

NEWS Der BIBM lädt ein zu seinem 21. Kongress in Istanbul, Türkei, vom 21. bis 23. Mai 2014 **BETONTECHNIK** Zum Betonwerk der Zukunft mit SVB **BETONWAREN/BETONWERKSTEIN** Das Abriebverhalten farbiger Betonpflastersteine **BETONROHRE UND -SCHÄCHTE** Verlegungskosten-Vergleichsrechner **BETONFERTIGTEILE** Bau der weltgrößten Zellstofffabrik aus Betonfertigteilen



Lösungen für
kundenspezifische
Betonmischanlagen
weltweit



Wiggert® + Co.
KABAG®

Advanced Mixing Technology
www.wiggert.com



Frei geformte Betonfertigteile

Verwendung von SVB und Textilbewehrung

In einem vorangegangenen Beitrag (BWI-Ausgabe August 2011 [1]) wurde ein Produktionsverfahren für die Herstellung frei geformter Betonfertigteile mit einer Dicke von wenigen Zentimetern unter Verwendung eines flexiblen Schalungssystems vorgestellt. Dieses System ist das zentrale Thema der Dissertation des erstgenannten Autors über die Realisierung von Betonbauwerken in Freiformarchitektur (vgl. Abb. 1). Die mit Hilfe flexibler Schalungen gefertigten Betonfertigteile sind für zahlreiche architektonische Zwecke einsetzbar, die auf einer geschwungenen Formgebung basieren, wie z. B. Fassadenverkleidungen oder Dachelemente. Das System basiert im Wesentlichen auf einer wieder verwendbaren und biegsamen glatten Oberfläche, die in eine Vielzahl von Geometrien verformbar ist, mit frei formbaren Bauteilkanten. Im vorangegangenen BWI-Artikel wurde geschlussfolgert, dass einige Aspekte noch weiter zu untersuchen seien, darunter die Wahl der geeignetsten Betonmischungen und die Verwendung von Faserbewehrung. Im vorliegenden Beitrag werden nun die Ergebnisse der Untersuchung dieser Aspekte vorgestellt: Als ausschlaggebend für die Wahl der Mischung erwiesen sich die zeitabhängige Verarbeitbarkeit sowie das Verformungsvermögen nach dem Betonieren unter Vermeidung von Rissbildungen. Zur Verstärkung der Elemente wurde darüber hinaus eine flexible Textilbewehrung auf AR-Glas-Basis verwendet, die im nicht ausgehärteten Zustand verformbar ist. Es wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Position der Bewehrung nach der Verformung und den Beitrag der Textilien zur Festigkeit der Elemente zu überprüfen.

■ Roel Schipper, Steffen Grünwald,
Marijn Kok, Rob Nijse, Prashanth Raghunath,
Technische Universität Delft, Niederlande ■

Zweifach gebogene Betonbauteile, wie in Abb. 1 dargestellt, sind im Vergleich zu rechteckigen oder flächigen Elementen nur schwer zu ökonomisch vertretbaren Preisen zu produzieren. Daher würde die Freiformarchitektur von einem wirtschaftlich machbaren Herstellungsverfahren für solche Elemente profitieren [2]. Die Massenfertigung zweifach gebogener Betonbauteile wird oftmals nur dann als machbar erachtet, wenn hierzu eine flexible Schalung zur Verfügung steht, d. h. eine verstellbare Schalung aus einem elastischen Material, das mit Hilfe von Stempel, Stellbolzen, seiner Eigenlast, Stützstabmatrizen usw. in die gewünschte Oberflächenkrümmung verformt werden kann. In der Vergangenheit

wurden bereits mehrere Konzepte für flexible Schalungssysteme entwickelt. Den Anfang machte Renzo Piano bereits in den 1960ern mit seinem in Abb. 2a dargestellten Entwurf. Auch andere Planer arbeiteten an einem derartigen Konzept, darunter Lars Spuybroek (Abb. 2b [3]) sowie Florian-Peter Kosche (Abb. 2c).

An der Technischen Universität Delft erarbeiten einige Masterstudenten und Forscher seit mehreren Jahren konzeptuelle oder reale Modelle flexibler Schalungen, was zu einer stetigen Verbesserung und einer praktischen Umsetzung der Idee in funktionsfähige Prototypen führte. Einige Ergebnisse dieses Forschungsprozesses sind in Abb. 3 dargestellt.

Alle diese flexiblen Schalungen funktionieren nach demselben Prinzip, das schematisch in Abb. 4 dargestellt ist. Die verform-

baren Schalungsmaterialien werden auf einem Stützsystem aufgelagert, das die gewünschte Bauteilform vorgibt (Schritt 1). Nun wird die Schalung mit selbstverdichtendem Beton (SVB) befüllt (Schritt 2), als Bewehrung können Fasern oder Textilgewebe verwendet werden. Während eines kurzen Zeitraums der konstruktiven Festigkeitsentwicklung erhöht sich die Fließgrenze des Betons (Schritt 3). Nun wird die Schalung vorsichtig in die gewünschte Form gebracht (Schritt 4). Während dieses Verformungsprozesses muss der Beton der Dehnung folgen und unter einem gewissen Neigungswinkel stabil bleiben. Nun härtet der Beton in der verformten Schalung aus (Schritt 5), und schließlich wird das Bauteil entschalt (Schritt 6). Die flexible Schalung ist für die Produktion identischer Elemente oder Bauteile mit abgewandelter Krümmung und Geometrie wieder verwendbar.



Abb. 1: Zwei Beispiele der Freiformarchitektur (li.: Verdana, NL Architects, re.: Heydar Aliyev Cultural Centre, Zaha Hadid Architects)



■ Roel Schipper absolvierte 1993 ein Studium im Fach Bauingenieurwesen an der TU Delft mit einem M. Sc. Anschließend war er als Tragwerksplaner tätig. Sein Forschungsinteresse gilt in erster Linie der Freiformarchitektur mit Betonfertigteilen. Derzeit ist er als Dozent und Forscher an der TU Delft, Fakultät Bauingenieurwesen, Abt. Konstruktiver Ingenieurbau tätig. h.r.schipper@tudelft.nl



■ Dr.-Ing. Steffen Grünwald studierte Bauingenieurwesen an der TU Darmstadt und promovierte an der TU Delft. Er ist als Assistant Professor bei der Concrete Structures Group der TU Delft beschäftigt. Die Schwerpunkte seiner Forschungstätigkeit liegen in der Optimierung, Verarbeitung und konstruktiven Anwendung von Spezialbetonen. s.grunwald@tudelft.nl



■ Marijn Kok, geb. 1987, absolvierte 2013 seinen Masterabschluss im Fach Bauingenieurwesen an der TU Delft. Er hat sich auf die Bereiche Hochbau und Tragwerksplanung spezialisiert. Im Rahmen seiner Masterarbeit widmete er sich der Untersuchung textillbewehrter Betonbauteile, die mit rekonfigurierbaren flexiblen Schalungen produziert werden.



■ Rob Nijse absolvierte ein Studium im Fach Bauingenieurwesen an der TU Delft und begann 1979 seine berufliche Tätigkeit als Tragwerksplaner bei der Beratungs- und Planungsgesellschaft ABT. 1996 wurde er Direktor bei ABT, und 2007 übernahm er eine Teilzeitprofessur an der Universität Delft im Fach Konstruktiver Ingenieurbau.



■ Prashanth Raghunath absolvierte seinen Masterabschluss an der Fakultät für Architektur der TU Delft, wo er sich 2012 auf den Bereich Bautechnologie spezialisierte. Derzeit ist er als freiberuflicher Berater im Bereich Betonfertigteilternologie tätig, wo er sich zusammen mit seinem Vater in Indien auf Betonfertigteile-/Fertighaus-Lösungen für Großwohnanlagen in Entwicklungsländern spezialisiert hat. prashanth.ppf@gmail.com

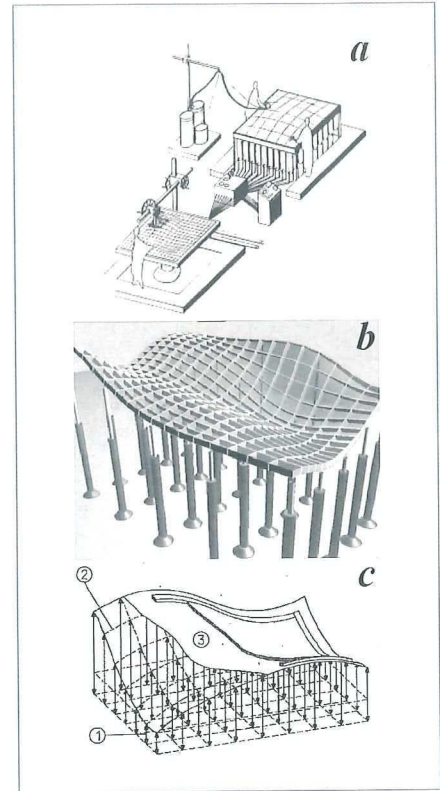


Abb. 2: Drei Konzeptstudien flexibler Schalungen

MEET US AT:
BASRAH

03-06 OKTOBER 2013. BOOTH A235

BAGHDAD

10-20 OKTOBER 2013
BOOTH 48-49

weiler

CONSULTATION, ENGINEERING & MACHINERY FOR THE PRECAST CONCRETE INDUSTRY

SCHLÜSSELFERTIGE BETONFERTIGTEILWERKE

Decken, Wände, Stützen, Träger, Treppen, Pfähle, Pfosten, Stürze, ...

Der PREMIUM LIEFERANT für die BETONFERTIGTEILINDUSTRIE

- Maschinen & Anlagen
- Kompetentes Engineering
- Hohe deutsche Qualität
- Moderne Technologie
- Individuelle Lösungen
- After-Sales-Service
- Über 50 Jahre Erfahrung
- Weltweit aktiv im Markt



weiler. we are made in Germany.

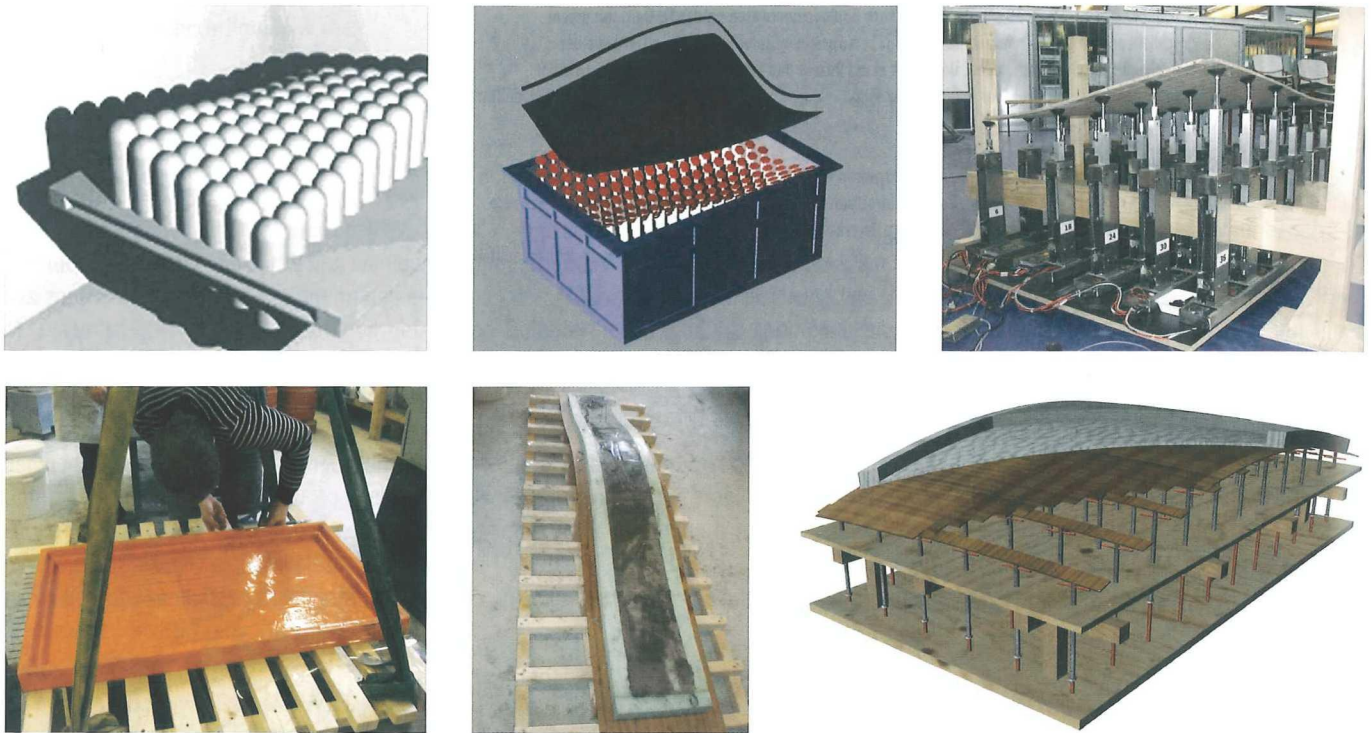


Abb. 3: Sechs Prototypen flexibler Schalungen, entworfen und/oder gebaut an der Technischen Universität Delft (im Uhrzeigersinn, beginnend o. li.: Jansen, 2004; Quack, 2009; Vollers und Rietbergen, 2009; Janssen, 2011 (2x); Schoofs und Huyghe, 2010)

Versuche zu Verformung, Rheologie und Bewehrung

Versuchsaufbau

Für die Versuchsreihe (vgl. Abb. 5) wurden Schalungen für die Produktion kleinformatiger Betonbauteile (Länge x Breite x Dicke: 800 x 400 x 25 mm bzw. 800 x 400 x 50 mm) hergestellt. Mit diesem Versuchsaufbau konnten unterschiedliche Krümmungsradien und Neigungswinkel umgesetzt werden. Durch die Verwendung von vier identischen Schalungen konnten einige Parameter, wie die Verformungsdauer oder Krümmung, für jede Schalung einzeln variiert werden, was einen Vergleich der Versuchsergebnisse ermöglicht.

Im Labor stand Equipment für das Dosieren, Mischen, Betonieren und Aushärten der gewünschten Betone sowie das zur Messung des rheologischen Verhaltens und der Druckfestigkeit des Betons benötigte Gerät zur Verfügung.

Verformung

Betoniert wurden über 50 ein- oder zweifach gebogene Elemente (eine Krümmung in zwei Richtungen ergibt z. B. eine Sattel- oder Kugelform). Die Krümmungsradien lagen im Bereich zwischen 1,5 und 2,5 Meter. Zahlreiche Elemente wurden erfolgreich verformt, anschließend härteten sie aus und wurden entschalt. Bei einigen

Versuchen war der Beton zum Zeitpunkt der Verformung zu fließfähig, so dass er aus der Schalung floss. Abb. 6 zeigt das Einlegen einer Textilbewehrung in die Schalung, einige ausgehärtete Betonfertigteile und einen gesägten Querschnitt mit Textilbewehrung. Im Allgemeinen wurden keine Rissbildungen aufgrund der Verformung festgestellt. In einigen Fällen waren kleinere Risse erkennbar, vergleichbar mit solchen, die durch plastisches Schwinden auftreten. Diese Risse waren jedoch offenbar nicht durch die Verformung selbst verursacht worden, sondern mit größter Wahrscheinlichkeit durch eine zwischen dem Betonier- und dem Verformungsvorgang eingetretene Wasserverdunstung aus der Betonoberfläche. Zur Minimierung einer Verdunstung wurde das Verfahren dahingehend verändert, dass die frisch betonierten Elemente mit Kunststoffolie abgedeckt wurden, woraufhin keine Rissbildungen mehr auftraten. Die ästhetische Qualität (z. B. Oberflächen- und Farbglüte, Bauteilkanten, Lufteinschlüsse) erwies sich als gut. Das Schalungsmaterial jedoch, ein Zwei-Komponenten-Silikon mit einer Shore-Härte von 30, das aufgrund seiner hervorragenden Flexibilität gewählt wurde, erwies sich als anfällig für kleinere Beschädigungen, was nach mehreren Betoniervorgängen zu einem zügigen Verschleiß führte. Die Anzahl der Lufteinschlüsse war begrenzt, und die Bauteilkanten erwiesen sich als glatt und präzise ausgeformt. Zur Prüfung des Einflusses auf die Betonober-

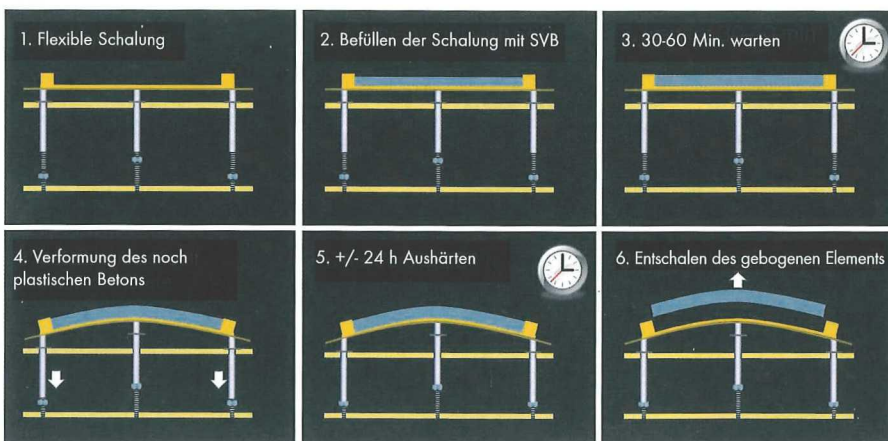


Abb. 4: Beschreibung des Produktionsprozesses zweifach gebogener Betonbauteile mit flexibler Schalung in sechs Schritten



Abb. 5: Versuchsaufbau für die Untersuchung unterschiedlicher Parameter im Labor der TU Delft (Stevin 2): vier Silikonschalungen mit verstellbarer Neigung und Krümmung. Im Hintergrund ist die Betonmisch- und -dosieranlage zu sehen.

flächenqualität wurde bei einigen Versuchen zusätzlich eine Probe in einen glatten Hartplastik- (PE) Behälter gegeben, was zu einer äußerst glatten und glänzenden Betonoberfläche führte. Bei einigen Versuchen wurde auch eine flexible Polyurethan-Schalung eingesetzt. Es ist davon auszugehen, dass sich eine weitere Verbesserung des Schalungsmaterials auch vorteilhaft auf die ästhetische Qualität auswirken wird. Der Verformungsprozess selbst hat offenbar keine Auswirkungen auf die Betonqualität.

Rheologisches Verhalten des Betons

Der typische Verformungsprozess nach dem Betonieren erfordert spezielle Verarbeitbarkeitscharakteristika des Betons bei den einzelnen Schritten: vorzugsweise selbstverdichtend und -nivellierend während des Betoniervorgangs (Schritt 2 in

Abb. 4), dennoch viskos mit plastischem Verhalten während des Verformungsvorgangs (Schritt 4 in Abb. 4). Aufgrund des Neigungswinkels der Schalungskante nach der Verformung (bis zu 40 Grad zur Horizontalen) ist zudem eine minimale Fließgrenze erforderlich, um ein Ausfließen des Betons aus der Schalung zu verhindern (Abb. 7).

Bei der Fließgrenze und der plastischen Viskosität der Mischung handelt es sich um zwei rheologische Parameter, mit denen sich die Verarbeitbarkeit objektiv charakterisieren lässt [4]. Bei einigen Versuchen mit sowohl Fließ- und Setzmaßversuchen als auch dem BML-Viskosimeter [5] wurden verschiedene Mischungen im Hinblick auf die Entwicklung der zeitabhängigen rheologischen Eigenschaften und des Verhaltens während des Verformungsvorgangs geprüft.

Bei diesen Versuchen wurden zwei Mischungstypen verwendet: ein mittelkörniger und ein feinkörniger Beton mit einer maximalen Korngröße von 8 mm beziehungsweise 1 mm. Bei Beton und insbesondere Zementleim handelt es sich um thixotrope Materialien, das bedeutet, dass eine zeitabhängige konstruktive Festigkeitsentwicklung des Feinkorns eintritt, wenn der Beton im Ruhezustand belassen wird. Zur Verstärkung dieses thixotropen Verhaltens wurden zusätzlich zu einem Zement CEM I 52,5 R als Feinkorn Flugasche sowie Beto-flow (ultrafeines Kalziumkarbonat) der Firma Omya verwendet. Die Nutzung dieses Charakteristikums ermöglicht das Betonieren bei einer wesentlich niedrigeren Fließgrenze (höhere Fließfähigkeit) als der kritischen Fließgrenze. Anschließend wird die thixotrope konstruktive Festigkeitsentwicklung zur Verformung der Schalung in einem Zeitraum von 30–60 Minuten nach dem Betonieren genutzt. Die Verwendung von SVB bietet sich für relativ schlanke Architekturbauteile geradezu an. SVB weist anfänglich eine sehr niedrige Fließgrenze auf, die jedoch aufgrund des thixotropen Verhaltens durch den hohen Mehl- und Feinkornanteil nach dem Betoniervorgang zügig ansteigt. Dies führt dazu, dass der Beton nach der Verformung in der Schalung seine Position beibehält. Die Verarbeitbarkeit wurde zunächst durch Fließmaßversuche mit dem Abrams-Konus geprüft. Die beiden selbstverdichtenden Mischungstypen, sowohl die mittel- als auch die feinkörnige Mischung, erzielten ein Fließmaß von 700 beziehungsweise 685 mm direkt nach dem Mischvorgang. Bereits in der ersten Stunde führte die zügige konstruktive Festigkeitsentwicklung jedoch zu einem Anstieg der Fließgrenze. Daher wurden innerhalb der ersten Stunde Setzmaßversuche unter Verwendung des Abrams-Konus' durchgeführt, wobei der Beton direkt nach dem Mischvorgang in den Kegel eingefüllt, vor dem Abheben des Kegels jedoch für einen bestimmten Zeit-



Abb. 6: links: Laminieren einer AR-Glas-Textilbewehrung vor der Verformung des Bauteils; Mitte: gebogene, entschalte und ausgerichtete Elemente; rechts: Schnittfläche mit vier Textilschichten

raum im Ruhezustand belassen wurde. Das Setzmaß beider Mischungen verringerte sich dadurch eindeutig von 20 bis 21 cm in einem Zeitraum von $t = 30$ Minuten nach dem Mischvorgang auf lediglich 5 bis 8 cm in $t = 60$ Minuten nach dem Mischvorgang. Innerhalb von 30 Minuten veränderte sich die Viskosität beider Mischungen von fließfähig zu halb-plastisch (von Klasse S5 zu Klasse S2 gemäß [7]). Der Beitrag des Hydratationsprozesses zum Anstieg der Fließgrenze während der Ruheperiode ist gering. Die Fließfähigkeit des Betons stieg nach leichtem Klopfen gegen den Kegel wieder stark an (vgl. Abb. 8).

Zur Korrelation des Setzmaßes mit den SI-Werten der Fließgrenze (Pa) und der plastischen Viskosität ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) wurden Versuche mit dem BML-Viskosimeter durchgeführt, einem koaxialen Zylinderviskosimeter, mit dessen Hilfe sich die rheologischen Werte durch die Schaffung eines kontrollierten und messbaren Scherflusses in einer Betonmischung messen lassen. Hierbei dreht sich ein mit Beton gefüllter zylindrischer Behälter um einen feststehenden Drehmomentsensor, wobei die Drehgeschwindigkeit im Verhältnis zum Drehmoment grafisch dargestellt wird. Auf der Grundlage dieser Grafiken erfolgt die Berechnung der rheologischen Parameter durch Regression.

Gleich nach dem Mischvorgang lag die Fließgrenze im Bereich von 0 bis 10 Pa und die plastische Viskosität betrug etwa $40 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Innerhalb einer Ruheperiode von etwa 30 Minuten wurde infolge des thixotropen Verhaltens ein Anstieg der Fließgrenze auf etwa 600 Pa verzeichnet. Diese Fließgrenze gilt je nach Krümmungsradius und Elementgröße als für den Beginn des Verformungsprozesses ausreichend.

Glasfaser-Textilbewehrung

Da die Verwendung von unbewehrtem Beton nur in den Fällen annehmbar ist, in denen ein sprödes Verhalten keine Sicherheitsproblematik darstellt, ist die Verwendung einer Bewehrung im Hinblick auf die Verbesserung der Duktilität und Betonfestigkeit in der Regel erforderlich. Bei Fassadenelementen könnten beispielsweise durch das Eigengewicht, Windeinwirkung oder Temperaturschwankungen verursachte Spannungen zu einem plötzlichen Versagen führen. Aus diesem Grund wurde eine Untersuchung bezüglich der Verwendbarkeit von textilbewehrtem Beton (Textile Reinforced Concrete, TRC) in Verbindung mit dem üblichen Produktionsverfahren mit flexibler Schalung durchgeführt [7]. Da nur eine geringe Betondeckung der Bewehrung erforderlich ist, bietet TRC den Vorteil, für dünne Elemente, wie die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung produzierten, geeignet zu sein. Einem Forschungsprojekt der RWTH Aachen ([8], [9]) wurden Informationen bezüglich der Möglichkeiten und mechanischen Eigenschaften von TRC entnommen. Es wurde beschlossen, eine Reihe von Verformungsversuchen mit äußerst flexiblen alkaliresistenten (AR) Glasfasertextilien der 3T TextilTechnologieTransfer GmbH, einem Spin-off des Institutes für Textiltechnik der RWTH Aachen, durchzuführen. Die Textilie (cem-FIL 5325) besteht aus 2.400 textilen AR-Glasfaserfilamenten, die zu einer biaxialen Bewehrungsmatte verwebt werden. Der Abstand zwischen den Fäden beträgt in beiden Richtungen 8,3 mm. Jeder Faden besteht aus 1.600 Fasern mit einem Durchmesser von $0,027 \text{ mm}^2$. Die Zugfestigkeit der Textilbewehrung beträgt 1.700 MPa. Die Textilschichten wurden in den feinkörnigen Beton mit Hilfe eines Laminierungsvorgangs im Wechsel mit dünnen Betonschichten (3–6 mm) eingebracht, bis die gewünschte Bauteilstärke und Anzahl an Textilschichten erreicht war (vgl. Abb. 6). Anschließend wurde mit dem üblichen Verformungsverfahren, wie vorstehend anhand von Abb. 4 erläutert, begonnen. Betoniert wurden sowohl ein- als auch zweifach gebogene Elemente. Es wurde beobachtet, dass die Textilbewehrung



➔ upcrete® – die Revolution in der Betonfertigteilherstellung

Das innovative upcrete® System der Firma RATEC, findet mit dem neuen Pumpenwagen und der verbesserten Taschenbatterieschalung seine konsequente Weiterentwicklung. Mit upcrete® ist nahezu jede erdenkliche Betonfertigteil-Geometrie realisierbar. Selbstverdichtender Beton (SVB) wird von unten in die Form gepumpt und erlaubt so komplexe Bauteile in einem Arbeitsgang herzustellen. Durch die Flexibilität des Systems bietet sich ein einzigartiges Potenzial in Formgebung, Dimension und Wirtschaftlichkeit – bei gleichzeitig höchster Qualität und schalungsglatte Oberflächen. Nutzen Sie diese Freiheit – mit upcrete®, dem variablen System für mehr Möglichkeiten.

Meet the better ideas now:
Telefon +49 6205 9407 29



RATEC



Meet the better ideas!
www.ratec.org

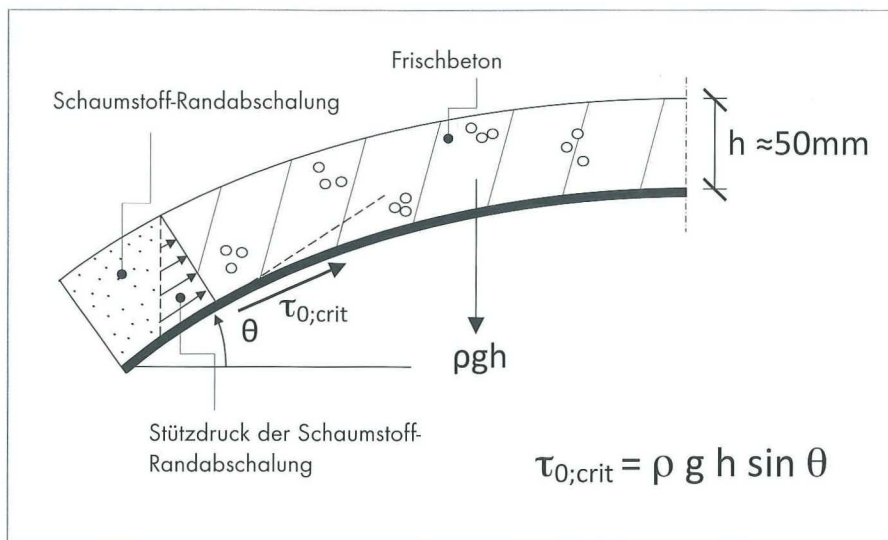


Abb. 7: Erforderliche minimale Fließgrenze, um ein Ausfließen des Betons aus der Schalung zu verhindern

problemlos in die gewünschte Geometrie verformt werden konnte. Nach dem Aushärten wurden die Elemente in kleinere Streifen gesägt, um zu prüfen, ob die Textilien in der erwarteten Position geblieben waren, was tatsächlich der Fall war. Die Tragfähigkeit von TRC hängt von der jeweiligen Kombination von Textilbewehrung und feinkörnigem Beton ab. Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der bei den Verformungsversuchen verwendeten TRC wurden Biege- und Zugfestigkeitsversuche durchgeführt. Wie erwartet, zeigte der Beton ein kaltverfestigendes Verhalten, was zu einer Zunahme sowohl der Festigkeit als auch der Duktilität führte.

Fazit

Das Produktionsverfahren mit flexiblen Schalungen verspricht eine machbare Ergänzung zu den bereits verfügbaren Herstellungsverfahren für frei formbare Betonelemente zu sein. Durch die Verwendung einer Betonmischung mit selbstverdichtendem und thixotropem Verhalten ist die Verformung von Bauteilen nach dem Betonieren in präzise ein- oder zweifach gebogene Formgebungen möglich. Der für den Verformungsvorgang geeignete Moment kann durch die Messung der Verarbeitbarkeit mit Hilfe von Setzmaßversuchen oder die Messung der rheologischen Parameter unter Verwendung eines Viskosi-



Abb. 8: Setzmaßversuche mit thixotroper Mischung: eine leichte Vibration durch Klopfen gegen den Kegel führt zu einem Anstieg der Fließfähigkeit des Frischbetons.

mers bestimmt werden. Bauteile mit Krümmungsradien von 1,5 bis 2,5 Meter konnten problemlos produziert werden. Der Verformungsvorgang führte nicht zu Rissbildungen oder sonstigen Beschädigungen des Betons. Entsprechend der planerischen Anforderungen können die Bauteile mit Glasfasertextilien bewehrt werden. Glasfasertextilien lassen sich präzise verformen. Die erforderliche Anzahl an Textilschichten kann anhand von durch statische Berechnungen erwarteten Spannungen bestimmt werden. Die mechanischen Eigenschaften von TRC wurden geprüft und verhielten sich erwartungsgemäß.

Danksagung

Das Projekt wurde mit freundlicher Unterstützung von Conovation BV, einem auf innovative Betontechnologie spezialisierten, niederländischen Unternehmen durchgeführt.

Literatur

- [1] H.R. Schipper and B. Janssen. Manufacturing double curved precast concrete panels. *Concrete Plant International*, 4/2011 p:32-38
- [2] H.R. Schipper and J.N.J.A. Vamberky. A Flexible mould for double curved pre-cast concrete elements. In *Precast2010 - Het nieuwe bouwen in prefab beton - Assembling freeform buildings in precast concrete*, Delft University of Technology, 2011
- [3] L. Spuybroek. *NOX: machining architecture*. Thames and Hudson, London, 2004
- [4] F. de Larrard. Why rheology matters. *Concrete International*, 8:79-81, 1999
- [5] O. Wallevik. Rheology of fresh concrete such as SCC - Dr. Wallevik Rheology course. The Island Building Research Institute, 2005
- [6] NEN-EN 206-1 (en) - Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity
- [7] M.A.D. Kok. Textile reinforced double curved concrete elements - manufacturing free-form architecture with a flexible mould. Master thesis, Technische Universiteit Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Department of Structural and Building Engineering, 2013
- [8] J. Hegger and S. Voss. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering Structures*, 30:2050-2056, 2008
- [9] J. Hegger, M. Horstmann, S. Voss, and N. Will. Textilbewehrter Beton - Tragverhalten, Bemessung und Anwendung. *Beton- und Stahlbetonbau*, 102:362-370, 2007

WEITERE INFORMATIONEN



TU Delft
Faculty of Civil Engineering and Geosciences
Stevinweg 1
2628 CN Delft, Niederlande
www.be.city.tudelft.nl