textilbe-



wehrung a priori erforderlich (Bild 7) bzw. sind experimentell durch Druck- und Zugversuche zu ermitteln.

Für die iterative Berechnung der querschnittsbezogenen Biegetragfähigkeit eines gegebenen Textilbetonquerschnitts, Bild 6 (a), wird in Anlehnung an Mobasher [19] eine lineare Dehnungsverteilung über die Querschnittshöhe angenommen. Am oberen Rand beträgt die Dehnung ϵ_c und für die unterste Bewehrungslage $\epsilon_{t,0}$, Bild 6 (b). Zur Berechnung des Versagemomentes M_u wird die maximale Zugdehnung $\epsilon_{t,0}$ unter Annahme von Bewehrungsversagen auf die Bruchdehnung $\epsilon_{t,u}$ begrenzt, die in den Rovingzugversuchen ermittelt wurde.

Der Wert der Betondehnung ϵ_c an der Oberseite des Querschnitts muss iterativ durch Variation der

*Bild 5
Großformatige Fassadenplatten: Foto der Fassade des St.-Leonhard-Gymnasiums in Aachen (Foto: Robert Mehl) und Rückseite eines Textilbetonelementes mit Verstärkungsrippen (Grafik: Sergej Rempel) [22]*

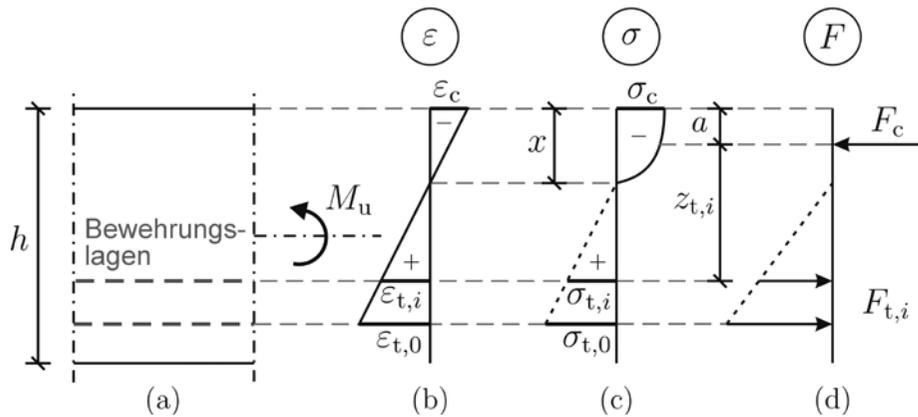


Bild 6
 Berechnung der maximalen Biegetragfähigkeit eines Textilbetonquerschnitts basierend auf den Materialgesetzen von Beton und Roving: (a) Querschnittsdarstellung; (b) Dehnungsverteilung; (c) Spannungsverteilung; (d) innere Kräfte
 nach [15]

Dehnungsebene ermittelt werden, bis das Gleichgewicht der inneren Normalkräfte erfüllt ist. Die Spannungsverteilung ergibt sich aus der angenommenen Dehnungsverteilung und den Materialgesetzen (Bild 6c). Das Integral der Druckspannung σ_c über die Druckzonenhöhe x ergibt die Druckkraft F_c (Bild 6d). Die Zugkräfte $T_{t,i}$ an den Bewehrungslagen i (Bild 6d) ergeben sich aus den Bewehrungs-

flächen $A_{\text{tex},i}$ und der Spannung $\sigma_{t,i}$. Die Druckdehnung wird iterativ ermittelt, wobei das innere Normalkraftgleichgewicht herrschen muss. Das Bemessungsmoment M_u ergibt sich schließlich aus dem Momentengleichgewicht.

Validierung des Bemessungsmodells durch Biegeversuche

Um das beschriebene Bemessungsmodell zu validieren, wurden Versuchskörper mit unterschiedlichen Querschnittsformen (rechteckige Platten und profilierte Doppel-T-Träger, Bild 8) im Vierpunktbiegeversuch geprüft, Rempel et al. [21]. Die Proben mit rechteckigem Querschnitt waren mit einer oder zwei Lagen EP-getränktem Textil bewehrt, sodass auch der Einfluss des Bewehrungsgrades in der Testreihe untersucht werden konnte. Die Spannweite der Biegekörper betrug $l_0 = 600$ mm für die Platten und $l_0 = 1300$ mm für die Doppel-T-Träger.

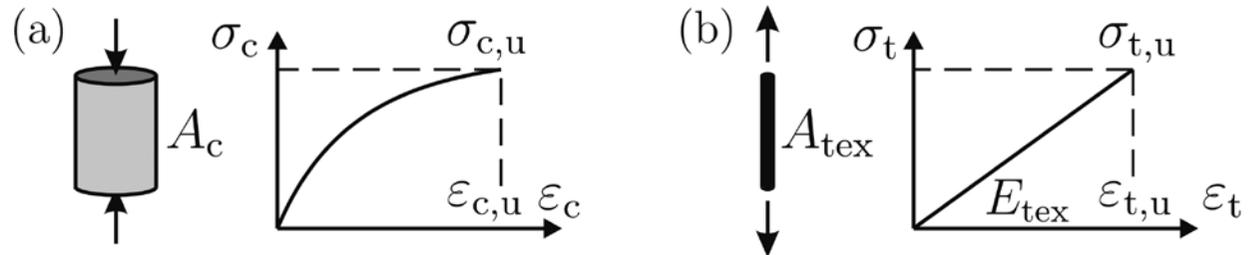


Bild 7 Schematische Darstellung der Materialgesetze für die Komponenten des Komposits:
 (a) Materialgesetz des Betons für Druck und (b) Materialgesetz für den getränkten Roving für Zug
 nach [15]

Die Materialkomponenten Beton und Textilbewehrung, die bei den Versuchen zum Einsatz kamen, entsprachen denen des Anwendungsbeispiels der großformatigen Textilbetonfassadenplatten in Bild 5.

Das Größtkorn des Betons betrug 5 mm und die Druckfestigkeit wurde zu $f_{cm,cyl} = 87 \text{ MPa}$ ($f_{cm,cube} = 100 \text{ MPa}$) bestimmt, Rempel et al. [21]. Die am Zylinder ($D/h = 150 \text{ mm}/300 \text{ mm}$) in der Druckprüfung ermittelte Spannungs-Dehnungs-Linie ist in Bild 7a dargestellt (durchgehende Linie). Nach DIN EN 1992-1-1 [8] kann das Materialgesetz für hochfesten Beton mit folgender Gleichung angenähert werden (gestrichelte Linie in Bild 9a):

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = 87 \cdot \frac{1,3 \cdot \frac{\varepsilon_c}{2,4} - \left(\frac{\varepsilon_c}{2,4}\right)^2}{1 - 0,7 \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{2,4}\right)} \quad (1)$$

Die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung des verwendeten epoxidharzgetränkten Textils wurden mittels Zugversuchen an aus dem Textil entnommenen Rovings ermittelt. Die Ergebnisse für fünf Wiederholungen (graue Linien) und die resultierende mittlere Kurve (schwarze Linie) sind in Bild 9b dargestellt.

Ein Vergleich der berechneten Biegetragfähigkeit und der experimentell ermittelten Biegetragfähigkeit

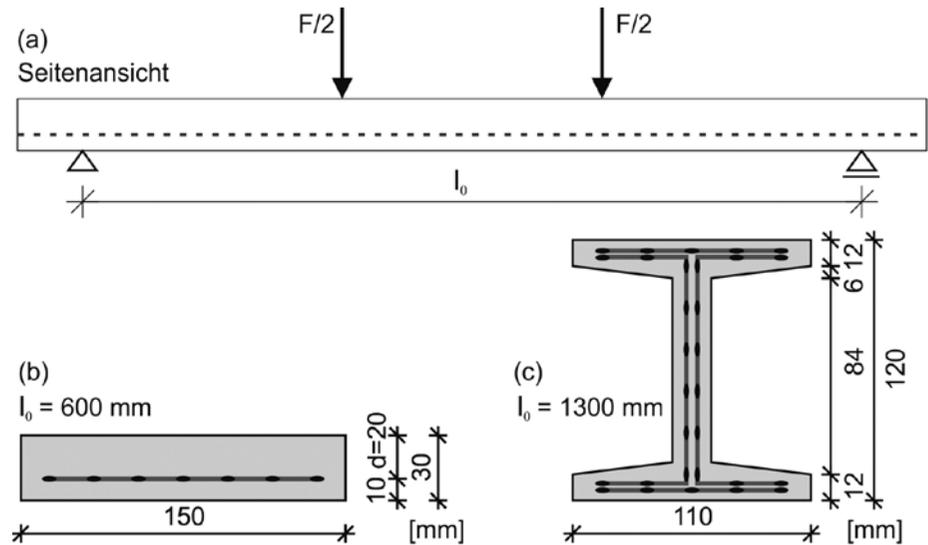


Bild 8
Durchgeführte Biegeprüfungen:
(a) schematischer Versuchsaufbau des Vierpunkt-Biegeversuchs,
(b) Rechteckquerschnitt,
(c) Doppel-T-Querschnitt

(Grafik: Jan Bielak),
nach [15]

keit ist in Bild 10 für die Plattenversuche und für die Balkenversuche mit profiliertem Querschnitt dargestellt. Die Auswertung zeigt eine gute Übereinstimmung der experimentell ermittelten Werte mit der Vorhersage bei einer vertretbaren Streuung von etwa 5 %.

Fazit

Die experimentellen Ergebnisse belegen, dass für Bauteile mit getränkten Textilien die Biegetragfähigkeit durch das beschriebene querschnittsbasierte Modell sowohl für Platten mit verschiedenen Bewehrungsgraden als auch für profilierte Querschnittsformen berechnet werden kann. Die

Bild 9
 Experimentell ermittelte Materialgesetze für Beton (Druck, linkes Diagramm) und Carbonroving mit Epoxidharztränkung (Zug, rechts)

(Grafik: Jan Bielak),
 nach [15]

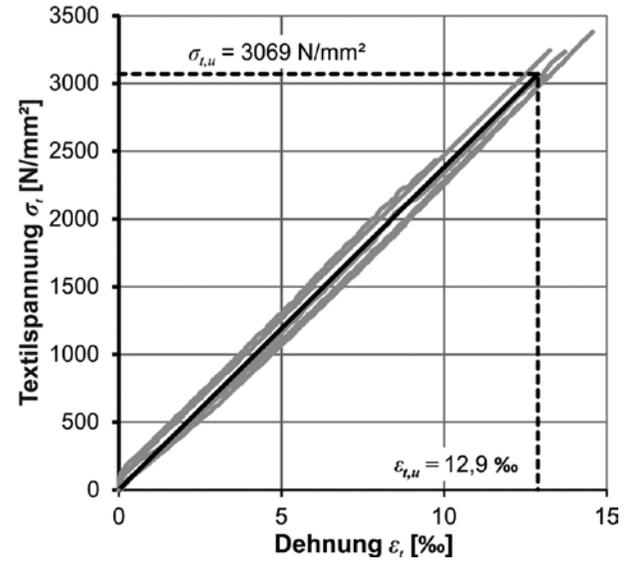
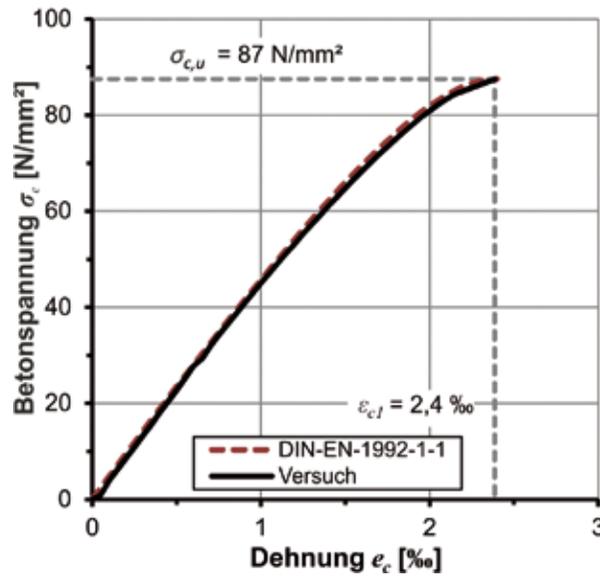
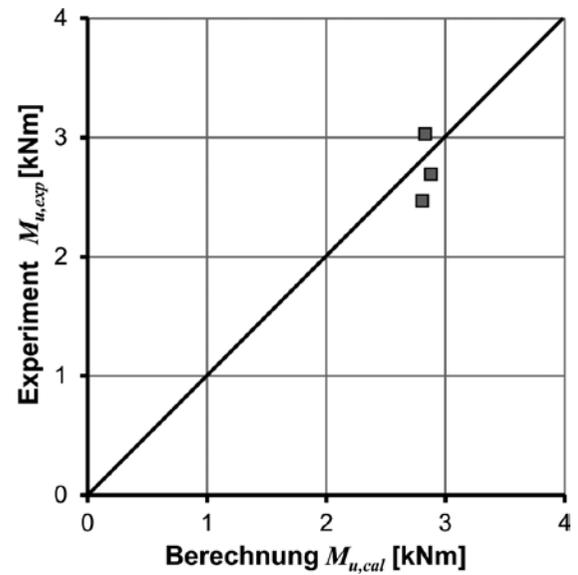
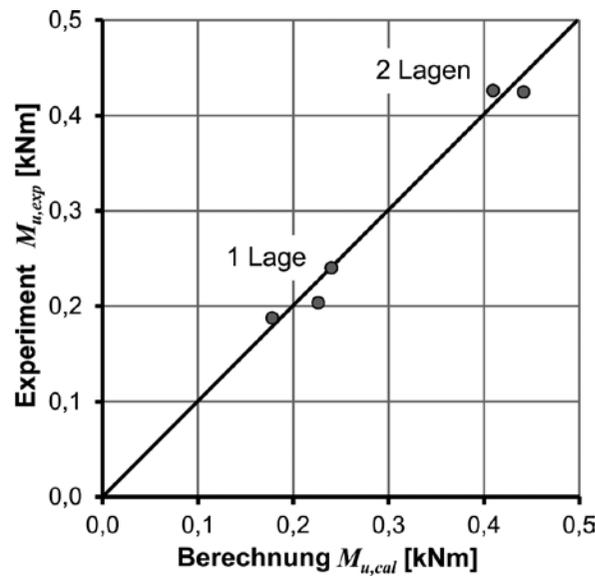


Bild 10
 Vergleich der experimentell ermittelten und der berechneten Biegetragfähigkeit, links für die Proben mit rechteckigem Querschnitt und rechts für die Proben mit profiliertem Querschnitt

(Grafik: Jan Bielak),
 nach [15]



Eingangsparameter für die iterative Berechnung des Versagemomentes sind die Materialgesetze des verwendeten Betons und des Textils, die experimentell bestimmt werden. Ausgehend von dem beschriebenen querschnittsbasierten Modell können zukünftig standardisierte Bemessungshilfen für Ingenieure in Analogie zu den aus dem Stahlbetonbau bekannten (z. B. ω -Tafeln) erstellt werden – zumindest für die wesentlichen Materialkombinationen. Explizit ausgeklammert an dieser Stelle ist die Diskussion um den zu verwendenden Teilsicherheitsbeiwert, der je nach Anwendungsfall (Verstärkung, Neubauteil, statische Bestimmtheit) und im Hinblick auf die erforderliche Duktilität bei Bauteilversagen unterschiedlich sein kann.

3.2 Schalen mit ungetränkter Textilbewehrung

Wenn räumliche Strukturen aus Textilbeton mit komplexen Belastungsszenarien vorliegen, sind zwei zusätzliche Effekte bei der Bemessung zu berücksichtigen:

- (i) Gleichzeitiger Angriff von Normalkräften und Biegemomenten am Querschnitt einer Textilbetonschale und
- (ii) Reduktion der Festigkeit durch Winkelabweichung der Hauptspannungsrichtung von der Verlegerichtung der Textilbewehrung.

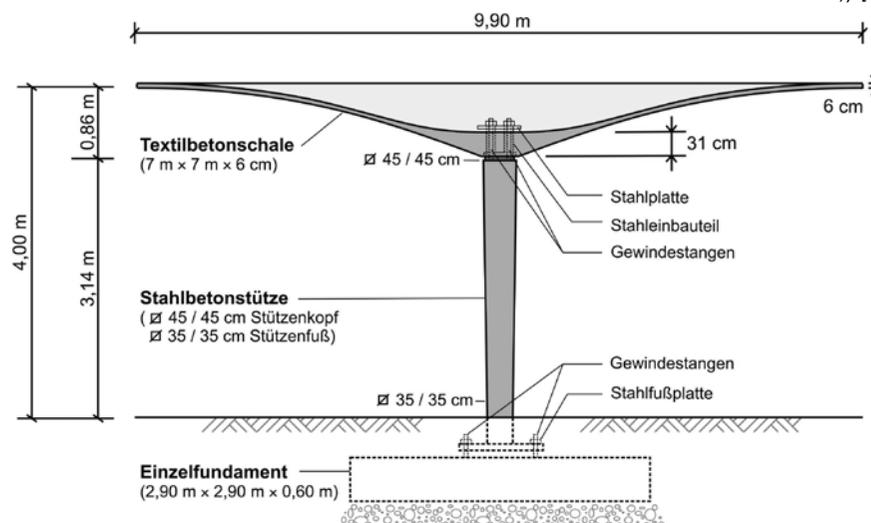
Der Ablauf des Bemessungsverfahrens wird anhand einer Schalenkonstruktion erläutert, die im Detail in Scholzen et al. [31] beschrieben ist.

Anwendungsbeispiel: HP-Schale aus Textilbeton

Als Anwendungsbeispiel für dünnwandige Schalen aus Textilbeton soll die doppelt gekrümmte hyperbolische Paraboloidschale (HP-Schale, Bild 4) diskutiert werden. Die Tragstruktur besteht aus vier großformatigen Dachelementen aus Textilbeton, wobei jedes Element mittig durch eine Stahlbetonstütze unterstützt wird (Bild 11). Jede Schale hat eine projizierte Grundfläche von 7 m × 7 m und eine Dicke von 60 mm. Im Mittelbereich steigt die Dicke bis auf 31 cm an, um eine ausreichende

*Bild 11
Diagonalschnitt der
Tragstruktur bestehend
aus Textilbetonschale,
Stahlbetonstütze und
Gründung*

*(Grafik: Alexander
Scholzen), [34]*



Querschnittsfläche zur Einleitung der Lasten von der Schale in die Stütze zu ermöglichen. Der Architekturf Entwurf durch das Institut für Baukonstruktion der RWTH Aachen (Schätzke et al. [27]) nutzt die Grundform eines Schirms, der jeweils aus vier doppelt gekrümmten Oberflächen (hyperbolische Paraboloid, HP-Flächen) zusammengesetzt ist. In den 1960er und 1970er Jahren waren viele Variationen dieser Schalenkonstruktion durch den spanischen Architekten Félix Candela verwirklicht worden, Cassinello et al. [1]. Unter anderem wegen der Stahlkorrosion bei dünnen Schalen ist diese Konstruktionsform heutzutage fast vollständig aus dem Bewusstsein der Entwerfenden verschwunden. An dieser Stelle bietet Textilbeton neue Möglichkeiten, diese Betonschalentragwerke effizient einzusetzen, Tysmans et al. [37].

Ausnutzungsgrad für kombinierte Normalkraft- und Biegebeanspruchung

Auf der sicheren Seite liegend darf angenommen werden, dass der Betrag der Kompositfestigkeit ein geeignetes Beurteilungskriterium für die Bemessung von Schalenquerschnitten im Grenzzustand der Tragfähigkeit für kombinierte Normalkraft- und Momentenbeanspruchung darstellt. In Analogie zu den Bemessungsnormen für Stahlbeton wird ein vereinfachtes n-m-Interaktionsdiagramm für Textilbetonquerschnitte vorgeschlagen, Bild 12a und Scholzen et al. [32]. Dabei werden die Beträge der experimentell ermittelten querschnittsbezogenen Widerstände

für einaxialen Zug $n_{t,Rd}$ [kN/m], einaxialen Druck $n_{c,Rd}$ [kN/m] und reine Biegung m_{Rd} [kNm/m] genutzt, um eine lineare Interaktion der querschnittsbezogenen Normalkraft- und Biegetragfähigkeit anzunehmen. Für Drucknormalkräfte wird die Komposittragfähigkeit unter kombinierten Belastungsszenarien auf der sicheren Seite liegend unterschätzt. Für Zugnormalkräfte und simultan wirkende Biegemomente wird das tatsächliche Materialverhalten der Textilbetonquerschnitte gut angenähert, wie numerische Untersuchungen und experimentelle Validierungen belegen, Scholzen et al. [33].

Zur Vereinfachung wurde das lineare n-m-Interaktionsdiagramm in eine normierte Form überführt (Bild 10b), das normierte Ausnutzungsgrade bezogen auf die Bemessungswerte der Tragwiderstände für Zug ($n_{t,Rd}$), Druck ($n_{c,Rd}$) und Biegung (m_{Rd}) verwendet, [32]:

$$\eta_{ntd} = \frac{n_{Ed}}{n_{t,Rd}} \quad \eta_{ncd} = \frac{n_{Ed}}{n_{c,Rd}} \quad \eta_{imd} = \frac{|m_{Ed}|}{m_{Rd}} \quad (2)$$

Werden die querschnittsbezogenen Widerstandswerte als positive Zahlenwerte angegeben, erreichen die normierten Flächenschnittgrößen den Grenzzustand der Tragfähigkeit für $\eta(\dots) = 1$. Für kombinierte Belastung eines Querschnitts mit Normalkraft und Biegemoment wird der Gesamtausnutzungsgrad η_{nmd} definiert als:

$$\eta_{nmd} = \max(\eta_{ntd}, \eta_{ncd}) + \eta_{imd} < 1,0 \quad (3)$$

Die Bemessung im GZT muss zeigen, dass für alle Lastfallkombinationen der Gesamtausnutzungsgrad innerhalb der zulässigen Grenzen für jeden Querschnittspunkt liegt (gestrichelter Bereich in Bild 12b).

In dem bisher beschriebenen Bemessungsverfahren wurde implizit angenommen, dass es sich um ein isotropes Material handelt, das keine Abhängigkeit von der Belastungsrichtung aufweist. Die Textilbetonschale weist allerdings durch die ausgeprägt orthotrope Bewehrungsstruktur ein anisotropes Materialverhalten auf, da die Richtungen der Hauptspannungen und der Bewehrung nicht überall zueinander passend ausgerichtet sind. Die Umlenkung der flexiblen Rovings an Rissflanken führt zu einer erhöhten Spannungskonzentration in den äußeren Filamenten, was zu einer Reduktion der Rovingtragfähigkeit führt. Dieser Effekt kann durch den Reduktionsfaktor k_{α} , der von der Winkelabweichung α abhängt, berücksichtigt werden, Hegger und Voss [13].

Da die Bemessungswerte der Festigkeit bei Textilbeton von der Orientierung der Bewehrung abhängen, ist es a priori nicht möglich, den kritischen Querschnittspunkt für den GZT zu identifizieren. Während für jede Lastfallkombination diejenigen Querschnittspunkte mit der maximalen (Zug-)Hauptspannung ermittelt werden können, muss dieser Punkt aber nicht zwangsläufig maßgebend werden, da die größte Winkelabwei-

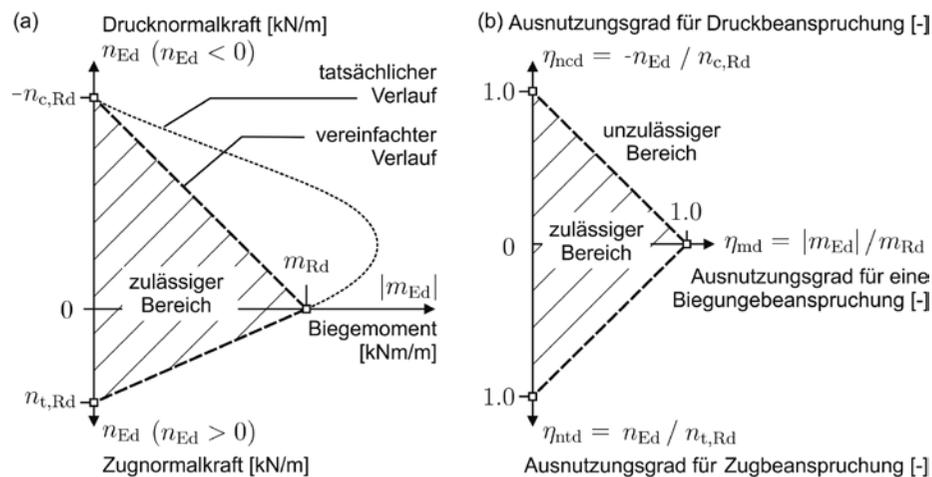


Bild 12: Bemessungsansatz für Textilbetonschalen:

- (a) vereinfachtes n - m -Interaktionsdiagramm basierend auf der Kompositfestigkeit,
- (b) normiertes Interaktionsdiagramm

(Grafik: Alexander Scholzen), [34]

chung des Textils an einer anderen Stelle auftreten kann. Als Konsequenz hiervon müssen die Bemessungswerte der Flächenschnittgrößen für alle möglichen Lastfallkombinationen nach DIN EN 1990 [7] und für alle Punkte der Schale unter Berücksichtigung der Richtungsabhängigkeit der querschnittsbezogenen Festigkeitswerte berechnet werden.

Ermittlung der querschnittsbezogenen Festigkeiten

Um einen direkten Vergleich zwischen den querschnittsbezogenen Tragfähigkeiten der Textilbetonschale (Bild 11) und den Probekörpern für die Zug- und Biegeprüfungen zu ermöglichen, wurden diese mit der gleichen Dicke $t = 60$ mm hergestellt und

mit 12 äquidistant verteilten Lagen Carbontextil bewehrt, Scholzen et al. [31]. Als Bewehrung kam ein ungetränktes kettengewirktes Carbontextil, wie in Bild 3 gezeigt, zur Anwendung, das am Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen entwickelt wurde. Die Rovings weisen eine Feinheit von 800 tex auf, wobei der Rovingabstand in Längsrichtung (0°-Richtung) 8,3 mm und in Querrichtung (90°-Richtung) 7,7 mm beträgt. Durch eine einfache Tuchbindung konnte eine besonders flache und offene Textilstruktur erzielt werden (Schnabel und Grieß, [30]), die eine deutlich bessere Penetration der Zementmatrix in die Filamentzwischenräume und damit eine verbesserte Verbundfestigkeit als bei üblichen Trikot- oder Fransebindungen ermöglicht.

Der hohe Bewehrungsgrad im Querschnitt erforderte eine lagenweise Herstellung in Spritzbetonbauweise. Hierauf wurden die Eigenschaften des vom Institut für Baustoffe der RWTH entwickelten Feinbetons angepasst. Die Mischung weist einen Größtkorndurchmesser von lediglich 0,8 mm auf und enthält zur Verbesserung der Frischbetoneigenschaften 0,5 Volumenprozent Kurzfasern aus AR-Glas mit einem Durchmesser von 14 μm und einer Länge von 6 mm.

Während die Biegetragfähigkeit des Komposits verhältnismäßig leicht durch konventionelle Dreipunktbiegeversuche ermittelt werden kann (im vorliegenden Fall durch Probekörper der Abmessungen

$b / L / t = 20 \text{ cm} / 125 \text{ cm} / 6 \text{ cm}$ und einer Feldlänge $l_0 = 115 \text{ cm}$), ist die Messung der Zugfestigkeit des Komposits nicht trivial. In der Folge wurden vielfältige Prüfmethoden mit unterschiedlichem Fokus entwickelt, wie beispielsweise in Hartig et al. [10] zusammengefasst. Neuere Entwicklungen für eine adaptive Verankerungslänge und große Probekörperdicken wurden in Contamine et al. [2], Lorenz et al. [17], Scholzen et al. [32], [33] oder Schütze et al. [36] dargestellt. Die Standardisierung der Zugprüfung ist ein derzeitiges Ziel des RILEM Technical Committee [24] sowie eines Forschungsvorhabens im Rahmen des C³-Verbundprojektes (Schütze und Curbach, [35]).

Die Kompositfestigkeit für Zug und Biegung hängt direkt von der verwendeten textilen Bewehrung ab. Deshalb ist die Festigkeit des Textils sowohl für die 0°- als auch die 90°-Richtung zu ermitteln. Da für das verwendete Carbontextil die Rovingabstände und damit die resultierenden Festigkeiten nahezu identisch waren, konnte auf der sicheren Seite für die Bemessung im GZT der kleinere der beiden Werte, in diesem Fall für die 0°-Richtung, berücksichtigt werden. In der entsprechenden Prüfserie lag die mittlere Kompositzugfestigkeit bei $\sigma_{t,0} = 16,8 \text{ MPa}$.

Die Druckfestigkeit des Textilbetonquerschnitts von $f_{\text{cm,cube,dry}} = 89 \text{ MPa}$ ist im Wesentlichen durch die Druckfestigkeit des Feinbetons bestimmt. Auf Grundlage der durchgeführten Versuche wurden

die charakteristischen Festigkeiten (5%-Quantil) durch die in EN 1990 [7] vorgegebenen statistischen Auswertungen bestimmt. Unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwerts von $\gamma = 1,5$ ergeben sich die Designwerte für die querschnittsbezogenen Zug-, Druck- und Biegefestigkeiten zu:

$$\begin{aligned} n_{t,Rd} &= 996 \text{ kN/m} \\ n_{c,Rd} &= 2200 \text{ kN/m} \\ m_{Rd} &= 8,3 \text{ kNm/m} \end{aligned} \quad (4)$$

Computergestützte Bemessung im GZT

Auf Grundlage der querschnittsbezogenen Festigkeitswerte erfolgte die numerische Bemessung der HP-Schale im GZT. Dazu wurde der querschnittsbezogene Ausnutzungsgrad für alle Elemente aus der FE-Berechnung der Schale und alle Lastfallkombinationen nach DIN EN 1990 [7] bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 13a im normierten Interaktionsdiagramm aufgetragen. Es ist deutlich erkennbar, dass alle Ausnutzungsgrade innerhalb der zulässigen Grenzen liegen.

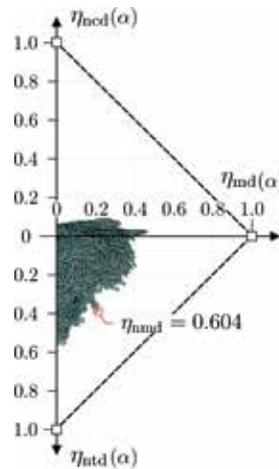
Um einen örtlichen Zusammenhang zwischen den Ausnutzungsgraden und der Lage im Tragwerk herzustellen, zeigt Bild 13b eine graphische Darstellung der Ausnutzung von zwei miteinander gekoppelten Schalen unter allen maßgebenden Lastfallkombinationen, [32].

Fazit

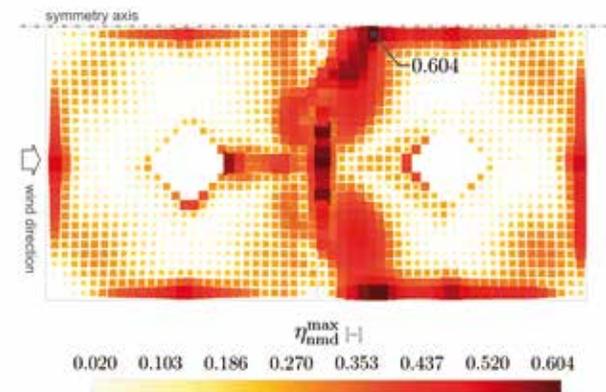
Das Anwendungsbeispiel veranschaulicht das vorgeschlagene Bemessungsverfahren für Textilbetonschalen unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen Normalkraft und Biegemoment. Das Vorgehen erlaubt eine effiziente und direkte Bewertung von komplexen Textilbetonstrukturen im GZT. Um alle Lastfallkombinationen und gleichzeitig die Ausrichtung der Hauptspannungen in Bezug auf die Textilrichtung auswerten zu können, ist eine computerunterstützte Berechnung notwendig. Eine detaillierte Beschreibung der Auswirkungen der Materialanisotropie, der Reduktion der Festigkeit infolge der Stumpfstöße der Bewehrung sowie die Implementierung dieser Effekte in die Bemessung findet sich in Scholzen et al. [32].

Bild 13 Computergestützte Bemessung von zwei gekoppelten HP-Schalen im GZT, Auswertung der Ausnutzungsgrade aller finiten Elemente und aller Belastungskombinationen: (a) normiertes Interaktionsdiagramm, (b) örtliche Verteilung der maximalen Ausnutzungsgrade für alle Lastfallkombinationen (Aufsicht)

(Grafik: Alexander Scholzen), nach [32]



(a)



(b)

4 Zusammenfassung

Die Bandbreite von bisher realisierten Tragwerken aus Textilbeton reicht von einfach gestützten Balken über einaxial gespannte Platten bis zu frei geformten Schalenträgwerken unter komplexen Belastungssituationen. Um eine systematische Herangehensweise bei Entwurf und Bemessung dieser Tragwerke zu ermöglichen, ist eine Klassifizierung der möglichen Material- und Querschnittsformen notwendig. Das mechanische Verhalten des Werkstoffs kann durch die Auswahl der Textilien gezielt gesteuert werden. Die Tränkung (Epoxidharz, Styrol-Butadien oder ungetränkt) hat einen wesentlichen Einfluss auf die Verbundeigenschaften und bestimmt dadurch in hohem Maße das Tragverhalten des Kompositwerkstoffs. Gleichzeitig setzen die gewünschte Herstellungsmethode und die Verfügbarkeit der Komponenten der Materialwahl Grenzen. Trotz der großen Bandbreite an Materialien und der Komplexität des Materialverhaltens müssen Entwurfs- und Bemessungsmethoden für Textilbeton transparent und einfach bleiben, um eine weitere Verbreitung der Bauweise zu ermöglichen. Der vorliegende Beitrag beleuchtet die elementaren Abhängigkeiten zwischen der Wahl der Materialkomponenten, dem Herstellungsprozess, möglichen Geometrien und Belastungsbedingungen von tragenden Textilbetonbauteilen. Die maßgebenden Charakteristika werden herausgestellt und die vorgeschlagenen Herangehensweisen an die Bemessung anhand zweier Praxisbeispiele –

einer Fassadenplatte und einem Schalenträgwerk – erläutert.

Literatur

Anmerkung: Der vorliegende Beitrag basiert auf [15] und [14].

- [1] Cassinello, P.; Schlaich, M.; Torroja, J. A.: Félix Candela. In memoriam (1910–1997). From thin concrete shells to the 21th century light weight structures. Informes de la Construcción 62 (2010) julio-septiembre, 5–26
- [2] Contamine, R.; Si Larbi, A.; Hamelin, P.: Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites. Materials Science and Engineering A 528 (2011), 8589–8598
- [3] Curbach, M.; Graf, W.; Jesse, D.; Sickert, J.-U.; Weiland, S.: Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton – Konstruktion, Fertigung, numerische Berechnung. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), 342–352
- [4] Curbach, M.; Hauptenbuchner, B.; Ortlepp, R.; Weiland, S.: Textilbewehrter Beton zur Verstärkung eines Hyparschalenträgwerks in Schweinfurt. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), 353–361
- [5] Curbach, M.; Jesse, F.: Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), 9–16
- [6] Ehlig, D.; Schladitz, F.; Frenzel, M.; Curbach, M.: Textilbeton – Ausgeführte Projekte im

- Überblick. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), 777–785
- [7] Eurocode 0 – DIN EN 1990:2010-12: Grundlagen der Tragwerksplanung. DIN (Deutsches Institut für Normung), Berlin: Beuth
- [8] Eurocode 2 – DIN EN 1992-1-1:2011-01: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. DIN (Deutsches Institut für Normung), Berlin: Beuth
- [9] Frenzel, M.: Bemessung textilbetonverstärkter Stahlbetonbauteile unter Biegebeanspruchung. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015 – Verstärken mit Textilbeton, Jan., 54–68
- [10] Hartig, J.; Jesse, F.; Schick Tanz, K.; Häußler-Combe, U.: Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile Reinforced Concrete specimens. *Materials and Structures* 45 (2012), 433–446
- [11] Hegger, J.; Kulas, C.; Horstmann, M.: Realization of TRC façades with impregnated AR-glass textiles. *Key Engineering Materials* 466 (2011), 121–130
- [12] Hegger, J.; Kulas, C.; Raupach, M.; Büttner, T.: Tragverhalten und Dauerhaftigkeit einer schlanken Textilbetonbrücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), 72–80
- [13] Hegger, J.; Voss, S.: Investigation of the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering Structures* 30 (2008), 2050–2056
- [14] Hegger, J.; Will, N.; Chudoba, R.; Scholzen, A.: Classification of approaches to dimensioning and assessment of lightweight TRC structures. In: Brameshuber, W. (Ed.): *Proceedings of the FERRO-11 and 3rd ICTRC (PRO 98)*, 7.–10.6.2015 in Aachen, Bagnex: S.A.R.L.Rilem Publications, 2015, 45–52
- [15] Hegger, J.; Will, N.: Textile-reinforced concrete: Design models. In: Triantafillou, T. C. (Ed.): *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Amsterdam et al.: Woodhead Publishing/Elsevier Ltd., 2016, 189–207 – <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-446-8.00009-4>
- [16] Li, Y.; Chudoba, R.; Sadílek, V.; Ryppl, R.; Vořechovský, M.: Analysis of the tensile response of textile reinforced concrete using digital image correlation technique combined with multi-scale stochastic modelling. In: Brameshuber, W. (Ed.): *Proceedings of the FERRO-11 and 3rd ICTRC (PRO 98)*, 7.–10.6.2015 in Aachen, Bagnex: S.A.R.L.Rilem Publications, 2015, 141–148
- [17] Lorenz, E.; Schütze, E.; Schladitz, F.; Curbach, M.: Textile reinforced concrete – overview of standard test methods. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), 711–722
- [18] Lorenz, E.; Schütze, E.; Weiland, S.: Textilbeton – Eigenschaften des Verbundwerkstoffs. *Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015 – Verstärken mit Textilbeton*, Jan., 29–41

- [19] Mobasher, B.: Development of Design Procedures for Flexural Applications of Textile Composite Systems Based on Tension Stiffening Models. In: Curbach, M.; Ortlepp, R. (Hrsg.): Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6), 19./20.9.2011 in Berlin, 297–313
- [20] Müller, E.; Scheerer, S.; Curbach, M.: Strengthening of existing concrete structures: Design models. In: Triantafyllou, T. C. (Ed.): Textile Fibre Composites in Civil Engineering, Amsterdam et al.: Woodhead Publishing/Elsevier Ltd., 2016, 323–359
- [21] Rempel, S.; Kulas, C.; Hegger, J.: Bearing behavior of impregnated textile reinforcement. In: Brameshuber, W. (Ed.): Proceedings of the FERRO-11 and 3rd ICTRC (PRO 98), 7.–10.6.2015 in Aachen, Bagnex: S.A.R.L.Rilem Publications, 2015, 71–77
- [22] Rempel, S.; Kulas, C.; Hegger, J.: Plattenbau im 21. Jahrhundert – Schulmensa St. Leonhard in Aachen. Beton Bauteile Edition 2014, Gütersloh: Bauverlag, 2013, 98–103
- [23] Rempel, S.; Kulas, C.; Hegger, J.: Slender façade structures made of textile-reinforced high performance concrete. In: Brameshuber, W. (Ed.): Proceedings of the FERRO-11 and 3rd ICTRC (PRO 98), 7.–10.6.2015 in Aachen, Bagnex: S.A.R.L.Rilem Publications, 2015, 337–345
- [24] RILEM TC 232-TDT | Brameshuber, W.: Recommendation of RILEM TC232-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, published online: 4.5.2016 – doi: 10.1617/s11527-016-0839-z
- [25] Rypl, R.; Chudoba, R.; Scholzen, A.; Vořechovský, M.: Brittle matrix composites with heterogeneous reinforcement: Multi-scale model of a crack bridge with rigid matrix. Composites Science and Technology 89 (2013), 98–109
- [26] Shams, A.; Horstmann, M.; Hegger, J.: An analytical model for sandwich panels made of textile-reinforced concrete. Construction and Building Materials 64 (2014), 451–459
- [27] Schätzke, C.; Schneider, H. N.; Joachim, T.; Feldmann, M.; Pak, D.; Geßler, A.; Hegger, J.; Scholzen, A.: Doppelt gekrümmte Schalen und Gitterschalen aus Textilbeton. In: Curbach, M.; Ortlepp, R. (Hrsg.): Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6), 19./20.9.2011 in Berlin, 315–328
- [28] Schladitz, F.; Frenzel, M.; Ehlig, D.; Curbach, M.: Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete. Engineering Structures 40 (2012), 317–326
- [29] Schladitz, F.; Lorenz, E.; Curbach, M.: Biegetragfähigkeit von textilbetonverstärkten

- Stahlbetonplatten. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), 379–386
- [30] Schnabel, A.; Grieß, T.: Production of non-crimp fabrics for composites. In: Lomov, S. V. (Ed): Non-crimp fabric composites: manufacturing, properties and applications, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering 35, Oxford et al.: Woodhead Publishing Limited (2011), 3–41
- [31] Scholzen, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Thin-walled shell structure made of textile reinforced concrete – Part I: structural design and construction. Structural Concrete 16 (2015), 106–114
- [32] Scholzen, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Thin-walled shell structure made of textile reinforced concrete – Part II: experimental characterization, ultimate limit state assessment and numerical simulation. Structural Concrete 16 (2015), 115–124
- [33] Scholzen, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Ultimate limit state assessment of TRC structures with combined normal and bending loading. In: Brameshuber, W. (Ed.): Proceedings of the FERRO-11 and 3rd ICTRC (PRO 98), 7.–10.6.2015 in Aachen, Bagnex: S.A.R.L.Rilem Publications, 2015, 159–166
- [34] Scholzen, A.: Flächige Tragstrukturen aus textilbewehrtem Beton. Experimentelle und numerische Charakterisierung des Tragverhaltens, Bemessung und Herstellungsmethodik. Diss., RWTH Aachen, 2015
- [35] Schütze, E.; Curbach, M.: Bedeutung standardisierter Prüfverfahren für Carbonbeton. TUDALIT-Magazin 13 (2015), 30 und Vortrag zur 7. Anwendertagung Textilbeton, 22./23.9. 2015 in Dresden
- [36] Schütze, E.; Lorenz, E.; Curbach, M.: Test methods for Textile Reinforced Concrete. In: Brameshuber, W. (Ed.): Proceedings of the FERRO-11 and 3rd ICTRC (PRO 98), 7.–10.6.2015 in Aachen, Bagnex: S.A.R.L.Rilem Publications, 2015, 307–318
- [37] Tysmans, T.; Adriaenssens, S.; Cuypers, H.; Wastiels, J.: Structural analysis of small span textile reinforced concrete shells with double curvature. Composites Science and Technology 69 (2009), 1790–1796
- [38] Weiland, S.; Schladitz, F.; Schütze, E.; Timmers, R.; Curbach, M.: Rissinstandsetzung eines Zuckersilos – TUDALIT® (Textilbeton) zur Instandsetzung. Bautechnik 90 (2013), 498–504