
DISSERTATION

PNEUMATISCHES VERFORMEN VON AUSGEHÄRTETEM BETON –
DIE ERRICHTUNG VON BETONSCHALEN AUS URSPRÜNGLICH
EBENEN PLATTEN

DOCTORAL THESIS

PNEUMATIC FORMING OF HARDENED CONCRETE – BUILDING
SHELLS STARTING FROM INITIALLY PLANE PLATES

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dipl.-Ing. Benjamin Kromoser, BSc

Matrikelnummer: 0627636

Südhangsiedlung 11, 3300 Amstetten, Österreich

Gutachter: o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. **Johann Kollegger**, M.Eng.

Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Gutachter: o. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.h.c. **Werner Sobek**

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 7 und 14, 70569 Stuttgart, Deutschland

Wien, im März 2015

.....

Vorwort

Die Forschungsarbeiten für meine Dissertation waren Teil des Forschungsprojektes „Freiformflächen aus Beton“. Dieses wurde von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert und von den Firmen: Doka, ÖBB, Asfinag, Strabag, Porr, Alpine, Bilfinger, Habau, Swietelsky, Holcim, Lafarge, Wopfinger, Tiwo, Sika, und Festo unterstützt.

Mein besonderer Dank gilt o.Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Johann Kollegger, M.Eng., der mir die Möglichkeit gab, das äußerst interessante Forschungsthema zu bearbeiten. Er stand im Laufe meiner Zeit am Betonbauinstitut immer sehr hilfsbereit und freundlich für wissenschaftliche Belange zur Verfügung und vermochte immer präzise Auskünfte zu geben.

Besonders gefreut habe ich mich über die Zusage von o. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.h.c. Werner Sobek für die Übernahme des Koreferates und das Interesse an meiner Arbeit. Herzlichen Dank dafür.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen am Betonbauinstitut, allen voran meinem treuen Bürokollegen Patrick Huber, die immer für fachliche und auch persönliche Diskussionen zur Verfügung standen und mich auch bei der Durchführung der Großversuche mit ihrer Arbeitskraft nach bestem Wissen und Gewissen unterstützten. Für die administrative Hilfe und die orthografischen Korrekturen meiner schriftlichen Arbeiten möchte ich mich bei Edith Schotkowsky bedanken und bei Herbert Pardatscher für das Mitwirken bei den durchgeführten Versuchen.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinem langjährigen Freund Thomas Pachner für die vielen interessanten Diskussionen und die praktische Unterstützung bei den Versuchen und bei der Formoptimierung.

Danken möchte ich auch meinen Diplomanden Michael Sohm und Markus Waglechner für die interessante Zusammenarbeit sowie meinen Freunden Christoph Lanz und Robert Aichinger für die praktische Unterstützung bei den Großversuchen.

Widmen möchte ich diese Arbeit meinen Eltern Josef und Ursula, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben und mir stets Rückhalt gaben. Vielen Dank auch an meine Schwester Olivia, die mir immer hilfsbereit zur Seite stand.

Abschließend möchte ich meiner Freundin Petra für ihre unermüdliche Unterstützung und Geduld danken.

Danke!

Kurzfassung

Die Errichtung von freigeformten Betonschalen ist mit den momentan zur Verfügung stehenden konventionellen Bauverfahren sehr teuer. Ausschlaggebend dafür sind die hohen Kosten für zweifach gekrümmte Schalungen und die dafür erforderlichen Stützkonstruktion. Grundsätzlich haben Schalen den Vorteil, dass sich bei günstiger Wahl der Geometrie ein Membranspannungszustand einstellt und somit große Spannweiten ohne zusätzliche Vorsehung von Stützen gebaut werden können. In der Vergangenheit wurden bereits Schalen mit einem Spannweiten-Dicken (L/D) Verhältnis von bis zu 400 verwirklicht. Im Vergleich dazu können bei konventionellen Stahlbetonbalken bzw. Stahlbetondecken L/D Verhältnisse von 8-25 erreicht werden.

Diese kumulative Dissertation besteht aus einem Einleitungskapitel und drei publizierten Fachaufsätzen. Darin wird ein neues Schalenbauverfahren vorgestellt, mit dem freigeformte Betonflächen mit geringerem Aufwand an Material und Arbeitszeit mit möglichst hoher Genauigkeit hergestellt werden können. Die Idee ist, zweifach gekrümmte Schalen aus ebenen, ausgehärteten Betonplatten mit Hilfe von pneumatischer Schalung, pneumatischen Keilen und einer Vorspannung in Umfangsrichtung zu errichten.

Das Einleitungskapitel beschreibt die Problemstellung, die Ziele der Arbeit, die Methodologie und den momentanen Wissenstand über Schalenbauverfahren. Zusätzlich wird auf den Formfindungsprozess, die Verfahrensoptimierung und die Wahl der Bewehrung eingegangen. Nach einer Zusammenfassung der drei Publikationen wird im letzten Abschnitt ein Resümee über die gesamte Arbeit gezogen und ein möglicher Ausblick auf eine erste Anwendung in der Praxis sowie weitere mögliche Forschungstätigkeiten gegeben.

Zu Beginn der drei Aufsätze wird jeweils ein Überblick über den Stand der Technik und die aktuell in Entwicklung befindlichen Schalenbauverfahren gegeben. Der zweite Teil umfasst jeweils eine Erklärung der „Pneumatic Forming of Hardened Concrete“ (PFHC) Baumethode.

Im ersten Aufsatz *Herstellung von Schalentragwerken aus Beton mit der „Pneumatic Wedge Method“ - Ein neues Bauverfahren für den Bau von zweifach gekrümmten Betonflächen* [1], wird die Durchführung von ersten Biegevorversuchen zur Ermittlung einer für die Anwendung passenden Beton-Bewehrungskombination beschrieben. Der Hauptteil umfasst die Durchführung, Berechnung und Auswertung eines Großversuchs an einer Kugelschale mit 50mm Dicke, 10.8m Durchmesser und 3.3m Höhe.

Der zweite Aufsatz *Application areas for pneumatic forming of hardened concrete* [2], behandelt den Formfindungsprozess und die bei der Planung einzuhaltenden Randbedingungen bezüglich der mit dieser Baumethode herstellbaren Formen. Dabei werden analytisch beschreibbare Betonschalen sowie freigeformte Betonschalen analysiert. Anhand des durchgeführten Versuchsprogramms zur Errichtung der in Aufsatz 1 im

Detail beschriebenen Versuchsschale wird die praktische Umsetzung erklärt. Anschließend wird der Hebeprozess von einer ebenen Platte zu einer zweifach gekrümmten Schale an allgemeinen Formen beschrieben und anhand von Berechnungen verifiziert. Im letzten Teil werden die Zusammenhänge zwischen der Dicke und der maximal aufnehmbaren Krümmung von bewehrten Betonplatten sowie die dabei auftretenden Kräfte beschrieben. Zusammenfassend werden mögliche Verbindungen der einzelnen Betonelemente im Endzustand sowie die dafür durchgeführten Fugenzugversuche behandelt. Zuletzt werden noch mögliche praktische Anwendungen vorgestellt.

Die dritte Publikation *Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century* [3], stellt eine weitere Optimierung der verwendeten Beton-Bewehrungskombination mit Hilfe von Finite-Element-Berechnungen, zentrischen Zugversuchen, Vierpunkt-Biegeversuchen und Verbundversuchen vor. Der Hauptteil beschreibt die Durchführung eines Großversuchs zur Errichtung einer Freiformschale mit einer Dicke von 50mm, den Grundrissabmessungen von 17.6m mal 10.8m und einer Höhe von 2.9m. Dabei wird auf den Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die erhaltenen Ergebnisse eingegangen. Im Detail werden der Verformungsprozess und die dabei auftretenden Risse und die Geometrieabweichungen der Endform analysiert. Abschließend werden mögliche Anwendungen durch Teilabbruch der im Großversuch hergestellten Freiformschale präsentiert.

Abstract

The production of double curved shells using conventional building methods with double curved formwork and falsework is very expensive. So why use a double curved concrete shell as supporting structure? When a favorable shape is chosen, a membrane state of stress in the concrete shell can be reached and large spans can be covered with minimal thickness of the concrete without using columns. While conventional slab-on-beam structures can be built with a span-to-effective-depth ratio of 8 to 25, the same ratio is much higher for shells (up to 400).

This PhD-thesis consists of an introductory chapter and three papers. A new shell construction method for building double curved shells with a high accuracy and thus saving material and man-hours, is presented. The idea is to build double curved concrete shells out of flat hardened concrete plates using pneumatic formwork and pneumatic wedges.

The introduction gives an overview about the specific requirements of the scientific work, the aims, the methodology and state-of-the-art of shell construction methods. Additionally, the form finding process, the optimization of the construction method and the choice of reinforcement are discussed. The three papers are then summarized, an outlook for a first practical application of the building method is given and finally further possible research activities on this topic are presented.

In the first part of each paper an overview about the state-of-the-art of shell construction methods is given and current newly invented construction methods are mentioned. The second part of each paper explains the functionality of “Pneumatic Forming of Hardened Concrete” (PFHC).

In the first paper: *Herstellung von Schalentragwerken aus Beton mit der „Pneumatic Wedge Method“ - Ein neues Bauverfahren für den Bau von zweifach gekrümmten Betonflächen* [1], a first preliminary bending test series for the determination of the maximum achievable deflection of rectangular concrete slabs is described. The main part of the paper focuses on the erection of a spherical prototype concrete shell with a diameter of 10.8m and a height of 3.3m. In the final part, results of the large scale experiment, accompanying calculations for the distortion and calculations on the finished structure are explained.

The second paper: *Application areas for pneumatic forming of concrete* [2], mainly deals with the definition of boundary conditions for the use of the building method “Pneumatic Forming of Concrete”. In particular, analytically describable concrete shells and free formed concrete shells are analyzed. Afterwards the preliminary experiments and the large scale experiment on a spherical shell are described. Furthermore, the lifting process of concrete shells is subdivided in different parts and is explained with the help of calculations. The final part defines a relation between the thickness of a concrete plate, the maximal achievable curvature and the forces occurring during the

bending process. Each of the single curved concrete elements is bent respectively during the transformation process. A proposal for two different methods of connecting the elements after the erection of the shell is made, and the results of joint-tension-tests are presented. Finally different application areas for the building method are explained and shown in form of photorealistic renderings.

The third paper: *Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century* [3], presents the erection of a free formed prototype concrete shell with a thickness of 50mm, a length of 17.6m, a width of 10.8m and a height of 2.9m. At the beginning a further optimization of the concrete-reinforcement-combination determined by Finite-Element-calculations, centric-tension-tests, four-point-bending tests and bonding tests is presented. The design of the large scale experiment, the transformation process and the final results are discussed in the main part of the paper. In conclusion, possible applications of “Pneumatic Forming of Hardened Concrete” are shown in form of partial demolitions of the large scale experiment and further visualizations.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Kurzfassung.....	II
Abstract.....	IV
Teil I Einleitung.....	1
1 Problemstellung	2
2 Grundlagen und Ziele	4
3 Methodologie.....	5
4 Aktuelle Entwicklungen.....	6
5 Stand der Technik bei Schalenbauverfahren	7
6 Formfindung und Diskretisierung	10
7 Verfahrensoptimierung.....	12
8 Realisierung von großen Biegeverformungen in ausgehärtetem Beton	15
9 Zusammenfassung der Publikationen	22
9.2 Zusammenfassung Publikation [1]:	22
9.3 Zusammenfassung Publikation [2]:	25
9.4 Zusammenfassung Publikation [3]:	28
10 Schlussfolgerungen und Ausblick	31
10.2 Schlussfolgerungen.....	31
10.3 Ausblick.....	33

Literatur	34
Teil II Publikationen.....	40
1 Publikation [1]	41
2 Publikation [2]	51
3 Publikation [3]	63
Publikationen und Konferenzbeiträge.....	75
Lebenslauf.....	79

Teil I Einleitung

1 Problemstellung

Betonschalen als Tragwerke weisen ein sehr günstiges Tragverhalten auf. Große Spannweiten können mit einem verhältnismäßig geringen Materialaufwand ressourcenschonend realisiert werden. Wird die Form des Tragwerks günstig gewählt, treten im Querschnitt hauptsächlich gut vom Beton aufnehmbare Druckspannungen und nur geringe, für das Tragwerk ungünstige Biegespannungen und transversale Schubspannungen auf. Sind die Biegespannungen und transversalen Schubspannungen vernachlässigbar klein, spricht man von einem Membranspannungszustand [4]. Abbildung 1 zeigt die dreidimensionale Lastabtragung einer Kugelschale. Die günstige Tragwirkung von Schalentragwerken und eine Zusammenstellung über die wichtigsten Arten von Betonschalen sowie eine Auswahl der bekanntesten Schalenbauten aus der Vergangenheit sind in [5] zu finden. Die genaue Berechnung von Schalentragwerken anhand von analytischen und numerischen Lösungsansätzen ist in [6] beschrieben. Eine gute Zusammenstellung für die praktische Anwendung der Schalentheorie findet man auch in [7], [8].

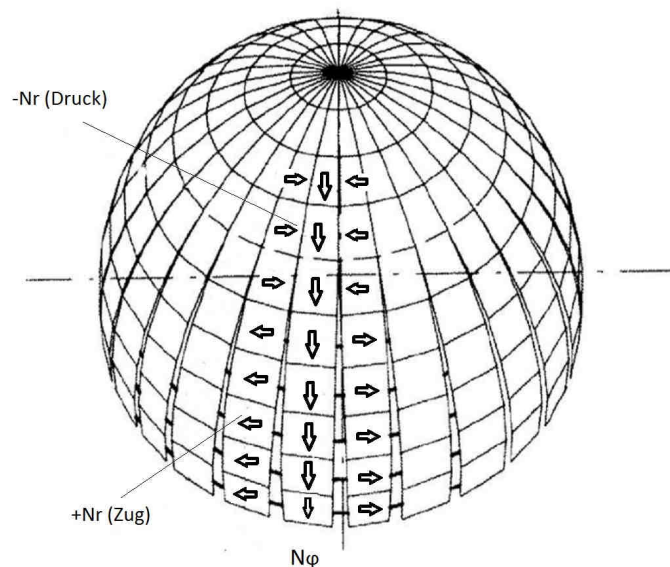


Abbildung 1: Kraftwirkung in einer Kugelschale

Um Schalen mit einem derartig günstigen Tragverhalten zu realisieren, ist es erforderlich, eine passende Schalenform zu finden und diese wirtschaftlich herzustellen. Dem Prinzip „Form follows Force“ folgend, können mit einer entsprechenden interdisziplinären Zusammenarbeit von Planer und Ingenieur und der zur Verfügung stehenden Modellierungs-, Optimierungs- und Berechnungssoftware an die Anforderungen angepasste Schalenkonstruktionen entworfen werden, die das Material Beton, charakterisiert durch eine zur Zugfestigkeit vergleichsmäßig hohen Druckfestigkeit, bestmöglich ausnützen. Ohne vorerst genauer auf die Formfindung einzugehen werden in [9]

unterschiedliche mögliche Randbedingungen beschrieben, die beim Betonschalensbau beachtet werden können.

Betrachtet man den Herstellungsprozess einer zweifach gekrümmten Betonfläche, muss das Baumaterial entsprechend der entworfenen Geometrie geformt werden. Eine der Kernaufgaben ist dabei die Auswahl einer passenden Schalungskonstruktion. Die gängigste Methode dafür ist die Herstellung einer Schalung, auf die der Beton im Bauzustand aufgebracht werden kann, und die die Lasten aus dem Eigengewicht des Betons solange abträgt, bis der Beton genügend Festigkeit erlangt hat, um diese selbst zu tragen.

Die bekanntesten Systeme dafür sind beispielsweise aufwändige Holzschalungen mit Lehrgerüst (siehe Abbildung 3) oder alternative Systeme mit unterschiedlichen Arten von pneumatischer Schalung. Eine grundsätzliche Zusammenfassung von unterschiedlichen Schalungssystemen und deren Funktionsweise findet man in [10], [11]. Der Vorteil von konventionellen Holzschalungen ist, dass diese mit hoher Genauigkeit positioniert werden können und dadurch sehr genaue Bauwerksabmessungen liefern (siehe Abbildung 3 [12]). Die im Zuge des Formfindungsprozesses gefundene Form, die bestenfalls so gewählt ist, dass aus Eigengewicht und ständig einwirkenden Lasten nur Normalkräfte und keine Biegemomente entstehen, kann somit sehr genau gebaut werden. Nachteilig ist dabei der sehr hohe Arbeits- und Materialaufwand für die Herstellung der Schalung, der Schalenträgerwerke trotz der günstigen Tragwirkung in der Vergangenheit zunehmend unwirtschaftlicher machte.

Eine wesentlich günstigere alternative Baumethode ist die Herstellung von Schalenträgerwerken mit Hilfe von pneumatischen Schalungen und anschließend appliziertem Spritzbeton oder das Verformen von frischem Beton mit pneumatischer Schalung. Da die mit diesem Verfahren herstellbaren Formen im Wesentlichen durch den Lastfall pneumatischer Überdruck bestimmt werden, ist die mögliche Formenvielfalt eingeschränkt. Wie eine rotationssymmetrische bzw. kugelförmige pneumatische Struktur dennoch zu einer ungleichmäßigen Form beeinflusst werden kann, wird in [13] beschrieben. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass der in der Schale einstellende Spannungszustand nach dem Ablassen der pneumatischen Schalung von dem für das fertige Tragwerk und die darauf wirkenden Lasten optimalen Spannungszustand abweicht [9], [14].

2 Grundlagen und Ziele

Betonschalen mit günstig gewählter Form können ihre Eigenlasten und die aus der Umwelt einwirkenden zusätzlichen Lasten mit sehr geringen Materialdicken in den Boden ableiten und stellen somit in ihrer Endform ressourcensparende Tragwerke dar, die nach [15] zu Bauwerken des klassischen Leichtbaus zu zählen sind.

Addiert man zur Ressourcenbilanz einer Betonschale (hauptsächlich Beton und Stahl) die Materialaufwände für die Schalung und Rüstung, kommt man bei einer einfachen Betrachtung auf eine wesentlich geringere Gesamtsumme an Ressourcen verglichen mit konventionellen Tragwerken. Addiert man zu dieser Gesamtmaterialressourcenbilanz die Arbeitszeit, so werden Schalentragwerke im Vergleich zu konventionellen Tragsystemen teuer und unwirtschaftlich. Leider können in der Praxis auch die ästhetische Erscheinungsform und der Gedanke des leichten Bauens diese Nachteile oft nicht aufwiegen und die Entscheidung fällt oft zugunsten einer Massivbauweise.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Entwicklung eines Schalenbauverfahrens, mit dem die an die Randbedingungen angepassten Formen mit möglichst geringem Material- und Arbeitsaufwand für Schalung und Rüstung hergestellt werden können. Die Grundlage dafür bildet ein bereits 2005 am Institut für Tragkonstruktionen entwickeltes Verfahren zur Herstellung von rotationssymmetrischen Schalentragwerken mit Krümmungen von bis zu 0.15 1/m ausgehend von ebenen ausgehärteten Betonplatte zu errichten [16], [17], [18], [19]. Der Anwendungsbereich des 2005 entwickelten Verfahrens soll in der vorliegenden Dissertation so ermittelt werden, dass freie Formen aus Stahlbeton mit Krümmungen von bis zu 0.5 1/m in der Praxis hergestellt werden können.

Das Forschungsgebiet wird dabei in sechs Teilbereiche unterteilt:

- Formfindung und Diskretisierung
- Statische Berechnungen
- Materialtests
- Verfahrensoptimierung
- Detailentwicklung
- Anwendungsgebiete

3 Methodologie

Basierend auf dem aktuellen Wissenstand wird mit Hilfe von grafischen Simulationen, Visualisierungen in Form von Renderings, verfahrenstechnischen Versuchen in kleinerem Maßstab mit dem Werkstoff Holz, Linearen-Finite-Element Berechnungen, Nichtlinearen-Finite-Element-Berechnungen, zentrischen Zugversuchen an Betonkörpern, Biegeversuchen an rechteckigen Betonplatten, Berstversuchen an unterschiedlichen Pneufolien sowie Großversuchen an einer Kugelschale und einer freigeformten Schale, ein neues praxistaugliches Schalenbauverfahren entwickelt.

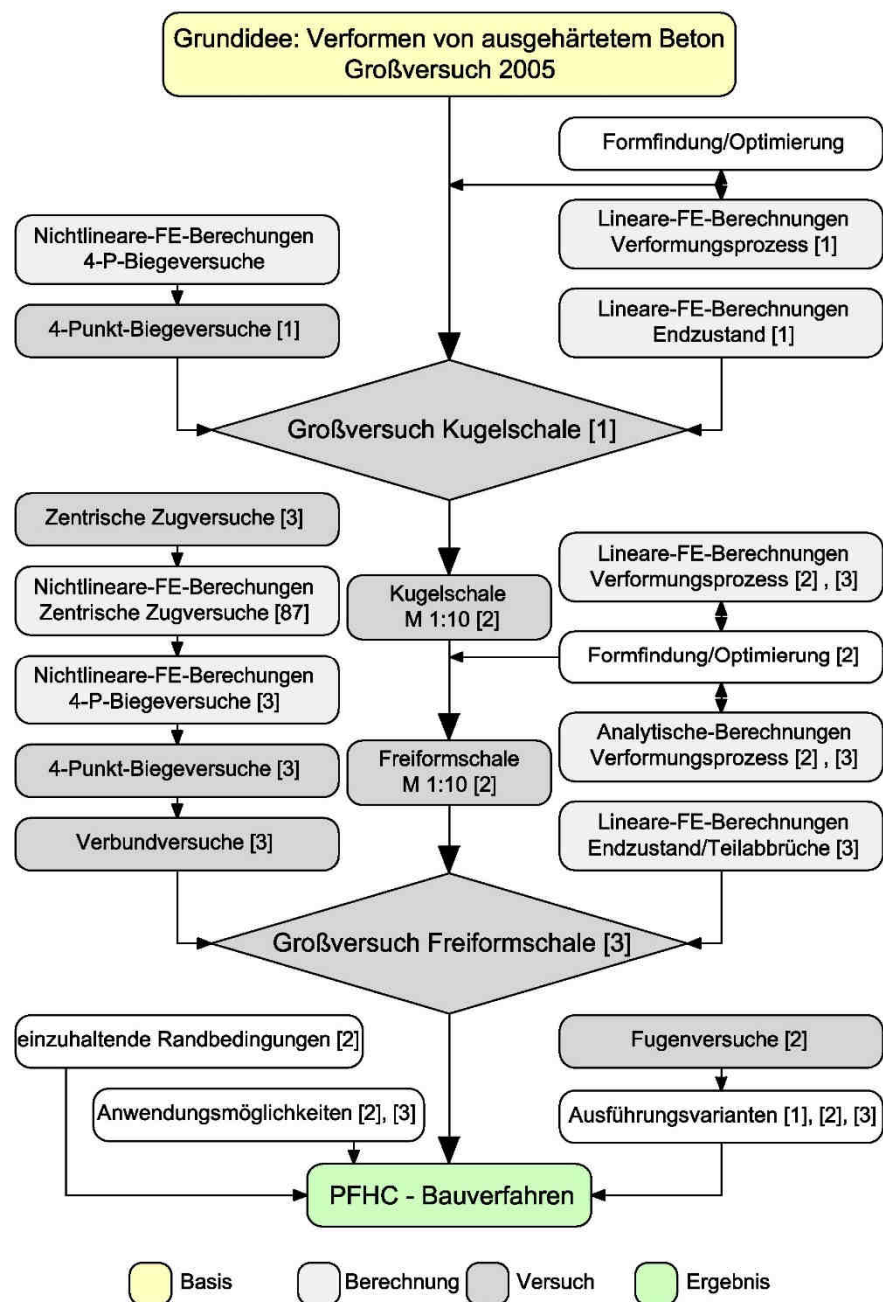


Abbildung 2 Entwicklungsprozess PFHC

4 Aktuelle Entwicklungen



Abbildung 3 Holzschalung und Lehrgerüst (links © doka, rechts © Aurelio Muttoni) [12], [20]

Aktuell gibt es unterschiedliche Überlegungen zur Optimierung und Neuentwicklung von Schalenbauverfahren. Ideen dafür sind zum Beispiel die Optimierung der Arbeitsprozesse bei der Holz-Schalungsherstellung durch einen höheren Automatisierungsgrad bei der Arbeitsvorbereitung und der Fertigung. Praktische Umsetzungen dafür sind beispielsweise eine beeindruckende Schalenkonstruktion für die Überdachung eines Einkaufszentrums in Chiasso in der Schweiz [20] oder die Mythosrampe des Mercedes Benz Museums in Stuttgart [9], [21], [22], oder auch die Dachkonstruktion des Hans-Otto Theaters in Potsdam [21], [23].

Eine weitere Möglichkeit, die erstmals 1990 patentiert [24] und nun in einer ähnlichen Form an der RWTH Aachen wieder aufgegriffen wurde, ist die Verwendung von vorgefertigten Textilbetonstrukturen, die anschließend mit vordefinierten Faltkanten nach Vorbild der japanischen Papierfaltkunst zu einem Tragwerk gefaltet werden [25], [26]. Ein anderer Ansatz, der momentan verfolgt wird, ist die Verwendung von Styroporblöcken als Schalung und Gegenschalung, die mit Hilfe von Bearbeitungsrobotern in Form gefräst und anschließend gestapelt werden [27] (siehe Abbildung 4). Aktuell werden noch mehrere Verfahren mit Hilfe pneumatischer Schalung verwendet, auf die im weiteren Verlauf der Arbeit genauer eingegangen wird. Eine weitere zeitsparende Methode, rotationssymmetrische Kuppeln zu bauen, ist, diese aus gleichartigen Fertigteilen zusammenzusetzen [28].



Abbildung 4 Eine freigeformte Schalungskonstruktion aus Styroporblöcken ©Paschal (Styroporschalung links, fertig gestellte Betonstruktur rechts) [27]

5 Stand der Technik bei Schalenbauverfahren

In der Vergangenheit wurde bereits eine Vielzahl von beeindruckenden Stein- und Betonschalungskonstruktionen mit den unterschiedlichsten Herstellungsverfahren gebaut. Im Zuge der drei folgenden Fachpublikationen wird auf eine Auswahl von wichtigen Architekten und Ingenieuren im Schalenbau und deren Bauwerken eingegangen [1], [2], [3]. Eine detaillierte Beschreibung findet man unter anderem in folgenden vorhandenen Publikationen: [5], [9], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40].

Wie bereits in Abschnitt 1 *Problemstellung* beschrieben, werden bei konventionellen Schalungsbauverfahren für doppelt gekrümmte Flächen sehr hohe Aufwände für Material und Arbeitszeit notwendig. Grund dafür sind einerseits die notwendigen Stützkonstruktionen, um die Lasten des Frischbetongewichts abzutragen, und die durchgehend variable Höhe dieser Stützkonstruktion, sowie andererseits die notwendige doppelt gekrümmte Schalhaut. Die Stützkonstruktion wird je nach Konstruktionshöhe von Deckenstützen bei geringen Bauhöhen oder zusätzlich ausgesteiften Traggerüsten bei größeren Bauhöhen übernommen. Die Schalhaut wird dann meist von Lamellen aus Holz, Kunststoff oder Stahl gebildet, die mithilfe einer Unterkonstruktion gebogen und in Form von Kästen montiert werden. Wird eine Schale in mehreren Bauphasen (beispielsweise im Pilgerschrittverfahren) hergestellt, muss die gesamte Schalungs- und Stützkonstruktion zusätzlich umgesetzt, also auf- und abgebaut, werden. Eine weitere Möglichkeit, die derzeit für rotationssymmetrische Betonschalen angewandt wird, stellen selbsttragende Stahlkonstruktionen dar, die die Lasten in Form von Ringzugbeziehungsweise Ringdruckkräften abtragen [41].

Alternativ dazu stehen mehrere Systeme mit pneumatischen Schalungen zur Verfügung. Eine erstmalige Anwendung war vermutlich jene von Nose, T. für die Herstellung von Rohren im Jahr 1926 [42]. Er verwendete schlauchartige Pneus, versetzte diese in einen vorher ausgehobenen Graben und verfüllte den übrig gebliebenen Raum mit Beton. Rund 15 Jahre später patentierte Neff, W. 1941 als Erster eine Technologie zur Verwendung einer pneumatischen Schalung für die rasche Errichtung von kostengünstigen Häusern [43], [44]. Die Basis bildete eine aufgeblasene Membran, auf die anschließend Beton aufgebracht wurde. Ein Beispiel für diese Schalung und ein fertiggestelltes Haus sind in Abbildung 5 dargestellt.

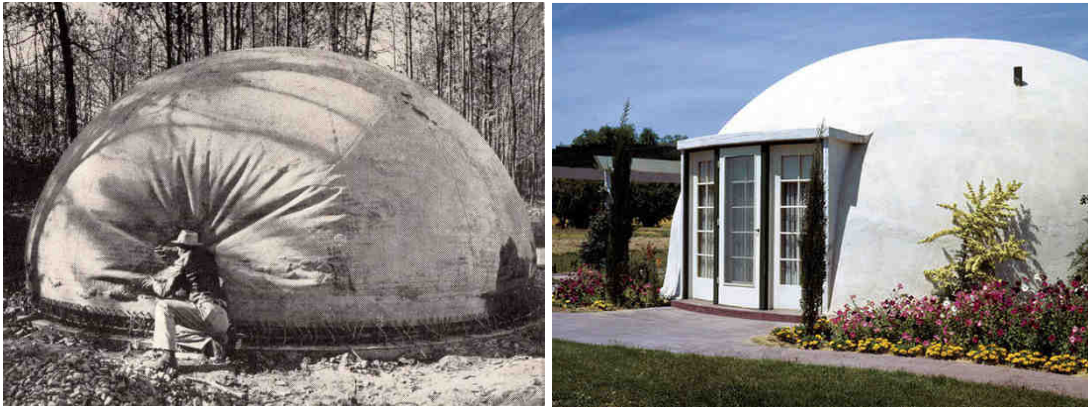


Abbildung 5 "Bubble House" Schalung (links) und fertig gestelltes Haus (rechts) [43], [44].

Weitere Systeme, bei denen pneumatische Strukturen aufgeblasen, platziert und ähnlich dem System von Nose, T. anschließend verfüllt werden, sodass nach dem Ablassen Hohlräume verbleiben, wurden von Mathews, Ch. 1949 und Mora, P. 1968 patentiert [45], [46]. Eine weitere Möglichkeit für die Herstellung von kostengünstigen Häusern mit pneumatischen Schalungen entwickelte Heifetz, H. in Israel in den 1960er Jahren [47]. Wieder wurde zuerst ein Pneu aufgeblasen und anschließend Spritzbeton auf die Außenseite der Membran aufgebracht. Zirka zur gleichen Zeit erfand Bini, D. ein Schalenbauverfahren, bei dem noch nicht ausgehärteter Beton ausgehend von einer ebenen Platte zu einer Kuppel verformt wird. Da die in Umfangsrichtung angeordnete Bewehrung in der Lage sein muss die großen Verzerrungen aufzunehmen, wurde diese federartig gebogen [48], [49], [50]. Zum Verformen wurden zwei Membranen verwendet. Die eine diente als Hebepneu unter der Frischbetonplatte und die andere als Gengenschalung über der Betonplatte.

In den 1970er Jahren entwickelte South, D.B. ein Verfahren, das er 1979 patentieren ließ, bei dem die pneumatische Struktur durch eine zusätzlich aufgebrachte Polyurethanschicht vor Applikation des Betons ausgesteift wurde [51], [52]. Nicholls, R.L. patentierte 1984 ein Verfahren, bei dem eine spezielle Betonmischung mit der erforderlichen Bewehrung in eine nach unten gewölbte Form eingebracht, am Auflager verankert und anschließend verformt wird. Durch Zugabe einer chemischen Reaktionskomponente wird der Beton anschließend in der Endposition ausgehärtet [53].

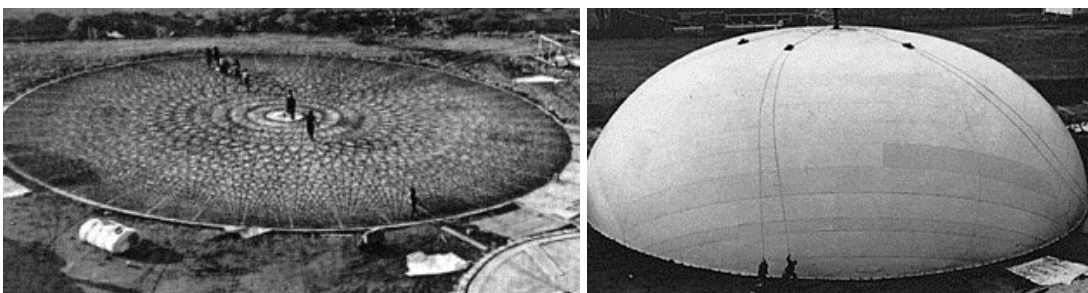


Abbildung 6 Das Verformen von frischem Beton von Dante, B. [48], [49], [50].

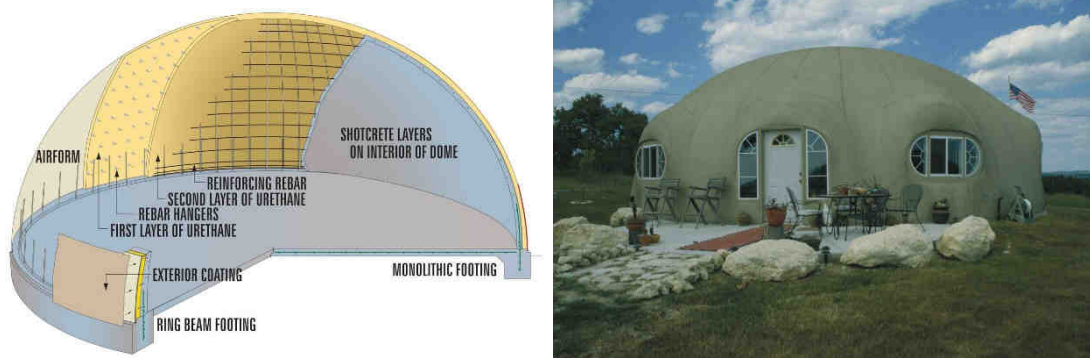


Abbildung 7 Herstellungsverfahren von Monolithic (links) und fertig gestellte Schale (rechts) [64]

Schlaich, J. und Sobek, W. entwickelten in den 1980er Jahren ein Verfahren, bei dem Betonfertigteile auf eine pneumatische Schalung aufgelegt werden [9], [14], [54], [55], [56], [57], [58], [59]. Der Vorteil dabei ist, dass die Deformationen in der Schalung schon beim Belasten mit den Fertigteilen auftreten und die zusätzlichen Belastungen, und somit auch Deformation, durch das Verfüllen der Fugen gering ist. Eine weitere Möglichkeit gekrümmte Betonflächen herzustellen ließ Hale, L.E. 1988 in den USA durch ein Patent schützen. Bei diesem Verfahren wird der als Schalung dienende Pneu durch Gurte am Boden fixiert. Nachdem der Pneu aufgeblasen ist, wird die erforderliche Bewehrung an der Außenseite des Pneus verlegt, bevor der Beton aufgebracht wird [60].

Wie in [61] beschrieben, gibt es auch jetzt noch einige Firmen, die die damals entwickelten Technologien nutzen und weiterentwickeln. Beispiele sind Binishells, Pirs, YSM, BB-Con, Monolithic, Dome Technology und Concrete Canvas [62], [63], [64], [65], [66], [67]. Abbildung 7 zeigt das Herstellungsverfahren und eine fertiggestellte Schale von Monolithic. Concrete Canvas hat ein Fasermatrixgewebe entwickelt, das eine Trockenbetonmischung beinhaltet und in Bahnen hergestellt wird [68]. Diese Bahnen können in eine beliebige Form gebracht und anschließend durch Besprühen mit Wasser ausgehärtet werden. Die Firma bietet beispielsweise Behelfsüberdachungen an, die aus diesem Material vor Ort vorgefertigt, aufgeblasen und dann nach rund 24h verwendet werden können (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8 Fasermatrixgewebe von Concrete Canvas (links), aufgeblasene Behelfsüberdachung von Concrete Canvas (rechts) [67], [68].

6 Formfindung und Diskretisierung

Wie bereits in Abschnitt 1 *Problemstellung* beschrieben, stellt die Ermittlung einer optimierten Schalenform, die durch eine Vielzahl von Randbedingungen und deren Gewichtung beeinflusst wird, einen sehr wichtigen Teilbereich im Schalenbau dar. Beispielsweise wird in [69] eine grundsätzliche Einteilung der Formen in geometrisch definierte Formen, aus statischen Gesetzmäßigkeiten generierte Formen und „frei“ gestaltete Formen vorgenommen. Es sollte daher vor Beginn eines Entwurfsprozesses eine Hauptgewichtung festgelegt werden, unter die alle weiteren Forderungen untergeordnet werden. Das könnte ein spezielles Design oder das Minimieren der für die Herstellung notwendigen Ressourcen sein. Mögliche Forderungen nach [9] sind beispielsweise Leichtbau im Sinne von Gewichtsminimalität, oder die Anpassung an spezielle geometrische Qualitäten. Aktuell gibt es, wie in [15], [70], [71] beschrieben, neben dem klassischen Leichtbau bereits Überlegungen zum „Ultraleichtbau“. Mit dem aktuellen Entwicklungsstand in der Materialforschung können derart leichte Strukturen errichtet werden können, dass die ständigen Lasten im Verhältnis zu den veränderlichen Lasten sehr klein werden. Da der Formfindungsprozess bis heute bei frei stehenden Tragstrukturen hauptsächlich durch die ständigen Lasten, im speziellen Eigenlasten geprägt war, wird in der Veröffentlichung vorgeschlagen, diesen neu zu überdenken. Es wird eine Möglichkeit beschrieben Tragwerke zu entwickeln, die aktiv auf die dynamischen Lasten reagieren. Gibt es zusätzliche, ständige, verhältnismäßig hohe äußere Lasten, so formen diese die Tragstruktur. Wendet man Leichtbau im Tiefbau an, beispielsweise für eine Wildbrücke, die anschließend überschüttet wird, wird das Eigengewicht der Tragstruktur sekundär und der Lastfall Erddruck prägt die notwendige Form.

In der vorliegenden Arbeit wird vorerst auf eine Anwendung von PFHC im klassischen, dem Lastfall Eigengewicht folgenden Schalenbau, vorgestellt. Da der Verformungsprozess an sich schon ein dynamischer, vorwiegend im linear elastischen Bereich der Bewehrung durchgeführter Transformationsvorgang ist, wäre in der Zukunft auch denkbar, Schalen, die in Ringrichtung nicht verbunden sind, aktiv zu verändern und an die auftretenden Lasten anzupassen.

Ziel dieser Arbeit ist, die möglichen Anwendungsbereiche und Randbedingungen der PFHC-Baumethode zu bestimmen [2]. Sind diese bekannt, so können diese Eigenschaften in den Entwurfsprozess miteinbezogen werden, bzw. kann in einem frühen Planungsstadium entschieden werden, ob eine Errichtung des Bauwerkes mit PFHC möglich und sinnvoll ist.

Formen, die mit der Baumethode hergestellt werden können, bestehen verfahrensbedingt immer aus einer Anordnung von einfach gekrümmten Betonflächen mit unterschiedlichen Abmessungen. Um eine Betonschale mit dem Bauverfahren errichten zu können, ist es also erforderlich, die ursprünglich „glatte“ zweifach gekrümmte Struktur zu einer aus einfach gekrümmten Flächen bestehenden Struktur mit positiver

Gauß'scher Krümmung zu diskretisieren. Ist dieser Vorgang gelungen, kann die Betonschale für das Betonieren der ebenen Betonplatte anschließend einfach abgewickelt werden. Im Detail wird dieser Prozess in [2] beschrieben.

Nach [72] gibt es eine Unterscheidung in experimentelle Formfindung und computergestützte Formfindung. Die mittlerweile zur Verfügung stehende Optimierungssoftware ermöglicht es, den gesamten Formfindungsprozess weitgehend computergestützt durchzuführen und das grafische Ergebnis der gefundenen Schalenformen in der Ausgabe der jeweiligen Programme in Echtzeit zu verfolgen. Mögliche Arten von numerischen Methoden zur Strukturoptimierungen und eine Beschreibung des Präzedenzfalltes Betonschale findet man in [73]. Weitere Ansätze zur numerischen Formoptimierung von Schalen findet man in [74], [75], [76]. Mögliche numerische Optimierungsvorschläge von Betonschalen findet man in [77], [78]. Im Zuge der Arbeit werden Polygonnetzoptimierungen zur Bestimmung der optimalen Form verwendet. Mögliche Vorgangsweisen sind in [79] genauer erläutert.

Der erste Teilbereich der Optimierung einer mit PFHC hergestellten Betonschale gilt einer für die jeweilige Anwendung passenden Form. Wurde diese erfolgreich bestimmt, muss diese Form für die Anwendung von PFHC, wie oben beschrieben, in einer zweiten Optimierung diskretisiert und abgewickelt werden. Zu berücksichtigende Randbedingungen dabei sind die minimale Segmentgröße, die Größe der Anschlussplatten am Scheitel der Betonschale oder die maximale Anzahl der verwendeten Luftkeile für die digitale Regelung.

Wendet man das Verfahren für die Errichtung einer Schale in der Praxis an, ist zu berücksichtigen, dass für die ebene Ausgangsplatte eine glatte Sauberkeitsschicht erforderlich ist. Durch das Abwickeln der Struktur vergrößert sich die erforderliche Grundrissgröße, die bauseits zur Verfügung gestellt werden muss. Die Größe variiert je nach Entwurf der Schale. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass für den Verformungsprozess eine Randbeschwerung erforderlich ist. Diese kann entweder, wie im Großversuch gezeigt, anhand einer erhöhten Betonplattendicke im Randbereich oder durch sekundäre Beschwerungen aufgebracht werden.

7 Verfahrensoptimierung

Wie in [16], [17], [18] und [19] beschrieben, treten während der Verformung von einer Platte zu einer zweifach gekrümmten Schale verhältnismäßig kleine Verzerrungen in radialer Richtung und große Verzerrungen in Umfangsrichtung auf. Beton als Konstruktionsmaterial ist, wie später gezeigt wird, in Kombination mit einer passenden Bewehrung in der Lage, die in radialer Richtung auftretenden Verzerrungen in Form von Biegeverformungen aufzunehmen. Nicht aufgenommen werden können jedoch die großen in Umfangsrichtung auftretenden Verzerrungen. Um also die ursprünglich ebene Betonplatte in eine doppelt gekrümmte Schale umformen zu können, muss in die ursprünglich ebene Betonplatte vor dem Verformen ein zusätzliches, leicht zusammendrückbares Material eingebaut werden. Die erforderliche Breite dieses Materials ergibt sich aufgrund des in Abschnitt 6 *Formfindung und Diskretisierung* beschriebenen Prozesses durch die Vereinfachung zu einfach gekrümmten Flächen und die anschließende Abwicklung. Je nach gewünschter Schalenform sind die notwendigen Öffnungen meist keilförmig mit einer Verjüngung in Richtung des Plattenmittelpunktes. Je größer die auftretenden Elementkrümmungen sind, und je größer die gesamte Schale ist, desto breiter werden diese keilförmigen, weichen Elemente. In ersten Versuchen im Jahr 2005 [17] wurde Styropor verwendet, um die großen auftretenden Stauungen aufzunehmen. Da bei größeren Elementabständen und Strukturen mit höheren auftretenden Krümmungsradien mit Stabilitätsproblemen der Styroporkeile zu rechnen ist, begrenzt die Verwendung der Styroporkeile die Errichtung von Schalen mit einer maximalen Krümmung von 0.1 1/m und dem Durchmesser auf ca. 12m (siehe Abbildung 9). Zudem verbleiben die Styroporkeile in der fertiggestellten Struktur und könnten unter anderem in einem fertigen Bauwerk je nach Wandaufbau zu feuerpolizeilichen Problemen und optischen Beeinträchtigungen führen.

Im Zuge der vorliegenden Dissertation werden die Styroporkeile durch pneumatische Keile ersetzt, welche im Nachhinein einfach entfernt werden können [80]. Da in den pneumatischen Keilen Überdruck herrscht, und die dafür verwendete Membran Zugbeansprucht ist, kann es während des Umformens von einer Platte zu einer zweifach gekrümmten Schale, und somit dem Zusammendrücken der Keile, zu keinem Stabilitätsversagen kommen. In [81] und [82] sind im Allgemeinen die Berechnung und das Verhalten von Membranen im Bauwesen genauer beschrieben. Dadurch können Betonschalen gebaut werden, die im ursprünglich ebenen Zustand keilförmige Öffnungen beliebiger Breite aufweisen.

Der wesentliche Unterschied von PFHC zu bereits bekannten Schalenbauverfahren liegt in einer Umkehr des Bauprozesses, nämlich, dass zuerst betoniert und anschließend verformt wird, ähnlich dem Verfahren von Bini, D. [48], [49], [50]. Anders als bei Bini wird mit PFHC, wie der Name schon sagt, der vollständig ausgehärtete Beton mit kontrollierter Rissbildung verformt.



Abbildung 9 Versuchsschale mit Styroporkeilen (links ebene Platte, rechts fertig verkrümmte Schale)

Als vorteilhaft erweist sich dabei, dass sich im vollständig ausgehärteten Beton und der zusätzlich eingebauten Bewehrung je nach Krümmung der Schale vorab anhand von mit Biegeversuchen kalibrierten Berechnungen bestimmbare Verzerrungen einstellen und somit der Verformungsprozess wesentlich besser kontrolliert werden kann. Die bei diesem Verformungsprozess auftretenden Verzerrungen in Umfangsrichtung sind durch die vorab definierten Keile genau bestimmt. Werden diese Keile während des Umformens bis zu der vorab festgelegten Fugenbreite geschlossen, kann garantiert werden, dass die Form genau erreicht wird. Die einzig möglichen Ungenauigkeiten können bei Herstellung der ebenen Schalung und dem anschließenden Betonieren der Platte auftreten. Da die Fertigung einer ebenen Schalung und das Betonieren von ebenen Platten in der Praxis oftmals angewandte Arbeiten sind, kann man davon ausgehen, dass die vorgegebenen Fertigungstoleranzen eingehalten werden können.

Um die gesamte Struktur überhaupt verformen zu können, muss unter der Betonplatte ein Pneu angeordnet werden, der die Struktur möglichst schonend anhebt. Anhand von Drucktests wird die Anwendbarkeit von für Hebepneu und keilförmige Pneus verwendbaren Folien für das Bauverfahren verifiziert. Entscheidende Materialparameter sind dabei die Zugfestigkeit, die Elastizität, die Schweißbarkeit der Folie sowie auch die Zugfestigkeit der geschweißten Nähte. Da eventuelle Leckagen im Hebepneu den Hebeprozess und in den pneumatischen Keilen deren Wirkungsweise negativ beeinflussen, muss einerseits eine passende Verankerung der Keile in den Betonelementen bestimmt werden, sowie andererseits eine passende Form für den Hebepneu entworfen werden. Da kleine Beschädigungen sowie Feuchtigkeitseinwirkung auf der Baustelle nicht ausgeschlossen werden können, stellen das Verhalten bei Nässe und die Weiterreißkraft ebenfalls wichtige Parameter dar.

Ein weiteres wichtiges Kerngebiet stellt die Entwicklung und Bemessung der für das Verfahren erforderlichen Detaillösungen dar. Die dabei behandelten Teilbereiche lauten wie folgt:

- Lage der Spannlitzen und Entwicklung des Plattenranddetails
- Lage und Lagesicherung der Bewehrung
- Verankerung der pneumatischen Keile im Beton

- Entwicklung einer Sicherung gegen Querverschub der einzelnen Betonelemente
- Entwicklung von Abstandhaltern zur Einhaltung der erforderlichen Planfugen

Auf Basis von möglichst einfachen, in der praktischen Anwendung rasch umsetzbaren Detaillösungen können auf der Baustelle auftretende Ungenauigkeiten kompensiert und die Arbeitsabläufe vereinfacht werden.

8 Realisierung von großen Biegeverformungen in ausgehärtetem Beton

Im Gegensatz zum konventionellen Betonbau, bei dem große Durchbiegungen von fertiggestellt betonierten Gebäudeteilen in der Regel unerwünscht sind, basiert das vorgestellte Schalenbauverfahren eben genau auf den Biegeverformungen von ausgehärteten Betonplatten. Strebt man normalerweise nach einem möglichst rissfreien Betontragwerk, wird diese Eigenschaft der Rissbildung bei Überschreitung der Zugfestigkeit des Betons bewusst kontrolliert für die Herstellung von Betonschalen verwendet. Wie in [83] beschrieben und allgemein bekannt, wird durch das Auftreten von breiten Rissen in Stahlbetonbauteilen die Tragfähigkeit nur aufgrund des fehlenden Korrosionsschutzes beeinträchtigt. Verwendet man nun anstatt von korrosionsanfälligem Betonstahl eine Bewehrung aus nicht korrosionsanfälligem Material wie z.B. Edelstahl, Glasfaser, Carbon, Basalt oder Kunststoff, so stellen solche breiten Risse statisch kein Problem mehr dar. Aus Gründen der Einhaltung der Gebrauchstauglichkeit und möglicher Sicherheitsbedenken der Betrachter und Nutzer ist es dennoch zumindest tendenziell sinnvoll, den Forderungen der aktuellen Normenwerke [84], [85] zur Bemessung im Betonbau zu folgen und die Rissbreiten auch bei einer gezielten Anwendung zu begrenzen.

Anforderung seitens des Bauverfahrens sind möglichst gleichmäßig verlaufende Krümmungen in den einzelnen Betonelementen während des Verformens. Dadurch kann garantiert werden, dass das fertige Bauwerk optisch entspricht und Überlappungen der Elemente vermieden werden. Zusätzlich gilt, je höher die maximale Krümmung gewählt werden kann, desto größer wird das Feld der herstellbaren Formen.

Fasst man nun alle genannten Randbedingungen zusammen, so ist man auf der Suche nach einer Beton- Bewehrungskombination, die große Biegeverformungen aufnehmen kann und dabei eine möglichst große Anzahl von Rissen mit kleiner Rissweite aufweist.

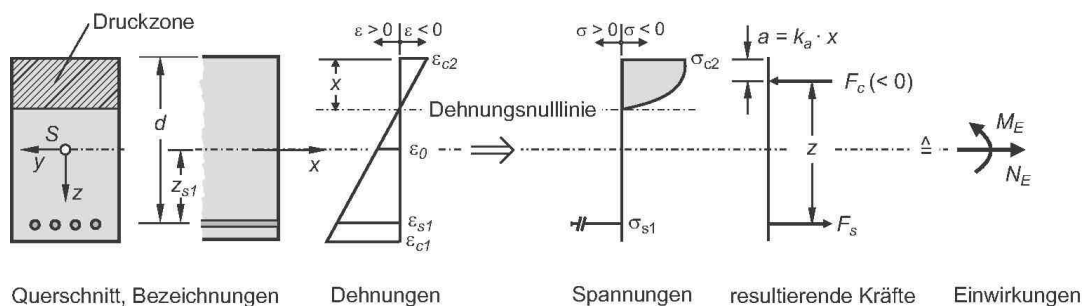


Abbildung 10 Spannungszustand für einen rein biegebeanspruchten Betonbalken [72]

Da Beton bereits bei sehr geringer Dehnung unter Zugbeanspruchung reißt, stellt sich bei reiner Biegebeanspruchung der in Abbildung 10 gezeigte Spannungszustand in einem Betonbalken ein. Möchte man nun eine Betonplatte gezielt verbiegen, so müssen die Dehnungen in der Platte einerseits durch Dehnungen ε_s in der Bewehrung und andererseits durch Stauchungen ε_c im Beton aufgenommen werden. Vereinfacht man diesen Zusammenhang, so ergibt sich die Krümmung zu (der geometrische Zusammenhang ist in Abbildung 11 dargestellt):

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d}$$

Möchte man die Krümmung nun maximieren, so erkennt man rasch, dass dies durch eine geringe Höhe des inneren Hebelarms und oder große Dehnungen in der Bewehrung möglich ist. Wird die Betondicke und somit der innere Hebelarm so minimiert, dass die statischen Randbedingungen der fertiggestellten Struktur noch erfüllt werden können, ist eine Erhöhung der maximalen Krümmbarkeit nur durch große Dehnungen in der Bewehrung möglich. Berücksichtigt man die Forderung nach kleinen Rissabständen, so muss diese Bewehrung neben großen Dehnungen auch gleichzeitig einen guten Verbund aufweisen, was einen gewissen Widerspruch bedeutet. Die Bewehrung soll also einen möglichst geringen Elastizitätsmodul in Längsrichtung aufweisen und zusätzlich einen möglichst hohen Elastizitätsmodul in Querrichtung.

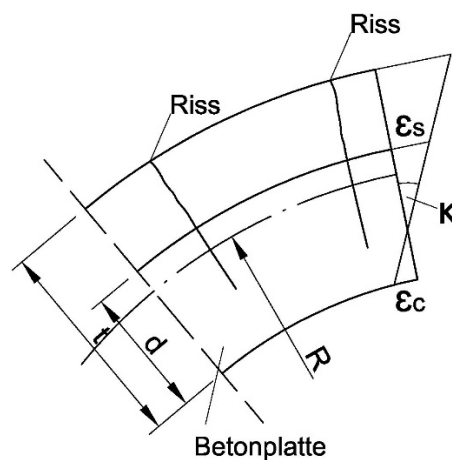


Abbildung 11 Dehnungen im biegebeanspruchten Betonkörper

Zudem sollte noch berücksichtigt werden, dass der Verkrümmungsprozess möglichst kontrolliert verläuft. Vor Herstellungsbeginn einer Schale muss klar sein, wie sich die einzelnen Platten während des Verkrümmungsvorganges verhalten. Ein Versagen von Betonplatten oder das plötzliche Aufweiten von einzelnen Rissen in den Betonplatten muss deshalb unbedingt vermieden werden.

Wie in [86] beschrieben wurden Stahlseile bereits erfolgreich für die Bewehrung von Eiskörpern verwendet, die von ebenen Eisplatten zu einfach gekrümmten Bögen verformt wurden.

Darauf basierend wurde in einem ersten Schritt der mögliche Einsatz von Stahlseilen als Betonbewehrung für die oben genannten Anforderungen in 4-Punkt-Biegeversuchen geprüft, die in [1] beschrieben sind. Vergleichsweise wurden konventionell bewehrte Betonplatten geprüft, und es konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz von Stahlseilen die maximale Krümmung der Versuchsplatten mehr als verdoppelt werden konnte.

Der Grund für die höhere erreichbare Durchbiegung wird anhand der in Abbildung 12 dargestellten Spannungs-Dehnungs-Kurven von Baustahl ($\varnothing=6\text{mm}$) und Stahlseilen ($\varnothing=5\text{mm}$) unter einaxialer Zugbelastung erklärt. Stahlseile werden aus kaltverfestigten Drähten hergestellt, weisen ein nahezu linear-elastisches Materialverhalten auf und können somit sehr kontrolliert bis zum Bruch verformt werden. Konventioneller warmgewalzter Bewehrungsstahl zeigt im Gegensatz dazu ein nichtlineares Materialverhalten mit einem ausgeprägten Fließplateau auf. Dies ist zwar vorteilhaft für die Ankündigung des Versagens eines Bauteils, aber nachteilig für die gleichmäßige Rissbildung und eine gleichmäßige Verformung. Die Risse, bei denen die Fließspannung als erstes erreicht wird, zeigen bei gleichbleibender Last eine im Vergleich zu den anderen Rissen weitaus größere Rissöffnung auf. Für das Verfahren bedeutet das bei großen Durchbiegungen eine ungleichmäßige Verformung. Verwendet man konventionelle Bewehrung für PFHC, so muss als maximale Dehnungsgrenze somit die Elastizitätsgrenze (rote Linie im Diagramm) mit zusätzlicher Berücksichtigung von Sicherheiten herangezogen werden. Im Vergleich dazu kann bei einem Stahlseil die Bruchspannung (grüne Linie im Diagramm) mit Berücksichtigung von Sicherheiten verwendet werden. Ein weiterer positiver Aspekt ist der weitaus geringere Elastizitätsmodul von 85120N/mm^2 der Stahlseile (konventioneller Betonstahl: 210000N/mm^2), was ein Verformen der Betonplatten mit einem wesentlich geringeren Luftdruck möglich macht.

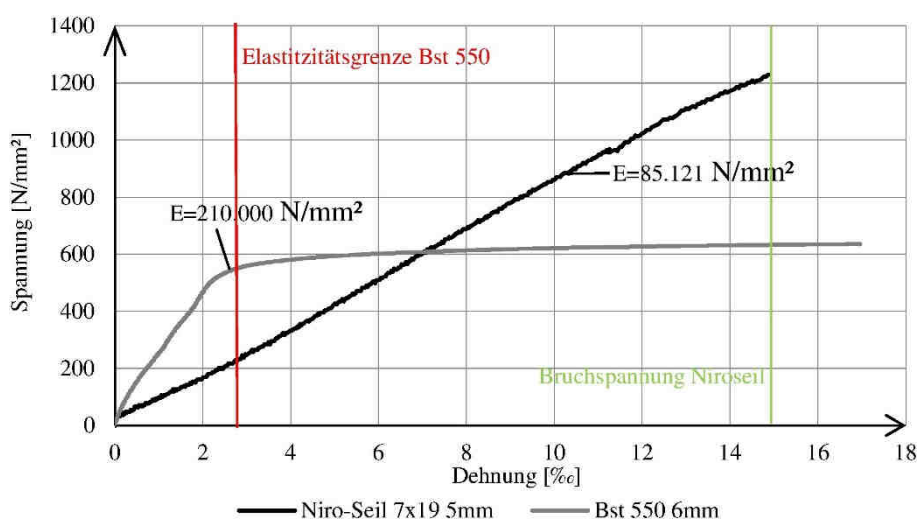


Abbildung 12 Spannungs-Dehnungs-Kurven von Baustahl ($\varnothing=6\text{mm}$) und Nirosta Stahlseil ($\varnothing=5\text{mm}$) unter einaxialer Zugbeanspruchung

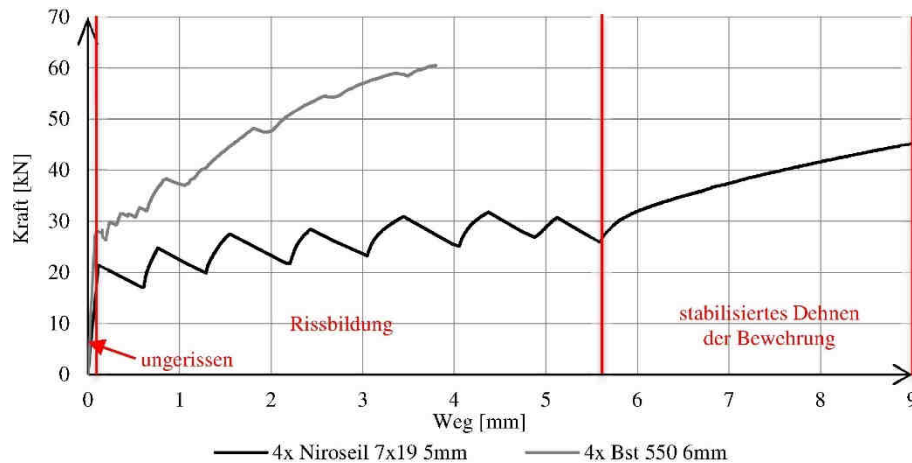


Abbildung 13 Kraft-Weg-Kurven von einem Nirosta Stahlseilen bewehrten Betonkörper und einem konventionell (Bst 550) bewehrten Betonkörper unter einaxialer Zugbelastung

Abbildung 13 zeigt die Kraft-Weg-Kurven eines mit vier Stück. Nirosta Stahlseilen ($\varnothing=5\text{mm}$) bewehrten Betonkörpers und eines mit konventionellem vier Stück Bau-stahl($\varnothing=6\text{mm}$) bewehrten Betonkörpers. Während anhand der Arbeitslinie des kon-ventionell bewehrten Betonkörpers eine deutliche Laststeigerung zwischen Erstriss und Letztriss beobachtet werden kann, zeigt die Arbeitslinie eines mit Stahlseilen bewehr-ten Betonkörpers nur eine geringe Laststeigerung im Bereich der Rissbildung und da-bei größere Dehnungen. Ist die Rissbildung abgeschlossen, können die mit Stahlseilen bewehrten Betonkörper nahezu linear elastisch bis zum Bruch weiterbelastet werden. Wird nun eine Platte mit Stahlseilbewehrung gebogen, lässt sich aus diesen Ergebnis-sen schließen, dass diese sehr kontrolliert verformt werden kann und zusätzlich noch große Dehnungen in der Bewehrung, also große Krümmungen in der Platte, möglich sind.

Die Industrie bietet eine große Anzahl unterschiedlicher Typen von Stahlseilen an. Zur Bestimmung des für die Anwendung am besten passenden Stahlseils wurden vier aus-gewählte Typen in einaxialen Zugversuchen überprüft. Die technischen Daten sowie die Spannungs-Dehnungs-Kurven sind in Tabelle 1 und Abbildung 14 dargestellt.

Tabelle 1 Unterschiedliche Arten von Stahlseilen

	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
	Nirosta Stahl-seil 7x7+SE	Nirosta Stahl-seil 7x19+SE	Standard 6x19	Warrington 6x19
Durchmesser	5mm	5mm	5mm	5mm
Zugfestigkeit	1570N/mm ²	1570N/mm ²	1770N/mm ²	1770N/mm ²
Bruchkraft lt. Hersteller	14,0kN	14,2kN	14,7kN	15,7kN
Erstbelastungsmodul	98610N/mm ²	85122N/mm ²	91368N/mm ²	86301N/mm ²
Wiederbelastungsmodul	121185N/mm ²	111479N/mm ²	113694N/mm ²	137032N/mm ²

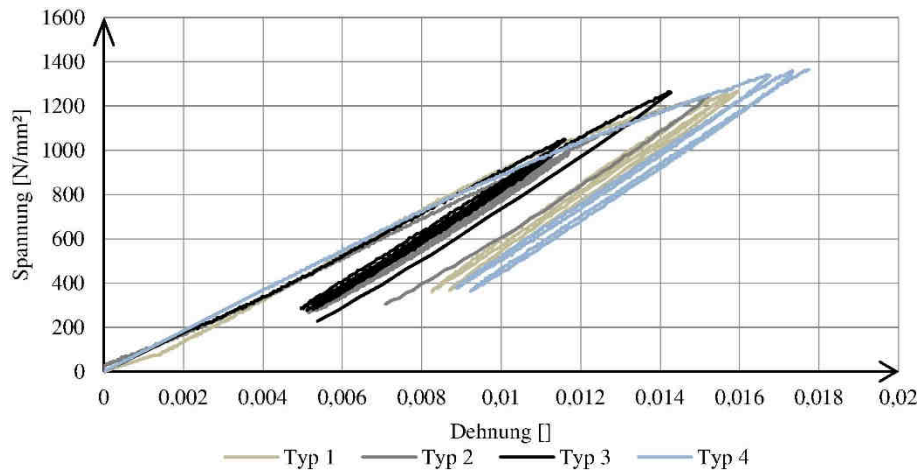


Abbildung 14 Spannungs-Dehnungs-Kurven von unterschiedlichen Stahlseilen unter einaxialer Zugbelastung

Betrachtet man nur die Dehnungseigenschaften, so können keine wesentlichen Unterschiede erkannt werden. Alle Seile, unabhängig von deren Material, Herstellungsart und Drahtanzahl, zeigen ähnliche Arbeitslinien. Verwendet man diese Seile nun als Bewehrung, kann man deutliche Unterschiede beim Verbundverhalten mit dem Beton feststellen. Abbildung 15 zeigt die Kraft-Weg-Kurven von vier Betonkörpern, jeweils mit vier Stück eines anderen Stahlseiltyps bewehrt, unter einaxialer Zugbeanspruchung. Die besten Verbundeigenschaften wiesen dabei Nirosta-Stahlseile mit 7x19 Litzen (Typ 2) auf. Grund dafür sind die große Oberfläche des Seils aufgrund der hohen Drahtanzahl und die schmiermittellose Herstellung. Ein zusätzlicher Vorteil in Hinblick auf die zu erwartende Rissbildung und die notwendige Dauerhaftigkeit bietet die gute Korrosionsbeständigkeit des Materials. Die gesamte Versuchsserie, zusätzliche Verbundversuche und eine mögliche Bemessung mithilfe eines nichtlinearen Finite-Element Programmes, sind in [87] beschrieben. Die allgemeinen Verbundeigenschaften und ein Verbundmodell findet man in [88].

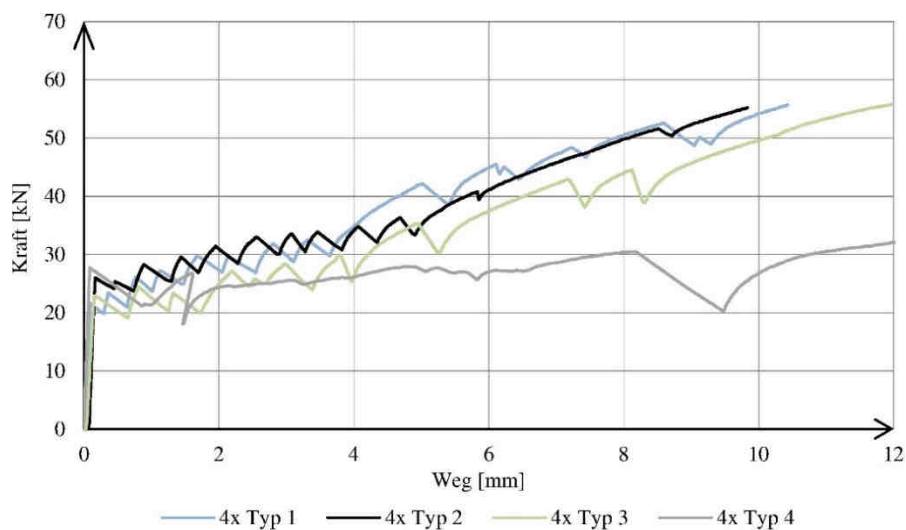


Abbildung 15 Kraft-Weg-Kurven von Stahlseil-bewehrten Betonkörpern unter einaxialen Zugbelastung

Eine weitere Möglichkeit zur Verwendung von nichtrostender Bewehrung stellen unterschiedliche Arten textiler Gelege aus Glas-, Carbon- oder Basaltfaser dar. Die Vorteile der textilen Bewehrung liegen in den geringen Abmessungen der aus den hochfesten Fasern hergestellten Rovinge. Diese bewegen sich meist im Millimeterbereich und sind somit mindestens eine Größenordnung unter den Abmessungen einer konventionellen Stahlbewehrung. Dadurch erhält man eine höhere Verbundfläche und örtlich geringere Verbundspannungen. Textilien weisen somit sehr gute Verbundeigenschaften und kurze Verankerungslängen auf. Die positive Folge sind geringe Rissabstände und geringe Rissweiten.

Die wichtigsten Erkenntnisse über Textilien als Bewehrung stammen aus den zwei Sonderforschungsbereichen SFB 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“ und SFB 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Diese wurden an der RWTH Aachen und der TU Dresden durchgeführt. Aktuell wird ebenfalls in Deutschland im Rahmen des C³ - „Carbon Concrete Composites“ Projektes im Zuge des Förderprogrammes „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ des Deutschen Ministeriums für Bildung und Forschung an textiler Bewehrung geforscht, um den Ressourcen- und Energiebedarf in Deutschland zu senken [89]. Auch außerhalb dieser Forschungsprojekte wird weltweit an textiler Bewehrung geforscht.

Eine Zusammenfassung über den Herstellungsprozess von Textilien, die unterschiedlichen Arten von Gelegen und die unterschiedlichen Imprägnierungen findet man in [90]. Ein guter Überblick über die wesentlichen Kennwerte von Textilbeton und die dazugehörigen Versuche werden in [91] beschrieben und mögliche Bemessungsmodelle werden in [92], [93] vorgestellt.

Ähnlich wie Stahlseile weisen textile Bewehrungen ein nahezu linear-elastisches Materialverhalten auf. Betrachtet man nun eine Kraft-Weg-Kurve eines textilbewehrten Betonkörpers unter einaxialer Zugbeanspruchung (Abbildung 16), so zeigt auch dieser nach Abschluss der Rissbildung eine linear-elastische Laststeigerung.

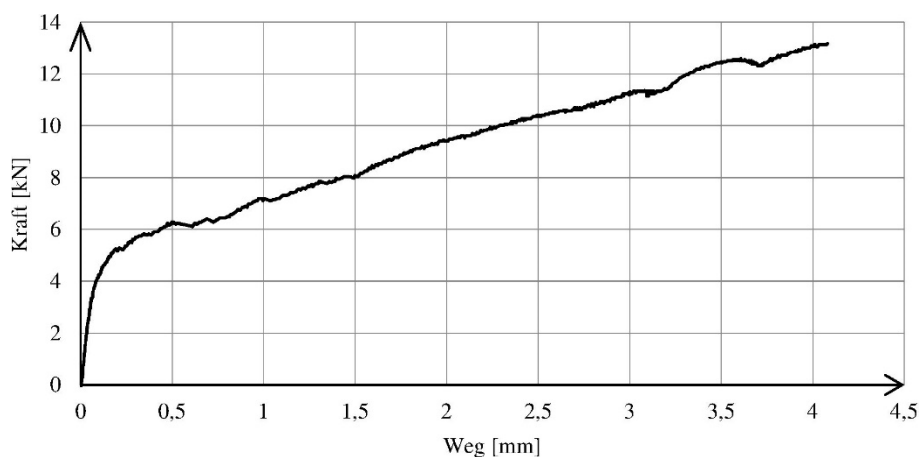


Abbildung 16 Kraft-Weg-Kurve von einem Textil (Carbon)-bewehrten Betonkörper unter einaxialer Zugbeanspruchung

Verwendet man nun Textilien als Biegebewehrung für Platten, können diese ähnlich wie mit Stahlseilen bewehrte Betonkörper sehr kontrolliert verformt werden.

Fasst man die Ergebnisse zusammen, kommen Stahlseile bzw. Textilien als Bewehrung für das Bauverfahren in Frage. Beide Arten von Bewehrung sind korrosionsun anfällig und sind in der Lage große Dehnungen von bis zu 0.015 gleichmäßig aufzunehmen. Während die textile Bewehrung kleinere Rissabstände und somit kleinere Rissweiten bei gleicher Durchbiegung ermöglicht, können die Stahlseile durch eine Vorspannung sehr genau eingebaut und in dieser Lage für das Betonieren gesichert werden. Die für die Bestimmung der optimalen Bewehrung für die Großversuche durchgeführten Berechnungen und Versuche sind in [1], [2] und [3] beschrieben.

9 Zusammenfassung der Publikationen

9.2 Zusammenfassung Publikation [1]:

Herstellung von Schalentragwerken aus Beton mit der „Pneumatic Wedge Method“ - Ein neues Bauverfahren für den Bau von zweifach gekrümmten Betonflächen mit Hilfe von pneumatischer Schalung

Zweifach gekrümmte Schalen zählen zu den bemerkenswertesten Bauwerken der Geschichte. Durch die günstige Lastabtragung in Form von Membrankräften konnten in der Vergangenheit eine Vielzahl von beeindruckenden Stein-, und mit weiterer Materialentwicklung, Betonschalen errichtet werden. Zu den bekanntesten Beispielen zählen die Peterskirche in Rom, die Jahrhunderthalle in Breslau und die Zeiss Planetarien in Jena [35], [38], [39]. Aufgrund des hohen Material- und Arbeitsaufwandes wurde der Schalenbau in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts zunehmend unwirtschaftlicher. Mit „Pneumatic Forming of Hardened Concrete“ wird ein neu entwickeltes Schalenbauverfahren vorgestellt, mit dem freigeformte Betonschalen ausgehend von ebenen Platten mithilfe einer pneumatischen Schalung und einer zusätzlichen Vorspannung in Umfangsrichtung ressourcensparend errichtet werden können.

Im Vergleich zu konventionellen Bauverfahren kann auf die aufwendige Schalungs- und Rüstungskonstruktion vollkommen verzichtet und somit Material und Arbeitszeit eingespart werden. In der Vergangenheit wurden bereits eine Vielzahl von Schalenbauweisen entwickelt und in der Praxis angewandt. Beispielsweise verwendete Heinz Isler wiederverwendbare Schalungen [30], [31], oder man verwendete Betonfertigteile, die zu einer Schale zusammengesetzt wurden [28]. Ein weiteres mögliches Bauverfahren ist die Verwendung von gummiartigen Membranen, auf die anschließend Spritzbeton appliziert wird. Ein weiterer Ansatz, um die Form dieser als Schalung dienenden Membranen mit Seilen zu stabilisieren, wurde in [51] patentiert. Dante Bini entwickelte ein Verfahren, bei dem mit Hilfe einer pneumatischen Schalung eine ursprünglich ebene, noch nicht ausgehärtete Frischbetonplatte zu einer Schale verkrümmt wird [48], [49], [50]. An der Technischen Universität Wien wurde 2005 ein Verfahren entwickelt, bei dem eine ebene, vollkommen ausgehärtete Betonplatte zu einer zweifach gekrümmten Schale verformt wird [16], [17], [18], [19]. Aktuell wird an der RWTH Aachen ein Konzept entwickelt schalenförmige Tragstrukturen aus zementbasierten Verbundwerkstoffen in Anlehnung an die Papierfaltkunst Origami herzustellen [25], [26]. Eine beeindruckende, in Chiasso in der Schweiz errichtete Schale ist in [20] beschrieben.

Das neu entwickelte Bauverfahren verformt eine vollkommen ausgehärtete Betonplatte durch Aufblasen einer pneumatischen Schalung zu einer doppelt gekrümmten Schale mit gleichzeitiger Vorspannung von zwei Spannritzen in Umfangsrichtung. Um

diese Verformung möglich zu machen, werden in der ebenen Platte keilförmige Auslässe ausgespart, um die Verzerrungen in Ringrichtung aufnehmen zu können. Zwischen den Betonelementen werden in die keilförmigen Aussparungen pneumatische Keile eingebaut. Somit können die Zugspannungen im Hebepneu gering gehalten werden.

Das Biegeverhalten wurde in Vier-Punkt-Biegeversuchen an rechteckigen Betonplatten mit Abmessungen von 500x50x2000mm, mit Stahlseilen und im Vergleich dazu mit konventionellen Bewehrungsstäben bewehrt, bestimmt. Für die sechs Versuchsplatten wurden die Anzahl der Bewehrungsstäbe beziehungsweise Bewehrungsseile sowie die Größe des inneren Hebelarms der Platten variiert. In der Auswertung der gemessenen Ergebnisse wurden die maximale Krümmbarkeit, die Gleichmäßigkeit der Krümmung, die Rissabstände und die Rissweiten berücksichtigt. Zur Verbesserung der Gleichmäßigkeit wurden in einem Teil der Versuchskörper Sollbruchstellen eingeschnitten. Die Ergebnisse zeigten, dass die mit Stahlseilen bewehrten Versuchskörper in Plattenmitte eine um 100% höhere Durchbiegung aufnehmen konnten.

Im Rahmen eines Großversuchs zur Herstellung einer rotationssymmetrischen Betonschale mit 10m Durchmesser und 3.5m Höhe, ausgehend von einer 50mm dicken Platte mit 13m Durchmesser, wurde das Bauverfahren erstmals praktisch getestet. Um eine Verformung möglich zu machen, wurde die Plattendicke im Randbereich auf den äußeren 1.2m von 50mm auf 120mm vergrößert. Für den Hebepneu wurde eine konventionelle Silofolie mit einem Flächengewicht von 138g/m² und für die pneumatischen Keile eine Polyesterplane mit einem Flächengewicht von 670g/m² verwendet.

Die ebene Betonplatte wurde nach dreimonatiger Aushärtung zu einer Schale verformt. Die Drücke in den keilförmigen Pneus wurden mit einer digitalen Steuereinheit zwischen 30 und 150mbar variiert. Für den Hebevorgang waren zwischen 10 und 18mbar im Hebepneu erforderlich. Die Schale wurde in Umfangsrichtung mit zwei Litzen mit einem Querschnitt von 150mm² und vier Monolitzenpressen mit maximal 20kN je Presse vorgespannt, bis die Endhöhe von 3.5m erreicht wurde.

Die Ergebnisse zeigten, dass das neue Bauverfahren funktioniert. Aufgrund der im Außenbereich stetig ansteigenden Plattendicke, gab es Abweichungen zur geplanten Form eines Kugelabschnitts. Da sich die als Pneu dienenden zwei Lagen Silofolie außerhalb des Schalenrandes befanden, kam es durch das Gleiten der Stahlbetonsegmente auf der Silofolie zu Leckagen im Pneu, die große Luftverluste verursachten. Diese konnten teilweise durch eine Erhöhung des Luftvolumenstroms kompensiert werden. Aufgrund einer fehlenden Verbindung der Elemente kam es während des Versuchs zu Relativverschiebungen der einzelnen blütenblattförmigen Betonelemente.

Die im Großversuch fertiggestellte Betonschale und der verfahrensbedingt notwendige Verformungsprozess von der ebenen Platte zur doppelt gekrümmten Schale wurden mit einem Finite-Element-Programm nachgerechnet. Durch eine Anpassung der Steifigkeit der Betonplatten an die Biegevorversuche konnte der Transformationsprozess

überprüft werden. Anhand der Ergebnisse kann man erkennen, dass die Versuchsschale aufgrund der ansteigenden Dicke zum Plattenrand eine Abflachung im Randbereich aufwies. Die Berechnungen des Bauendzustandes zeigten, dass die unter Eigenlast und zusätzlichen $1,5\text{kN/m}^2$ Schneelast auftretenden Biegemomente im Verhältnis zu den aufnehmbaren Biegemomenten gering sind. Die Kräfte werden hauptsächlich durch Normalspannungen abgetragen. Die Schale weist somit trotz der geringen Dicke eine sehr hohe Tragfähigkeit und geringe Verformungen von einigen wenigen mm auf.

Anhand der durchgeführten Biegevorversuche und des durchgeführten Großversuchs konnte gezeigt werden, dass das Verfahren praktisch anwendbar ist und damit Material und Arbeitszeit gespart werden können. Die verwendete Beton- Stahlseilkombination war in der Lage, die auftretenden Dehnungen aufzunehmen. Somit stellt das Verfahren eine wirtschaftliche Alternative zu bisher angewendeten Schalenbauverfahren dar. Eine mögliche Erweiterung des Verfahrens ist eine zusätzlich applizierte Spritzbetonschicht, in die eine Bewehrung in Querrichtung eingebracht werden kann.

9.3 Zusammenfassung Publikation [2]:

Application areas for pneumatic forming of concrete

Aufgrund der günstigen Membrantragwirkung können mit Schalentragwerken große Räume ohne zusätzliche Stützkonstruktionen überspannt werden. Diesen Vorteil nutzten in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl bekannter Ingenieure, um beeindruckende Kuppeln, die teilweise mehrere Tausend Jahre alt sind und bis heute Bestand haben, in den unterschiedlichsten Formen zu bauen. Aufgrund der hohen Kosten für die Schalungs- und Rüstungskonstruktionen bei der Herstellung von Schalentragwerken und des architektonischen Trends zu kubischen Formen reduzierte sich die praktische Anwendung von Betonschalen im Bauwesen in den vergangenen drei Jahrzehnten auf ein Minimum. In aktuellen Trends beginnen Architekten und Ingenieure freie, doppelt gekrümmte Formen wieder in ihre Entwürfe zu integrieren. Mit der Entwicklung der „Pneumatic Forming of Concrete“ Baumethode wird dafür eine konkurrenzfähige, wirtschaftlich attraktive Baumethode zur Verfügung gestellt.

Ausgehend von einer ebenen Betonplatte wird mit Hilfe einer pneumatischen Schalung eine doppelt gekrümmte Betonschale hergestellt. Um diese Transformation durchführen zu können, müssen in der ebenen Ausgangsplatte keilförmige Auslässe ausgespart werden, die die auftretenden Verzerrungen in Umfangsrichtung aufnehmen können. In den Bereichen, in denen der Hebeplan unter den Betonelementen liegt, dient dieser lediglich als Abdichtung und die Folie muss keine Zugkräfte aufnehmen. In den keilförmigen Auslässen zwischen den Elementen stellt die Folie die einzige trennende Membran zwischen dem atmosphärischen Druck und dem Überdruck im Hebeplan dar. Daher treten in diesem Bereich Zugspannungen in der Folie auf, die mit der Kesselformel einfach ermittelt werden können. Aufgrund der direkten Abhängigkeit zum Krümmungsradius hat die Größe der Struktur einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der auftretenden Zugspannungen. Um diese zu verringern und somit ein Bersten des Hebeplans zu verhindern, werden zwischen den Elementen keilförmige Pneus mit kleineren Krümmungsradien befestigt.

Mit der neu entwickelten Baumethode kann eine Vielzahl von unterschiedlichen Schalenformen gebaut werden. Im Rahmen dieses Aufsatzes werden die einzuhaltenden Randbedingungen definiert. Betonplatten können aufgrund der verhältnismäßig geringen Bruchstauchung von maximal 0.004 nur sehr geringe Stauchungen in Plattenebene aufnehmen. Um die für das Verfahren notwendigen Krümmungen erreichen zu können, sind große Dehnungen in Umfangsrichtung von bis zu 0.3 erforderlich, welche nicht vom Beton übernommen werden können. Somit wird ein zusätzliches weiches Material notwendig. Die Verzerrungen in radialer Richtung sind aufgrund der einfachen Krümmung der Betonsegmente geringer. Werden die Betonplatten gebogen, treten maximale Verzerrungen von 0.0035 im Beton und 0.02 in der Bewehrung auf.

Die mit dem Verfahren herstellbaren Formen müssen also aus einfach gekrümmten Betonflächen zusammengesetzt werden. Wird eine doppelt gekrümmte Fläche zu einer

Platte abgewickelt, müssen die in Umfangsrichtung auftretenden Verzerrungen durch die beschriebenen keilförmigen Auslässe aufgenommen werden. Wird eine Form mit positiver Gauß'scher Krümmung gewählt, steigt die Breite der Keile je nach Form nach außen an. Wird eine negative Gauß'sche Krümmung gewählt, wäre dies umgekehrt, die Breite des Keils würde zum Platteninneren ansteigen und zusätzliches Material wäre notwendig, um diese Keile zu füllen. Somit können mit dem Bauverfahren nur Schalen mit positiver Gauß'scher Krümmung hergestellt werden. Grundsätzlich werden die mit dem Verfahren herstellbaren Betonschalen in analytisch beschreibbare Formen und freie Formen gegliedert.

Im Wesentlichen können drei unterschiedliche Typen von analytisch beschreibbaren Flächen hergestellt werden. Dazu zählen Kugelabschnitte, Paraboloidabschnitte, Ellipsoidabschnitte und Kombinationen aus diesen Formen. Durch Modifikation dieser Formen, beispielsweise durch Verschiebung des Scheitelpunktes oder durch Veränderung der Basiskurve, können beliebig freigeformte Schalen entworfen werden. Besonders dabei ist, dass das Verfahren nicht an die aus Kugelabschnitten bestehenden Pneumformen gebunden ist, da der Pneu lediglich zum Anheben der Struktur dient. Die Form der keilförmigen Auslässe wird durch die Abwicklung der Schale bestimmt. Beim Anheben wird dieser Prozess umgekehrt. Werden alle Fugen wie geplant geschlossen, kann sichergestellt werden, dass die geplante Struktur erreicht wird. Bei rotationssymmetrischen Formen weisen alle keilförmigen Auslässe die gleiche Form auf und können daher einfach gefertigt werden. Bei freien Formen weisen alle Keile unterschiedliche Abmessungen auf, was einen Mehraufwand bei der Produktion der Keilschalung bedeutet. Die herstellbare Formenvielfalt kann durch zusätzlich Ausschnitte der Schalen nochmals wesentlich erweitert werden.

Die neu entwickelte Baumethode wurde im Rahmen eines Großversuchs mit der Errichtung einer 50mm dicken Betonschale mit 10.8m Durchmesser und 3.5m Höhe, ausgehend von einer ebenen Platte mit 13m Durchmesser, baupraktisch getestet. Die Transformation von einer ebenen Platte zur doppelt gekrümmten Schale wurde drei Monate nach der Betonage durchgeführt und dauerte 8 Stunden. Nach Fertigstellung der Schale wurden die Planfugen mit einer zementgebundenen Dichtmasse verfüllt. Anschließend wurde die gesamte Schale vollflächig mit einer Außenspachtelmasse geglättet.

Die Weiterentwicklung des Bauverfahrens für freigeformte Geometrien wurde vor Durchführung eines weiteren Großversuchs an einer, im Vergleich dazu im Maßstab 1:10 skalierten, Versuchsschale aus 12mm dicken Holzmehrschichtplatten hergestellt. Um die Transformation von einer ebenen Platte zu der geplanten doppelt gekrümmten Schale durchführen zu können, wurde ein entsprechend kleinerer Hebpneu, unterstützt durch eine Spannlitze in Umfangsrichtung, verwendet.

Der Umformungsprozess kann in drei Bereiche unterteilt werden. Zuerst wird das Eigengewicht der Betonplatte durch den Luftdruck kompensiert. Anschließend wird der

Druck im Hebeplan weiter erhöht und die ebene Platte wird verkrümmt. Dieser Verkrümmungsprozess wird zusätzlich durch Vorspannen in Umfangsrichtung unterstützt. Die Betonplatte wird durch das Anheben mit Hilfe eines Pneus mit einer konstanten Flächenlast belastet. Eine Verkrümmung ist also nur durch eine höhere Last im Randbereich der Schale möglich, die ein Abheben der Struktur verhindert.

Die optimale Beton-Bewehrungskombination wurde mit 4-Punkt-Biegeversuchen bestimmt und die Ergebnisse zeigten, dass Stahlseile als Bewehrung die notwendigen Anforderungen erfüllen.

Da verfahrensbedingt in Umfangsrichtung keine Bewehrung über die Elemente hinaus verlegt werden kann, müssen nach Abschluss des Verformungsprozesses die Fugen nachträglich kraftschlüssig verbunden werden. Dies ist entweder mit einer speziell entwickelten Fugenbewehrung möglich oder durch eine nachträglich applizierte Aufbetonschicht, in die zusätzliche Bewehrung eingelegt wird. Es wurden Zugversuche an mit Glasfasertextil-bewehrten Fugen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Bewehrung in der Lage war, die Kräfte über die Fuge hinweg zu übertragen.

Mögliche Anwendungen für „Pneumatic Forming of Hardened Concrete“ sind beispielsweise Wildbrücken über Autobahnen oder Eisenbahngleise, Konzertüberdachungen, Info-Corner, Präsentationsräume und möglicherweise in einer Weiterentwicklung auch für die Errichtung von Stadien.

Zusammenfassend kann PFHC, unter Voraussetzung einer positiven Gauß'schen Krümmung, für eine Vielzahl an rotationssymmetrischen, analytisch beschreibbaren und auch frei geformten Betonschalen verwendet werden.

9.4 Zusammenfassung Publikation [3]:

Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century

Am Beispiel von Schneckenhäusern oder Muscheln stellen aus der Natur bekannte doppelt gekrümmte Schalen trotz ihrer geringen Dicke sehr widerstandsfähige Strukturen dar. Bei Verwendung derartig doppelt gekrümmter Strukturen für Tragwerke in der Bauindustrie können verhältnismäßig große Räume ohne zusätzliche Anordnung von Stützen überspannt werden. Vor rund 90 Jahren machte die Entwicklung von Schalenbauverfahren einen entscheidenden Schritt vorwärts und man war in der Lage beeindruckende Stahlbetonschalen mit neuen Bauweisen zu errichten. Aufgrund der ständig steigenden Lohnkosten in den industrialisierten Ländern und der fehlenden Technologie in den Schwellenländern und Entwicklungsländern wurden in den vergangenen 30 Jahren nur mehr wenige Betonschalen errichtet. Aktuelle Ideen sind, den hohen Automatisierungsgrad bei der Produktion von Rüstung und Schalung zu nutzen und somit teure Mann-Stunden einzusparen [20]. Ein anderer Ansatz ist die Verwendung von pneumatischen Schalungen, auf die entweder von innen oder von außen Spritzbeton und die notwendige Bewehrung appliziert wird. Mit Entwicklung der PFHC Schalenbaumethode wird eine neue Technologie zur Verfügung gestellt, die vollkommen auf Rüstungs- und Schalungskonstruktionen verzichtet.

Wird eine doppelt gekrümmte Schale mit positiver Gauß'scher Krümmung in eine Schale aus einfach gekrümmten Elementen bestehende Struktur vereinfacht, so kann diese anschließend in eine ebene Fläche abgewickelt werden. Kehrt man diesen Prozess um, so kann ausgehend von der ebenen Betonplatte genau diese ursprünglich geplante, aus einfach gekrümmten Betonelementen bestehende Betonschale errichtet werden. Bei dieser Transformation treten große Verzerrungen von bis zu 0,3 in Umfangsrichtung der Schale auf. Da Beton eine maximale Bruchstauchung von 0,004 aufweist, ist er nicht in der Lage diese Verzerrungen aufzunehmen. Um die auftretenden Verzerrungen in Umfangsrichtung aufnehmen zu können, werden in der ebenen Platte keilförmige Auslässe ausgespart. Mit Hilfe eines Hebepneus und zusätzlicher Vorspannung in Umfangsrichtung wird dann die ebene Platte gehoben und zu einer Schale verkrümmt. Die im Hebepneu auftretende Zugkraft steht in direktem Zusammenhang mit dem Krümmungsradius des Pneus. Wird dieser Radius zu groß, ist die Folie nicht mehr in der Lage die auftretenden Zugkräfte aufzunehmen und der Pneu würde bersten. Eine mögliche Abhilfe ist die Begrenzung der maximalen auftretenden Krümmungsradien und damit auch der Schalengröße. Eine weitere Möglichkeit ist, die keilförmigen Auslässe mit an den angrenzenden Betonelementen befestigten Pneus zu füllen. Diese können im Endzustand demontiert werden und lassen sich bei der Transformation leicht zusammendrücken. Der Hebepneu liegt dann vollflächig an der anzuhebenden Platte an, die Folie stellt lediglich eine abdichtende Membran dar und muss keine Zugkräfte aufnehmen.

Die mit dem Bauverfahren herstellbare Formenvielfalt steht in direktem Zusammenhang mit der maximalen Krümmbarkeit der einzelnen Betonelemente. Wird eine Betonplatte verkrümmt, kommt es zu einer Stauchung in der Druckzone und einer Dehnung in der Zugzone. Da Beton nicht in der Lage ist, die erforderlichen Dehnungen ohne ein Auftreten von Rissen aufzunehmen, muss eine zusätzliche Bewehrung eingebaut werden, die in der Lage ist die beim Verformungsprozess auftretenden Dehnungen aufzunehmen. Im Rahmen von nichtlinearen Finite-Element-Berechnungen wurden der Einfluss des Bewehrungs-Elastizitätsmoduls sowie des Betonalters auf die maximale Elementkrümmung überprüft. Es konnte festgestellt werden, dass das Betonalter nur wenig Einfluss auf die maximale Krümmung hat. Vergleichsweise dazu beeinflusste der gewählte Bewehrungs-Elastizitätsmodul die Krümmbarkeit entscheidend. Der Fokus bei den weiteren Zug- und Biegeversuchen wurde somit auf die Wahl einer den Anforderungen entsprechenden Bewehrung gelegt.

Im Rahmen von zentrischen Zugversuchen an rechteckigen Betonkörpern mit den Abmessungen 100x100mm und einer Länge von 1300mm wurden konventioneller Bewehrungsstahl, vier unterschiedliche Typen von Stahlseilen, zwei Typen von Kunststoffstäben, zwei unterschiedliche Typen von Kunststofffasern sowie Carbon- und Glasfasertextilien als Bewehrung getestet. Bestimmt wurden dabei der Elastizitätsmodul der eingebauten Bewehrung sowie die auftretenden Rissabstände und Rissweiten. Die mit Nirosta-Stahlseilen mit 7x19 Litzen bewehrten Versuchskörper, sowie die mit Carbon- und Glasfasertextilien bewehrten Versuchskörper, zeigten ein sehr gutes Verformungsverhalten und gleichmäßige, verhältnismäßig kleine Rissabstände und Rissweiten.

Im Zuge von weiteren Voruntersuchungen wurde das Biegetragverhalten an rechteckigen Betonplatten mit den Abmessungen 2500x500x50mm an 4-Punkt-Biegeversuchen überprüft. Basierend auf den Ergebnissen der Zugversuche wurden Nirosta-Stahlseile mit 7x19 Litzen und Carbon- und Glasfasertextilien als Bewehrung gewählt. Das Ziel der Vorversuche war festzustellen, wie groß die Krümmung eines Elementes werden kann, bevor ein Versagen der Betondruckzone, ein Versagen der Bewehrung oder ein Verbundversagen auftritt. Die für die Anwendung am besten passende Beton- Bewehrungskombination, die auch im anschließenden Großversuch verwendet wurde, waren Nirosta-Stahlseile mit 5mm Durchmesser und 7x19 Litzen. Diese können einfach eingebaut werden, garantieren eine gleichmäßige Dehnungsaufnahme und ermöglichen große Krümmungen der Betonplatte ohne die Entstehung von großen Rissen.

Zur Ermittlung der Verbundeigenschaften wurden zusätzliche Verbundversuche in Anlehnung an [88] durchgeführt.

Auf Basis des 2012 in [1] beschriebenen Großversuchs an einer 13m Kugelschale und den durchgeführten Vorversuchsreihen, wurde eine Freiformschale mit Grundriss-Abmessungen von 17.6x10.8m und einer Höhe von 2.9m ausgehend von einer Betonplatte mit den Abmessungen 19.5x13m errichtet.

Bei der Formfindung der Freiformschale wurde die Krümmung in den äußeren Bereichen der Struktur ausgehend von einem Ellipsoid zusätzlich erhöht, um diese besser nutzbar zu machen. Die perfekte runde Geometrie wurde anschließend in eine aus 24 einfach gekrümmten Betonelementen bestehende abwickelbare Betonschale vereinfacht. Die Dicke der Betonplatte wurde in Anlehnung an die Vorversuche mit 50mm gewählt. Da eine Platte mit konstanter Dicke durch Aufblasen des Pneus vollflächig angehoben werden würde, wurde die Dicke des Schalenrandes auf einer Breite von 0.5m mit 200mm anstatt mit 50mm als Randbeschwerung gewählt. Die als Bewehrung gewählten Nirosta-Seile mit 5mm Durchmesser und 7x19 Litzen wurden zwischen einem Gegenspann-Stahlring in der Mitte der Struktur und der äußeren Randabschalung gespannt. Nach Betonage der Betonplatte wurden die zur Vermeidung von Relativverschiebungen zwischen den Elementen dienenden Querverschubsicherungen (Stahlprofil U140) sowie die für die Einhaltung der geplanten Planfuge von 30mm dienenden Abstandhalter montiert.

Der Versuch wurde sechs Tage nach Betonage der Betonplatte durchgeführt. Die Betonplatte wurde in zwei Stunden zur geplanten Freiformschale mit einer Geschwindigkeit von 23mm/min im Mittel angehoben. Durch die Vorsehung der Querverschubsicherungen wurden Relativverschiebungen zwischen den Betonelementen vollkommen verhindert.

Anhand des Versuchs konnte gezeigt werden, dass die Errichtung von freigeformten Schalentragwerken mit der neu entwickelten Baumethode möglich ist. Der für das Anheben der Struktur verwendete Hebepneu blieb über den gesamten Transformationsvorgang frei von Leckagen, was die Wahl der verwendeten Folie bestätigte. Die Struktur wurde nach Fertigstellung vermessen. Die Ergebnisse zeigten maximale Abweichungen von 0.25m, damit 2.3% der Gesamtbreite (10.8m) von der geplanten Struktur.

Beispiele für mögliche Anwendungen sind Wildbrücken, Info-Corner, Präsentationspavillons, Ausstellungshallen, Konzertbühne oder Konzerthallen.

Die fertiggestellte Betonschale wurde mit einem Finite-Element-Programm bemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Lasten aus Eigengewicht und Schneelast hauptsächlich durch für die Betonschale günstige Normalkräfte abgetragen werden können und die auftretenden Biegemomente vergleichsweise klein sind.

Zusammenfassend stellt das neue Bauverfahren eine kostengünstige, schnelle Baumethode für freigeformte Betonschalenkonstruktionen zur Verfügung. In den Vorversuchen konnte eine passende Beton-Bewehrungskombination gefunden werden, die sich auch in der praktischen Anwendung auf der Baustelle bewährte. Der erfolgreich durchgeführte Großversuch zeigt, dass das neue Bauverfahren in der Praxis angewandt werden kann und damit Freiformschalen mit geringen Abweichungen von der geplanten Geometrie realisiert werden können.

10 Schlussfolgerungen und Ausblick

10.2 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Arbeit wird aufbauend auf der Idee, ausgehärtete Betonplatten zu Schalen zu verformen [19], ein neuartiges Schalenbauverfahren vorgestellt. Die wesentlichen Vorteile liegen in einer enormen Einsparung im Bereich des Schalungsbaus und einer Verkürzung der Bauzeit.

Wird eine Betonschale mit PFHC entwickelt, kommt es aufgrund des veränderten Bauablaufs zu einer Umverteilung der bauseits durchgeführten Leistungen, die bei der Bauzeitplanung entsprechend berücksichtigt werden müssen. Die Schalungshersteller können dabei den Materialaufwand und die damit verbundenen Transportkosten enorm senken. Demgegenüber steht ein erhöhter Aufwand für die Projektkoordination und die technische Bearbeitung.

Im Unterschied zu den bekannten konventionellen Schalenbauverfahren kann komplett auf die aufwendige Schalungs- und Stützkonstruktion verzichtet werden. Der Aufwand für die komplexe Schalungsplanung, Vermessung, Herstellung, Montage, Demontage und anschließende Entsorgung der einmalig verwendbaren Schalungsteile kann somit eingespart werden. Verglichen mit den bekannten pneumatischen Schalenbauverfahren, bei denen die Form und Steifigkeit der pneumatischen Stützstruktur eine wesentliche Rolle für die herstellbaren Formen spielt, übernehmen bei dieser Herstellungsmethode die pneumatischen Strukturen nur eine sekundäre Funktion. Der Hebe-pneu dient lediglich als abdichtende Folie, die das Anheben der Struktur möglich macht. Die Formgebung und vor allem die Dehnungen des Pneus (Kompensationsproblem [9], [14]) sind dabei unwesentlich. Die Pneuform muss der geplanten Schalenform nur ähnlich sein, da Überlappungen und Falten die dichtende Funktion nicht beeinflussen und auch keine Auswirkungen auf die Endform haben. Die pneumatischen Keile zwischen den Betonelementen haben lediglich eine verbindende Funktion. Sie sind dafür vorgesehen, den freien Raum zwischen zwei Betonplatten zu überbrücken, dadurch die Spannungen im Hebe-pneu zu verringern und den Verformungsprozess zu unterstützen. Da diese während des Verformungsprozesses einfach zusammengedrückt werden, ist auch deren Form, vorausgesetzt der freie Raum wird überbrückt, variabel. Zusammenfassend hat die Form des Hebe-pneus nur sekundären Einfluss auf die Formgebung der hergestellten Betonschale, was die Herstellung einer Vielzahl an freigeformten und auch asymmetrischen Formen möglich macht. Wichtig ist lediglich, dass sich durch ein Zusammenwirken aus dem Druck des Hebe-pneus, dem Druck der pneumatischen Keile und einer sinnvoll eingesetzten Vorspannung am äußeren Umfang der Schale, alle Fugen auf die geplante Breite schließen. Dann kann sichergestellt werden, dass die geplante Form erreicht wird.

Im durchgeführten Großversuch an einer Freiformschale wurde die zusätzliche Applikation einer Spritzbetonschicht mit einer darin eingebetteten Carbon-Bewehrung

durchgeführt. Ob und in welcher Form eine zusätzliche Aufbetonschicht und eine zusätzliche Querbewehrung aufzubringen ist, ist projektspezifisch zu entscheiden. Wichtige Einflüsse sind dabei die spätere Nutzung und die klimatischen Verhältnisse. Neben einer zusätzlichen Spritzbetonschicht kann auch, wie im zweiten Aufsatz [2] beschrieben, eine Fugenbewehrung in die Elemente eingelegt werden. Ist die Schale fertig verkrümmt, müssen nur mehr die Fugen mit Spachtelmasse verfüllt werden.

Um die mögliche Anwendbarkeit des Verfahrens in der Entwurfsphase eines Bauwerkes rasch verifizieren zu können, werden im Rahmen der Arbeit die einzuhaltenden Randbedingungen definiert. Im Speziellen wird auf die mögliche Formgebung, die Einschränkung auf positive Gauß'sche Krümmungen und die baulichen Randbedingungen in Form einer notwendigen ebenen Sauberkeitsschicht eingegangen. Zusätzlich wurde die notwendige Diskretisierung von einer glatten Schale zu einer aus einfach gekrümmten Flächen bestehenden Schale teilautomatisiert, um im Verlauf der Entwurfs- und Detailplanung Zeit einsparen zu können. Die ursprüngliche Nurbs-Geometrie wird in Polygonnetze umgewandelt und in mehreren Optimierungsschritten in eine einfach gekrümmte Anschlussplatte sowie daran anschließende einfach gekrümmte Elemente zerteilt.

Aufgrund der besonderen Anforderungen an bewehrten Beton gute Dehnungseigenschaften aufzuweisen, wird in der Arbeit der Einfluss des Betonalters und der Einfluss unterschiedlicher Bewehrungsarten untersucht. Stahlseile und textile Bewehrung sind in der Lage die großen auftretenden Dehnungen gut aufzunehmen. Der Einfluss des Betonalters sowie der Betongüte stellte sich als sehr gering für diese Anwendung dar.

In den Großversuchen zeigte sich, dass die Genauigkeit der Schalengeometrie direkt von der Genauigkeit der ebenen Betonplatte abhängt. Es ist also besonders auf eine sehr präzise Herstellung und Montage der Abschalung bzw. der Schalungskeile zu achten. Zudem kann die geplante Geometrie nur dann erreicht werden, wenn sich die keilförmigen Fugen während des Umformungsprozesses komplett zu der geplanten Sollfuge schließen.

In der Dissertation werden zwei Großversuche an einer Kugelschale und einer Freiformschale beschrieben, die die theoretischen Ansätze in einer baupraktischen Anwendung verwirklicht zeigen und eine mögliche Anwendbarkeit in der Praxis bestätigen. Die Ergebnisse ermöglichen einen Abgleich mit den Vorversuchen und eine Kalibrierung der in der Praxis angewandten Bemessungs- und Kalkulationsmodelle.

10.3 Ausblick

Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Bauverfahren wird vor Ort geschalt und betoniert. Die gesamte Betonplatte ist somit monolithisch verbunden und kann in nahezu beliebigen Größen hergestellt und nach dem Betonieren ohne weitere Arbeitsschritte verformt werden. Für eine mögliche Weiterentwicklung wird vorgeschlagen, die blütenblattförmigen Betonelemente sowie die Anschlussplatte in einem Fertigteilwerk vorzufertigen und anschließend auf die Baustelle liefern zu lassen. Dies hätte den Vorteil einer höheren Produktionsgenauigkeit der Elemente und als Folge eine Minimierung der Soll-Ist-Abweichungen. Die aufgrund der Mindestdicke der Schalung erforderlichen Planfugen wären ebenfalls nicht mehr erforderlich. Im Innenraum der beiden im Zuge dieser Arbeit hergestellten Betonschalen kann man, da direkt auf den Hebeplattentisch betoniert wird, die Rauigkeit der Folie sowie ein leichtes Faltenmuster an der Betonoberfläche erkennen. Bei Verwendung von Fertigteilen wäre die Betonoberfläche schalglatt. Nachteilig wäre die begrenzte Größe der Bauteile für den Transport. Zusätzlich müssten die einzelnen Elemente kraftschlüssig mit der Anschlussplatte verbunden werden.

Als weiteren möglichen Entwicklungszweig wird vorgeschlagen Ultrahochfesten Faserbewehrten Beton (UHPRFC) für die Herstellung der ebenen Betonplatte, sei es mit Fertigteilen oder in Ortbetonbauweise, zu verwenden. Die Bauteildicke könnte somit nochmals wesentlich verringert werden, was sich positiv auf das Eigengewicht und die Formbarkeit der Platten auswirken würde. Wie in [94], [95] beschrieben, weisen UHPRFC Platten ein sehr gutes Nachbruchverhalten und eine große Anzahl feiner Risse bei Biegebeanspruchung auf. Dieser Umstand könnte es sogar ermöglichen eine konventionelle Bewehrung zu den Stahlfasern komplett wegzulassen, müsste aber zuvor an Biegevorversuchskörpern geprüft werden.

Angedacht ist auch die Verwendung für Schalen als sekundäre Überdachungen, die sehr rasch hergestellt und abgebaut werden können. Dafür wird die Entwicklung eines Mechanismus vorgeschlagen, der die Elemente, vorzugsweise Fertigteile, nach Abschluss des Verkrümmungsprozesses automatisch verriegelt.

Der aktuell nächste Schritt ist, das Verfahren an einem Praxisprojekt anzuwenden und somit ein Referenzprojekt zu schaffen. In Zusammenarbeit mit den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) befindet sich momentan eine Wildbrücke über zwei Eisenbahngleise und zwei Landesstraßen in Planung (ca. 35m Spannweite). Die mit dem Verfahren hergestellte Betonschale dient dabei als verlorene Schalung. Nach Abschluss des Verformungsprozesses werden die Widerlager betoniert, die Bewehrung verlegt und die Aufbetonschicht in mehreren Betonierschritten aufgebracht. Zuletzt werden, wie bereits im Großversuch gezeigt, die beiden Portale ausgeschnitten. Die fertiggestellte Wildüberführung weist trotz der großflächigen Einschnitte eine räumliche Tragwirkung und daher wesentliche statische Vorteile im Vergleich zu den momentan verwendeten Rahmentragwerken auf.

Literatur

- [1] *Kromoser, B., Kollegger, J.*: Herstellung von Schalentragsystemen aus Beton mit der „Pneumatic Wedge Method“ - Ein neues Bauverfahren für den Bau von zweifach gekrümmten Betonflächen. Beton- und Stahlbetonbau 109, Heft 8, S. 557–565, 2014.
- [2] *Kromoser, B., Kollegger, J.*: Application areas for pneumatic forming of hardened concrete. Submitted to the Journal of the International Association for Shell and Spatial structures (IASS). 2014.
- [3] *Kromoser, B., Kollegger, J.*: Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century. Submitted to Structural Concrete (Journal of the fib). 2014.
- [4] *Mehlhorn, G.*: Der Ingenieurbau – Rechenorientierte Baumechanik. Ernst & Sohn, Berlin, 1996.
- [5] *Muttoni, A.*: The Art of Structures. EPFL Press, Lausanne, 2011.
- [6] *Girkmann, K.*: Flächentragwerke. Springer-Verlag, Wien, 1959.
- [7] *Haas, A.M.*: Entwurf und Konstruktion dünner Betonschalen. Werner-Verlag, Düsseldorf, 1969.
- [8] *Kollár, L.*: Schalenkonstruktionen: in Betonkalender 1984, Teil II, S. 515-640, Ernst & Sohn, 1984.
- [9] *Sobek, W., Kobler, M.*: Form und Gestaltung von Betonschalen: in Betonkalender 2007, Ernst & Sohn, 2007.
- [10] *Peurifoy, R.L., Oberlender, G.D.*: Formwork for Concrete Structures, 4th Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.
- [11] *Goldhammer, K.-R., Schmitt, R., Schubert, K.*: Sichtbeton und Schalungstechnik: in Betonkalender 2010, Ernst & Sohn, 2010.
- [12] *Doka GmbH.*: URL: <http://www.doka.com/web/home/index.at.php>. Abrufdatum November 2014.
- [13] *Van Hennik, P.C., Houtman, R.*: Pneumatic Formwork for Irregular Curved Thin Shells: in Textile Composites and Inflatable Structures II. Springer, 2008.
- [14] *Sobek, W.*: Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. Verlag Ursula Sobek, Stuttgart, 1987.
- [15] *Sobek, W.*: Ultraleichtbau. Stahlbau 83, Heft 11, 2014.
- [16] *Kollegger, J.*: Verfahren zur Herstellung von Schalen aus Beton und Eis. Zement und Beton, 1(05), S. 18-22, 2005
- [17] *Preisinger, C., Harrer, J., Ressler, C., Kollegger, J.*: Stahlbetonschalen ohne Schalung – ein neuer Weg im Schalenbau. Beton- und Stahlbetonbau 100, Heft 1, S. 31–38, 2005.

- [18] *Preisinger, C.*: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Umformung ebener in doppelt gekrümmte Flächentragwerke, Dissertation, TU Wien, 2006.
- [19] *Kollegger, J., Preisinger, C.*: Method for the production of double bent shells. European Patent EP 1706553. 2008.
- [20] *Muttoni, A.; Lurati, F.; Ruiz, M.F.*: Concrete shells – towards efficient structures: construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland. *Structural Concrete* 1, Volume 14, 2013, s. 43-50.
- [21] *Peri GmbH.*: URL: <http://www.peri.com>. Abrufdatum November 2014.
- [22] *Klein, D.*: Das neue Mercedes-Benz Museum in Stuttgart – Oder: Von der Zwangsläufigkeit des dreidimensionalen Planens. *Beton- und Stahlbetonbau* 100, Heft 4, 2005.
- [23] *Ehrlinger, S., Helm, M.*: Skulptur mit Seeblick. *Deutsches Ingenieurblatt* 04/07, 2007.
- [24] *Nicholls, R. L.*: Fold and Bond for constructing cement laminate structural shapes, U.S. Pat. Nr. 4,894,270. 1990.
- [25] *Chudoba, R., Van der Woerd, J. D., Schmerl, M., Hegger, J.*: Oricrete: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures. *Advances in Engineering Software*, Elsevier Science Ltd. Oxford, UK, 2013.
- [26] *Van der Woerd, J. D., Chudoba, R., Scholzen, A., Hegger, J.*: Oricrete: Eine Entwurfs- und Herstellungsmethodik für dünnwandige Faltwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen, *Beton- und Stahlbetonbau* 108, Heft 11. 2013.
- [27] *PASCHAL-Werk G. Maier GmbH*: URL: <http://www.paschal.de/deutsch/news/artikel/LOGO-TailorCrete-Betonskulptur-Aarhus.php>. Abrufdatum September 2014.
- [28] *jonek + dressler architekten gbr.*: URL: www.jdarchitekten.de. Abrufdatum September 2014.
- [29] *Joedicke, J.*: Schalenbau – Konstruktion und Gestaltung. Karl Krämer Verlag, Stuttgart, 1962.
- [30] *Polónyi, S.*: Schalen in Beton und Kunststoff – Entwurf, Bemessung, Ausführung. Bauverlag GmbH, 1970.
- [31] *Isler, H.*: Typologie und Technik moderner Schalen. *Werk, Bauen und Wohnen* 38, Nr. 12, s 34-41, 1983.
- [32] *Kollegger, J.*: Construction method for free-formed reinforced concrete shells. in 10 years of progress in shell and spatial structures – 30th Anniversary of IASS (Hg. F. del Pozo und A. de las Casas). Madrid. 1989.
- [33] *Kollegger, J.*: Verfahren zur Herstellung von freigeformten Stahlbetonschalen. *Bauingenieur* 65, S.183-187, 1990.
- [34] *Kollegger, J., Mehlhorn, G.*: Traglastuntersuchungen an einer freigeformten Modellschale aus Stahlbeton. *Bauingenieur* 65, S.257-263, 1990.

- [35] *Heinle, E.; Schlaich, J.*: Kuppeln aller Zeiten – aller Kulturen. Stuttgart: DVA 1996.
- [36] *Ramm, E.; Schunk, E.*: Heinz Isler, Schalen; vdf Hochschulverlag AG. ETH Zürich. 3. Auflage 2002.
- [37] *Schlaich, J., Bergermann, R.*: leicht weit – light structures. Prestel, 2003
- [38] *Schmidt, H.*: Von der Steinkuppel zur Zeiss-Dywidag-Schalenbauweise. Beton- und Stahlbetonbau 100, S. 79-91. 2005.
- [39] *Jerzy, I.*: Die Jahrhunderthalle und das Ausstellungsgelände in Breslau – das Werk Max Bergs. R. Oldenbourg Verlag, München, 2006.
- [40] *Rautner, W.; Ramsberger, J.*: Kuppelbau - ein Benchmark für Fertigteile. Beton-Zement 1, S.36-38; 2006.
- [41] *RSB formwork technology GmbH*: URL: <http://www.rsb.info/produkte>. Abrufdatum November 2014.
- [42] *Nose, T.*: Process of Constructing Culverts of Pipes of Concrete, U.S. Pat. 1,600,353, 1926.
- [43] *Neff, W.*: Building construction, U.S. Pat. 2,270,229, 1941.
- [44] *Head, J.*: No Nails, No Lumber – The Bubble Houses of Wallace Neff. Princeton Architectural Press, New York, 2011.
- [45] *Mathews, C.B. et al.*: Inflatable Core for Use in Casting Hollow Concrete Units, U.S. Pat. 2,485,898, 1949.
- [46] *Mora, R.L.*: Inflatable Construction Panels and Method of Making Same, U.S. Pat. 3,388,509, 1968.
- [47] *Heifetz, H.*: Inflatable Forms, U.S. Pat. 3,643,910, 1972.
- [48] *Bini, D.*: A new pneumatic technique for the construction of thin shells. International Association for Shell Structures, Proceedings from the 1st IASS International Colloquium on Pneumatic Structures, University of Stuttgart, Germany. 1967.
- [49] *Bini, D.*: Concrete Domes. Official Journal of the Masters Builders' Association of New South Wales, Vol. 3, Nr. 7, 1974.
- [50] *Bini, D.*: Building with Air. Butler Tanner and Dennis, UK, 2014.
- [51] *South, D.B.*: Economics and Thin Shell Dome. Concrete International Magazine, Vol. 12, No. 8, 1990.
- [52] *Neighbor, N., South, D.B.*: An evaluation of the monolithic dome construction method for biological containment structures. Journal of the American Biological Safety Association 2(1), s. 39-46, 1997.
- [53] *Nicholls, R.L.*: Air-inflated fabric-reinforced concrete shells. U.S. Pat. 4,446,038, 1984.

- [54] *Schlaich, J., Bergermann, R.*: Pneumatische Schalung, Deutsche Patentanmeldung, DE3500153, 1985.
- [55] *Sobek, W.*: Concrete Shells Constructed on Pneumatic Formwork. in: Shells, Membranes and Space Frames, Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Vol. 1. Osaka, 1986.
- [56] *Schlaich, J., Sobek, W.*: Suitable Shapes. Concrete International, Vol. 8, No. 1, S. 41-45, 1986.
- [57] *Sobek, W.*: Betonschalen und pneumatisch vorgespannte Membranen. Deutsche Bauzeitung 124, Nr. 7, S. 66-74, 1990.
- [58] *Sobek, W.*: Die Herstellung von Betonschalen auf pneumatisch gestützten Schalungen. Bauingenieur 66, S. 545-550, 1991.
- [59] *Sobek, W.*: On Design and Construction of Concrete Shells. Cement 43, Nr. 11, S. 23-27, 1991.
- [60] *Hale, L.E.*: Inflatable form for concrete structures. U.S. Pat. 4,723,751.
- [61] *Veenendaal, D., West, M., Block, Ph.*: History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting, Structural Concrete 12, No. 3, 2011.
- [62] *Binisystems*: URL: <http://www.binisystems.com>. Abrufdatum November 2014.
- [63] *Y.S.M. FOR BUILDING LTD*: URL: <http://ysmforbuilding.com/en/domecrete-domes-building-system>. Abrufdatum November 2014.
- [64] *Monolithic*: URL: <http://www.monolithic.org/topics/domes>. Abrufdatum September 2014.
- [65] *Dome Technology LLC*: URL: <https://www.dometechnology.com>. Abrufdatum November 2014
- [66] *PIRS S.A.S.*: URL: <http://www.domepirs.com/en/welcome>. Abrufdatum November 2014.
- [67] *Concrete Canvas Ltd.*: URL: <http://www.concretecanvas.com>. Abrufdatum November 2014.
- [68] *Brewin, P., Crawford, W.*: Impregnated fabric, European Pat. WO/2007/144559, 2007.
- [69] *Nerdinger, W.*: Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts – Exemplarisch. Prestel, 2002.
- [70] *Sobek, W., Haase, W., Teuffel, P.*: Adaptive Systeme. Stahlbau 69, Heft 7, S. 544-555, 2000.
- [71] *Neuhäuser, S., Weickgenannt, M., Haase, W., Sawodny, O.*: Adaptive Tragwerke – Aktuelle Forschungen im Ultraleichtbau. Stahlbau 82, Heft 6, 2013.
- [72] *Sobek, W.*: Pneu und Schale: Betonschalen und pneumatisch vorgespannte Membranen. Bautechnik, Deutsche Bauzeitung 124, Nr. 7, S.66-74, 1990.

- [73] *Adriaenssens, S., Block, Ph., Veenendaal, D., Williams, Ch.*: Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization. Routledge, 2014.
- [74] *Ramm, E., Bletzinger, K.U., Reitinger, R.*: Shape optimization of shell structures. Journal of the IASS, Vol. 34, No. 2, S. 103-122, 1993.
- [75] *Daoud, F.*: Formoptimierung von Freiformschalen Mathematische Algorithmen und Filtertechniken. Dissertation, TU München, 2005.
- [76] *Firl, M.*: Optimal Shape Design of Shell Structures. Dissertation, TU München, 2010.
- [77] *Tomas, A., Marti, P.*: Shape and size optimization of concrete shells. Engineering Structures 32, S. 1650-1658, 2010.
- [78] *Mele, T.V., Block, Ph.*: A novel Form Finding Method for Fabric Formwork for Concrete Shells. Journal of the IASS, Vol. 52, No. 4, 2011.
- [79] *Tedeschi, A.*: AAD Algorithm-Aided-Design. Parametric strategies using Grasshopper. 2014.
- [80] *Kollegger, J.; Kromoser, B.*: Verfahren zur Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalen (Method for the production of double bent shells). Internationale Patentanmeldung EP2012/073678. Europa. 2012.
- [81] *Frei, O.*: Zugbeanspruchte Konstruktionen. Ullstein Fachverlag, Berlin, 1962.
- [82] *Lewis, W.J.*: Tension Structures – Form and Behaviour. Thomas Telford, London, 2003.
- [83] *Zilch, K., Zehetmaier, G.*: Bemessung im konstruktiven Betonbau. Springer, 2010.
- [84] *ÖNORM EN 1992-1-1 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken.* Österreichisches Normungsinstitut. 2011.
- [85] *ÖNORM B 1992-1-1 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken.* Österreichisches Normungsinstitut. 2011.
- [86] *Dallinger, S.*: Ice Domes- Development of Construction Methods. Dissertation, Technische Universität Wien, 2011.
- [87] *Kromoser, B., Eichwalder, B., Kollegger, J.*: Simulation of large strains in concrete specimen – centric tensile tests using steel ropes as reinforcement. in: EURO-C Proceedings: Computational Modelling of Concrete Structures, S 1067-1072, 2014.
- [88] *Wille, F.*: Charakteristik und Modellbildung des Verbundtragverhaltens von einlagigen Rundlitzenseilen in Beton. PhD-thesis, Technische Universität Cottbus. 2004.
- [89] *C³ - Carbon Concrete Composite e.V.*: URL: <http://carbon-concrete-composite.com>. Abrufdatum Dezember 2014.
- [90] *Curbach, M.*: Verstärken mit Textilbeton: in Betonkalender 2010, Ernst & Sohn, 2010.

- [91] *Lorenz, E., Schütze, E., Schladitz, F., Curbach, M.*: Textilbeton – Grundlegende Untersuchungen im Überblick, Beton- und Stahlbetonbau 108, Vol. 10, S. 711-722, 2013.
- [92] *Hegger, J., Will, N., Curbach, Jesse, F.*: Tragverhalten von textildbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 99, Vol. 6, S. 452-455, 2004.
- [93] *Voss, S.*: Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textildbewehrtem Beton. Dissertation, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2008.
- [94] *Reineck, K.-H., Greiner, S.*: Tests on ultra-high performance fibre reinforced concrete designing hot-water tanks and UHPFRC-shells. Proceedings of the International Symposium on Ultra-High-Performance Concrete, Schriftreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 3, Universität Kassel, S. 361-347, 2004.
- [95] *Heinzle, G., Freytag, B., Lindner, J., Sparowitz, L.*: Rissbildung von biegebeanspruchten Bauteilen aus Ultrahochfestem Faserbeton. Beton- und Stahlbetonbau 104, Heft 9, 2009.

Teil II Publikationen

1 Publikation [1]

Titel	Herstellung von Schalentragwerken aus Beton mit der „Pneumatic Wedge Method“
Autoren:	Benjamin Kromoser, Johann Kollegger
Veröffentlichungstyp:	Aufsatz in Fachzeitschrift
Titel des Mediums:	Beton- und Stahlbetonbau
ISSN:	0005-9900
DOI:	10.1002/best.201400014
Ausgabe:	109. Jahrgang 2014, Heft 8
Seiten:	9 (557-565)
Chefredakteur:	Konrad Bergmeister
Redaktion	Kerstin Glück
Verlag:	Ernst & Sohn
Erscheinungsjahr:	2014
Peer Reviewed:	Ja, impact factor 0,444
Status:	Publiziert

Herstellung von Schalentragwerken aus Beton mit der „Pneumatic Wedge Method“

Ein neues Bauverfahren für den Bau von zweifach gekrümmten Betonflächen mithilfe von pneumatischer Schalung

Der hohe Aufwand für Schalung und Rüstung machte Betonschalen in den letzten Jahrzehnten zunehmend unwirtschaftlicher, bis der Neubau in den 1970er-Jahren annähernd stagnierte. Der vorliegende Beitrag beschreibt ein neu entwickeltes Schalenbauverfahren mithilfe von pneumatischer Schalung. Eine ebene, vollständig ausgehärtete bewehrte Betonplatte wird durch gleichzeitiges Aufblasen und Vorspannen zu einem mehrfach gekrümmten Schalentragwerk verkrümmt. Um die großen Dehnungen in Ringrichtung aufnehmen zu können, werden keilförmige Auslässe aus der Platte ausgespart. Die großen auftretenden Krümmungen in den Querschnitten der einzelnen blütenblattförmigen Betonelemente werden durch die Bewehrung in Form von nichtrostenden Stahlseilen aufgenommen. Nach Abschluss des Verkrümmungsvorgangs werden die Spannritzen an der Verankerung verkeilt und die Baufugen zwischen den einzelnen Elementen verspachtelt. Durch den geringen finanziellen Aufwand für die pneumatische Schalung und die kurze Bauzeit können Kosten und Ressourcen gespart und Schalentragwerke wirtschaftlich hergestellt werden.

1 Einleitung

Schalen aus Stein und Beton zählen seit über 2000 Jahren zu den faszinierendsten Bauwerken der Baugeschichte. Die Gründe dafür liegen in den großen erreichbaren Spannweiten, der Lastabtragung des Eigengewichts in Form von Membrankräften und die dadurch mögliche filigrane Bauweise. Die bekanntesten Bauwerke der vergangenen Jahrtausende sind beispielsweise Steinschalen wie die Peterskirche in Rom sowie die Betonschalen der Jahrhunderthalle in Breslau oder die Zeiss Planetarien in Jena, wie in [1] und [2] beschrieben. Durch die hauptsächlich auftretenden Druckspannungen konnten die eingesetzten Materialien bestmöglich ausgenutzt werden. Mit der Erfindung des Baustoffs Opus Caementitium [3] und in weiterer Folge des modernen Betons konnten Schalen von sehr geringer Dicke hergestellt werden. Trotz der optimalen Ausnutzung des Materials machten die hohen Kosten für die Herstellung der Schalung und Rüstung die Bauweise zunehmend unwirtschaftlicher, bis der Schalenbau in den 1970er-Jahren nahezu stagnierte. Bauten mit rechteckiger Geometrie wurden in Hinsicht auf die architektonische Formensprache und den Aufwand von Material und Arbeitszeit attraktiver. Nach rund 30 Jahren begann im letzten Jahrzehnt das Interesse an freien organischen Formen und somit an einem kostengünstigen Bauverfahren für freigeformte Schalen zu steigen. Mit der Entwicklung der „Pneumatic Wedge Method“ können

Building shell structures out of reinforced concrete using the “Pneumatic Wedge Method”

A new construction method called “Pneumatic Wedge Method” was invented at the Institute for Structural Engineering at Vienna University of Technology. The idea behind this new construction method is to build concrete shells with double curvature originating from an initially plane plate. During the transformation process, the elements of hardened concrete are bent until the final form of the shell structure is reached. The steel ropes (5 mm diameter), used as reinforcement, are able to absorb the occurring strains during the distortion. Pneumatic wedges, mounted between the concrete elements, protect the thin foil used as lifting formwork and regulate the distance of these concrete elements during the transformation process. Additional post-tensioning cables support the shaping process and are locked at the anchor bodies to fix the form of the concrete shell. Finally the joints between the elements are filled with grout.

freigeformte Betonschalen mit positiver GAUSS'scher Krümmung durch den Einsatz von pneumatischer Schalung kostengünstig und ressourcensparend realisiert werden. Die freigeformte Betonform wird bei diesem Verfahren durch eine passende Anzahl von einfach gekrümmten Segmenten angenähert. Dadurch können ausgehend von einer ebenen Betonplatte Rüstung und Schalung für die freigeformte Endform eingespart und die Bauzeit verringert werden.

2 Schalenbauverfahren

Bei der konventionellen Herstellung von Stahlbetonschalen ist das Aufstellen einer aufwendigen Schalungs- und Rüstungskonstruktion notwendig. Das Herstellen dieser behelfsmäßigen Konstruktionen erfordert sehr viel Aufmerksamkeit in der Planung und Berechnung. Da die gesamte Schalung nach Fertigstellung des Bauwerks wieder abgebaut werden muss, ist diese Art der Herstellung unwirtschaftlich, nicht nur in monetärer Hinsicht, sondern auch in Bezug auf den nachhaltigen Einsatz von Material und Ressourcen.

Um die Schalungskosten zu reduzieren, setzte beispielsweise HEINZ ISLER wiederverwendbare Schalungen ein [4]. Eine weitere Möglichkeit, Stahlbetonschalen herzustellen, ist die Verwendung von Fertigteilen. Die einzel-



Bild 1 Thermenanlage Bad Hofgastein, Betonschale aus Fertigteilen
Thermal spring Bad Hofgastein, concrete shell out of prefabricated concrete parts

nen Teile können so bequem in einem Werk hergestellt und anschließend an die Baustelle transportiert werden. Um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen, können die Schalungen mehrmals eingesetzt werden. Ein Beispiel für die Verwendung von Fertigteilen stellt die in Bild 1 gezeigte Erweiterung der Thermenanlage in Bad Hofgastein dar [5]. Es wurde eine 7,45 m hohe Kuppel aus insgesamt 20 Fertigteilen errichtet. Aufgrund von Größe und Gewicht muss bei dieser Herstellungsmethode besonders auf die transport- und versetzungstechnischen Anforderungen Rücksicht genommen werden.

Auch Pneus können zur Herstellung von Schalen verwendet werden [6]. Aufgeblasene gummiartige Membranen werden mit Beton bespritzt. Sobald der Beton erhärtet ist, kann die Membran entfernt werden. Eine aufwendig vor Ort herzustellende Holzschalung entfällt, da das Lufttragwerk werkseitig gefertigt werden kann und auf der Baustelle aufgeblasen werden muss. Problematisch ist die Formgebung des Pneus, da der Luftdruck in Abhängigkeit vom Betonierfortschritt variiert werden muss. Außerdem kann die Formgebung Schwierigkeiten bereiten: Da die Pneus naturgemäß immer runde Formen annehmen, müssen jegliche andere Formen durch Abspannungen erzwungen werden. Um die Form einer pneumatischen Schalung zu verändern, wird in der deutschen Patentanmeldung DE 35 00 153 [7] vorgeschlagen, auf der Oberfläche der pneumatischen Schalung radial verlaufende Seile anzuordnen, die gegen die pneumatische Schalung vorgespannt sind.

Eine Weiterentwicklung der Pneu-Schalung wurde von DANTE BINI entwickelt [1, 6]. Es werden Beton und Bewehrung auf eine ebene zugeschnittene Membran aufgebracht und mit einer weiteren Membran bedeckt. Die untere Membran wird mittels Druckluft aufgeblasen, wodurch sich der Beton zu einer Schale anhebt. Die obere Membran verhindert das Abrutschen des Betons während des Anhebens. Nach dem Erhärten des Betons können die Membranen entfernt werden.

Eine andere Herstellungsmethode kann für Schalen, die nach einer Hängeform gestaltet sind, angewendet werden [8]. In einem rechteckigen Stahlrahmen wird ein Stahlnetz aufgehängt, welches der Schale als Bewehrung dient. An der Unterseite dieser Bewehrung wird ein dünnmaschiges Netz befestigt, welches für den darauf aufgetragenen Beton als verlorene Schalung fungiert. Nach dem Erhärten des Betons muss diese noch hängende Schale lediglich umgedreht werden, um ein fertiges Schalentragsystem zu erhalten.

An der Technischen Universität Wien wurde 2004 erstmalig ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, eine ebene Platte mithilfe einer pneumatischen Schalung zu einer zweifach gekrümmten Schale zu verformen [9 bis 11]. Der vollständig ausgehärtete Beton kann dabei kontrolliert verformt werden. Da der Hebeplan vollständig durch Beton und keilförmige Polystyrolkeile abgedeckt ist, bedarf dieser keiner speziellen Formgebung, was die Verwendung einer einfachen Silofolie ermöglicht. Als problematisch stellte sich die Entfernung der Styroporkeile im Endzustand heraus. Zusätzlich kommt es bei größeren Strukturen zu Stabilitätsproblemen bei den eingebauten Styroporkeilen, womit das Verfahren auf kleinere Strukturen und geringe Krümmungen beschränkt ist.

Aktuell wird, wie auch in [12, 13] beschrieben, an Herstellungsmethoden mithilfe von Faltsystemen geforscht. An der RWTH Aachen wurde ein Konzept entwickelt, schalenförmige Tragstrukturen aus zementbasierten Verbundwerkstoffen in Anlehnung an die japanische Papierfaltkunst Origami herzustellen. Durch die Faltung der Elemente entlang vorgegebener Faltlinien können räumliche Tragstrukturen mit doppelter Krümmung hergestellt werden. Das Konzept zeichnet sich durch geringen Materialverbrauch und hohen Ausnutzungsgrad der verwendeten Werkstoffe aus.

Kürzlich wurde in Chiasso in der Schweiz eine beeindruckende Schalenkonstruktion mit einer Spannweite von 93×52 m in Form eines Ellipsoids, wie in [14] beschrieben, fertiggestellt. Mithilfe von maßgeschneiderten Detaillösungen, wie zum Beispiel einer ringförmigen Vorspannung und der Zugabe von Fasern sowie der Verwendung von Kopfbolzendübeln, konnten die Anforderungen an die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit erfüllt werden. Durch die sehr geringe Dicke der Schale von 100–120 mm konnte vor allem in den oberen und unteren Geschoßen zusätzliche Nutzungsfläche gewonnen und Beton gespart werden. Die Betonschale wurde einerseits in den vertikalen Bereichen mit Spritzbeton und andererseits in den oberen Bereichen im konventionellen Gießverfahren hergestellt.

3 Das Bauprinzip der „Pneumatic Wedge Method“

Diese neu entwickelte Baumethode ermöglicht die Herstellung einer mehrfach gekrümmten Schale aus einer ebenen Ausgangslage. Zu Beginn des Herstellungsvorgangs wird eine kreisrunde Platte aus Beton hergestellt,

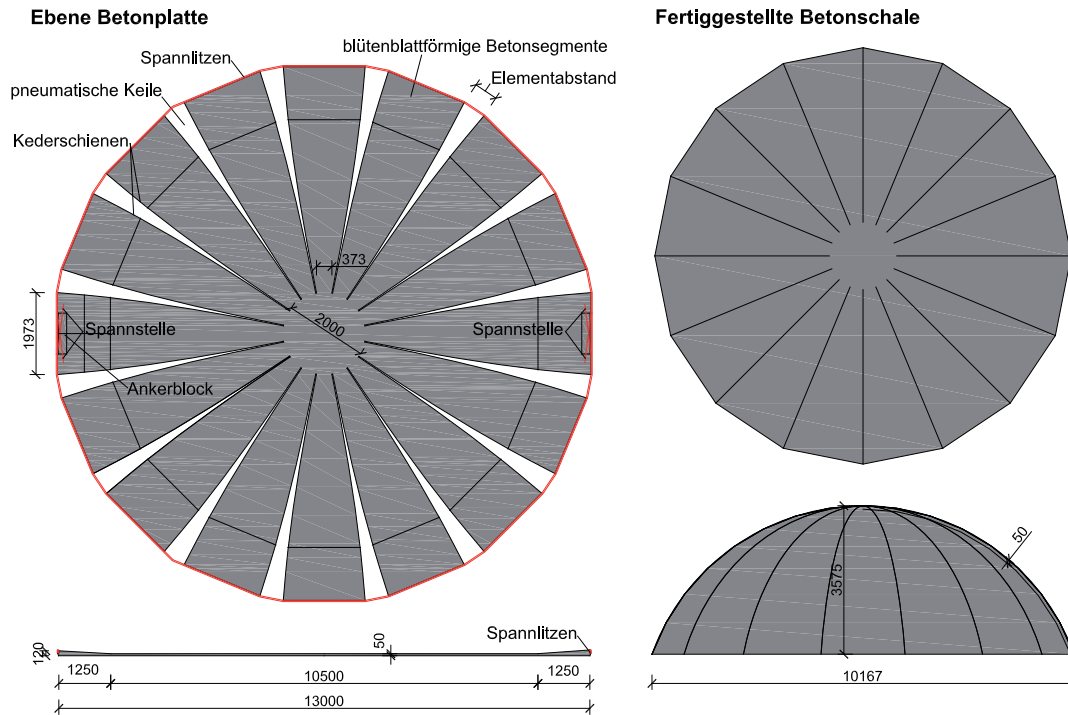


Bild 2 Übersichtsplan Betonschale
Overview concrete shell

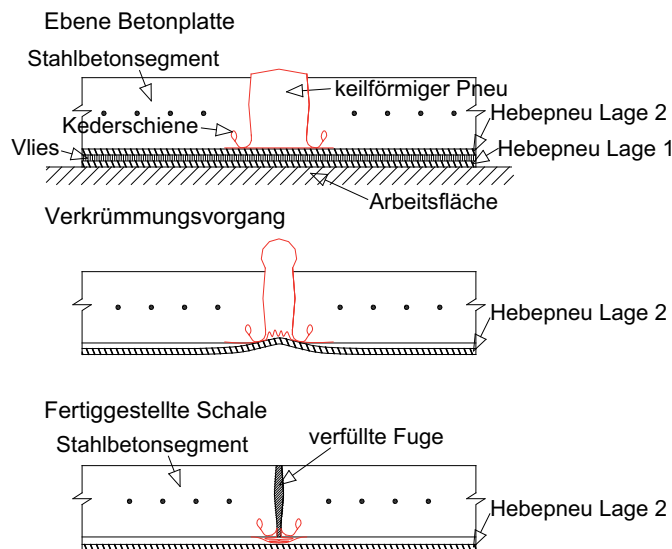


Bild 3 Schnitt durch Pneu und Stahlbetonsegmente
Cross section pneumatic wedge and the reinforced concrete elements

die keilförmige Aussparungen enthält (Bild 2). In diesen keilförmigen Aussparungen sind, wie in Bild 3 dargestellt, keilförmige Pneus mithilfe von Kederschienen montiert, die eine Verbindung zwischen den Betonelementen her-

stellen. Am Umfang der Platte sind Spannglieder ohne Verbund verlegt, die an zwei gegenüberliegenden Spannstellen gespannt werden können. Wenn die Spannung in Ringrichtung zunimmt und gleichzeitig der sich unter der Schale befindende Pneu aufgeblasen wird, werden die keilförmigen Pneus zusammengedrückt und der Umfang der Platte verkleinert sich. Gleichzeitig mit dieser Umfangsverkleinerung wölbt sich die Platte auf und bildet eine zweifach gekrümmte Schale (Bild 4). Da in den pneumatischen Keilen ständiger Überdruck herrscht, besteht während des Umformungsprozesses kein Stabilitätsproblem. Durch die Befestigung mit Kederschienen können diese Pneus nach Fertigstellung der Schale einfach entfernt und gegebenenfalls wiederverwendet werden.

4 Die baupraktische Überprüfung des neuen Schalenbauverfahrens

4.1 Biegeversuche an rechteckigen Betonplatten

Da die einzelnen Betonelemente während des Herstellungsvorgangs sehr stark verkrümmt werden, muss eine Beton-Bewehrungskombination eingesetzt werden, die diese Krümmungen aufnehmen kann. Im Zuge der Voruntersuchungen wurden 4-Punkt-Biegeversuche an un-

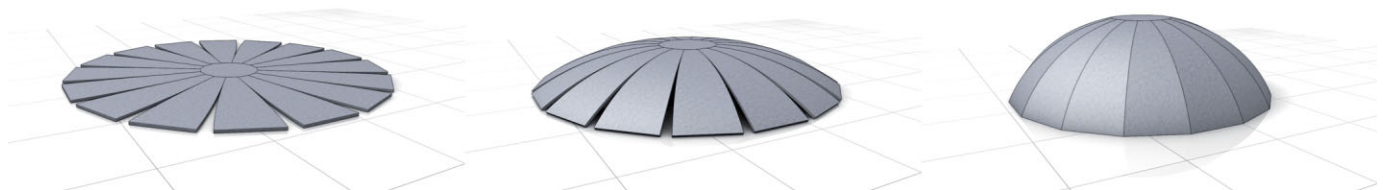


Bild 4 Umformungsprozess von einer ebenen Betonplatte zu einer zweifach gekrümmten Schale
Transformation process from an initially flat plate into a double curved shell

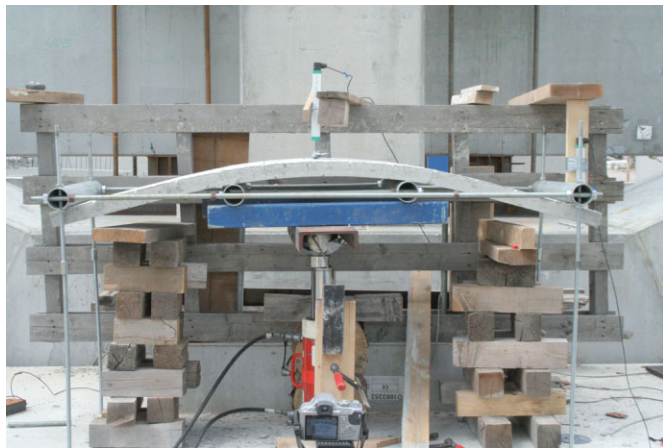


Bild 5 Biegeversuch Betonplatte
Bending tests concrete plate

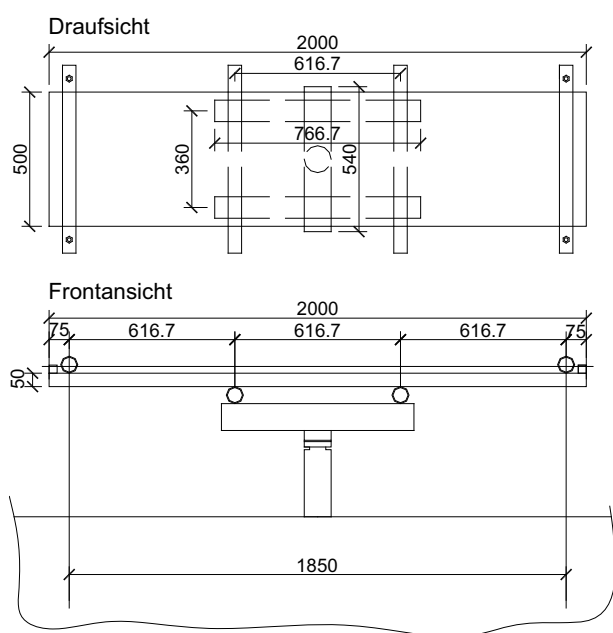


Bild 6 Versuchsaufbau Vorversuche
Experimental setup preliminary tests

terschiedlich bewehrten rechteckigen Betonplatten durchgeführt (Bilder 5 und 6). Getestet wurden insgesamt sechs Platten mit Stahlseil- und Betonstahlbewehrungen sowie unterschiedlichen inneren Hebelsarmen (Tab. 1). Für die Stahlseile wurden Rundlitzenseile mit 7×6 Litzen, Kunststoffseele, einer Zugfestigkeit von 1770 N/mm^2 und einem Durchmesser von 5 mm verwendet. Bei der konventionellen Bewehrung wurden Betonstäbe Bst 550 mit Durchmesser 6 mm gewählt. Die repräsentative Krümmung der Elemente wurde zwischen den beiden mittleren Auflagern bei konstantem Biegemoment bestimmt. Die maximale Durchbiegung wurde einerseits mit drei induktiven Wegaufnehmern (Feldmitte und Außenkante) und andererseits durch analoges Messen mithilfe eines Zahlstabs an sechs unterschiedlichen Messpunkten bestimmt. Die aufgebrachten Lasten wurden mittels Kraftmessdose direkt an der hydraulischen Presse (Feldmitte) bestimmt.

Tab. 1 Maximale Krümmungen der Biegeversuche
Maximal curvatures of the bending tests

Nr.	Bew.	Innerer Hebelsarm [mm]	Abstand Bewehrungsstäbe [mm]	Maximal erreichbare Krümmung [1/m]
1	SS	25	100	0,48
2	SS	25	100	0,47
3	SS	36	100	0,52
4	BS	25	100	0,25
5	BS	36	100	0,24
6	BS	36	120	0,24

SS Stahlseile Durchmesser 5 mm

BS konventioneller Bewehrungsstahl Durchmesser 6 mm

Das Ziel der Vorversuche war es festzustellen, wie groß die Krümmung eines Elements werden kann, bevor ein Versagen der Betondruckzone, ein Versagen der Bewehrung oder ein Verbundversagen auftritt. Aufgrund der gleichmäßigeren Dehnungsaufnahme wiesen die mit Stahlseilen bewehrten Elemente wesentlich höhere Durchbiegungen und somit auch größere Krümmungen auf. Um zu überprüfen, ob die Bruchform der Elemente durch zusätzliche Sollbruchstellen verbessert werden kann, wurden diese nach dem ersten Biegetest an der Zugseite der Elemente eingeschnitten. Die erreichten Durchbiegungen waren in Summe bei den mit Stahlseilen bewehrten Elementen um 100 % höher als bei den konventionell bewehrten Elementen. Der Einfluss der unterschiedlichen Anzahl der Bewehrungsseile beziehungsweise Bewehrungsstäbe und der unterschiedlichen Bewehrungslagen stellte sich im Vergleich dazu als sehr gering dar. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst.

4.2 Der Großversuch zur Herstellung einer Betonschale mit 13 m Durchmesser

4.2.1 Vorbemerkungen

Das neu entwickelte Schalenbauverfahren wurde an einer zweifach gekrümmten Versuchsschale mit einer Bewehrung aus Stahlseilen und einem inneren Hebelsarm von 25 mm erstmals praktisch getestet. Ausgehend von einer ebenen Betonplatte mit einem Durchmesser von 13 m und 50 mm Dicke wurde eine zweifach gekrümmte Kuppelschale mit einer Basisfläche von 10 m und einer Höhe von 3,5 m gebaut (Übersicht vgl. Bild 3). Die Betonplatte wurde am Schalenrand über eine Länge von 1,2 m von 50 mm auf 120 mm angehoben, da eine Umformung mithilfe eines vollflächigen Pneus unter der Betonplatte nur durch höheres Eigengewicht in den Randbereichen der Platte möglich ist.

Die Herausforderungen bei der Anwendung der neuen Schalenbaumethode liegen in erster Linie im Kaltumformungsprozess und der damit verbundenen Optimierung und Regelung der Luftdrücke im Hebeppneu sowie in den einzelnen radial angeordneten pneumatischen Keilen. Für den Hebeppneu wurde eine aus der Landwirtschaft be-

kannte Silofolie gewählt (Tab. 5). Für die pneumatischen Keile wurde eine Polyesterplane verwendet (Tab. 6). Übersteigt der Luftdruck des Hebepneus das Eigengewicht der Struktur, so wird diese angehoben; ist der Druck zu niedrig, kommt es zu keiner Verformung der Betonplatte. Der Luftdruck der pneumatischen Keile muss zwischen dem Druck des Hebepneus als Untergrenze und dem in Versuchen ermittelten Berstdruck von 300 mbar als Obergrenze im eingebauten Zustand gewählt werden. Um ungeplanten Relativverschiebungen der Elemente zueinander entgegenwirken zu können, wurde für die Regelung der pneumatischen Keile auf 16 einzelne digitale Druckproportionalventile, in zwei Ventilinseln zusammengefasst, zurückgegriffen. Der Druck wurde dabei direkt am Anschluss der Pneus mithilfe einer zusätzlichen Messleitung bestimmt, um auf kurzfristige Druckänderungen rascher reagieren zu können. Für die radiale Vorspannung wurden zwei konventionelle Spannritzen (Querschnitt = 150 mm²) verwendet, die mithilfe von vier Monolitzenpressen an zwei Spannstellen (vgl. Bild 6) vorgespannt werden.

4.2.2 Die Herstellung der ebenen Betonplatte

Die Herstellung der Betonplatte umfasste folgende Arbeitsschritte:

1. Erstellung eines ebenen Unterbauplanums mithilfe eines Deckenschalungssystems:
Für die Herstellung einer Schale mit der „Pneumatic Wedge Method“ ist ein ebenes Unterbauplanum erforderlich. Im Zuge des Großversuchs wurde entschieden, dafür großflächige Deckenschaltische zu verwenden (Bild 7).
2. Herstellen der keilförmigen Schalungselemente sowie der Randabschalung:
Die keilförmigen Aussparungen der Betonplatte wurden mithilfe einer speziell gefertigten Abschalung hergestellt. Die Randabschalung diente zusätzlich als Widerlager für die vorgespannten Stahlseile und wurde daher stärker ausgeführt.
3. Auflegen der als „Hebepneu“ dienenden Silofolie:
Um ein Verkleben während der Betonage zu verhindern, wurde zwischen den beiden Folienlagen eine Lage Vlies eingebracht.
4. Auflegen der keilförmigen Pneus mit bereits eingefädelt Keterschienen:
Um die pneumatischen Keile im Beton zu verankern, wurde ein ursprünglich für das Spannen von Membranen angewandtes System mithilfe von Keder und Aluminiumketerschienen verwendet. Der Keder wurde mit der Kederfahne am pneumatischen Keil angenäht und die Keterschiene in der Schalung positioniert und anschließend einbetoniert.
5. Positionieren der Schalungselemente auf der aufgelegten Siloplane und den keilförmigen Pneus (Bild 7):
Zur Abschalung der Betonelemente wurden die Schalungselemente auf den Siloplanen und pneumatischen Keilen positioniert und verschraubt.

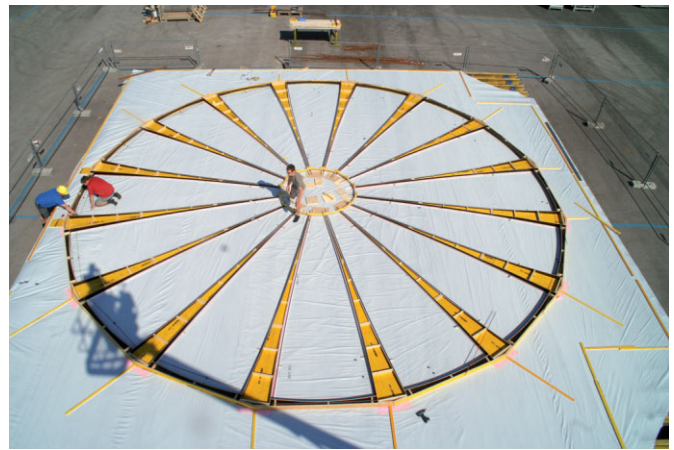


Bild 7 Schalung für die ebene Betonplatte
Formwork for the flat concrete plate



Bild 8 Schalung mit der fertig eingebauten Bewehrung
Formwork with the ready mounted reinforcement

6. Verlegen und Vorspannen der Bewehrungsstahlseile (Bild 8):
Die als Bewehrung verwendeten Stahlseile mit einem Durchmesser von 5 mm wurden zwischen einem Gegenspannring in der Mitte und der ringförmigen Abschalung am Außenrand eingebaut und mit 1 kN vorgespannt. Die Materialeigenschaften der Stahlseile sind in Tab. 4 dargestellt.
7. Verlegen der Querbewehrung (Bild 8):
Als konstruktive Bewehrung wurden in Umfangsrichtung, normal zu der Stahlseilbewehrung, konventionelle Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 6 mm im Abstand von 150 mm eingebaut.
8. Betonage der ebenen Betonplatte (Bild 9):
Nach Fertigstellung der Schalungs- und Bewehrungsarbeiten wurde die Platte betoniert und gerüttelt. Es wurde dabei besonders darauf geachtet, die als Pneu dienende Folie beim Betoniervorgang nicht zu beschädigen. Für die Herstellung wurde ein Beton C25/30 mit einem Ausbreitmaß von F38 gewählt. Zusätzlich wurde die Erhärtung verzögert, um genügend Zeit zum Eindringen der Sollbruchstellen zu haben. Die



Bild 9 Fertig betonierete Platte mit den eingedrückten Sollbruchstellen
Ready casted concrete plate with the predetermined breaking lines

Frisch- und Festbetoneigenschaften sind in Tab. 2 und Tab. 3 dargestellt.

9. Eindrücken der Sollbruchstellen (Bild 9):
Wie in den Vorversuchen (in Abschn. 4.1) beschrieben, erwiesen sich Sollbruchstellen in Form von Fugen mit geringer Tiefe als vorteilhaft für die Gleichmäßigkeit der Verkrümmung der Elemente. Diese wurden mithilfe von Stahlblechen (Dicke = 3 mm) mit angepasster Länge in 5 mm tief den Frischbeton eingedrückt.

4.2.3 Materialparameter

Die Tab. 2 bis 6 zeigen die Materialparameter.

4.2.4 Versuchsdurchführung

Nach einer Wartezeit von drei Monaten wurde die Verkrümmung der ebenen Betonplatte zu einer zweifach gekrümmten Schale durchgeführt. Für den Hebeprozess lieferten zwei Seitenkanalverdichter ausreichend Luftvolumenstrom, um die Struktur zu verformen. Der Druck wurde zwischen 10 und 18 mbar variiert. Die notwendige Druckluft zum Füllen der keilförmigen Pneus stellte ein Kompressor zur Verfügung. Zur Abdichtung des „Hebepneus“ wurde die unter der Betonplatte verlegte Silofolie in einem Abstand von 400 mm zur Betonkante abgeschnitten, aufgeklappt und anschließend durch das Anspannen der Spannlitzen abgedichtet. Die Betonplatte wurde mithilfe des „Hebepneus“ in Plattenmitte bis zu einer Höhe von 0,9 m angehoben.

Anschließend wurde dieser Prozess durch zusätzliches Vorspannen der beiden in Umfangrichtung verlegten Spannlitzen unterstützt, die Schale wurde bis zur geplanten Höhe von rund 3,5 m angehoben und verkrümmt. Um einem ungleichmäßigen Verkrümmen der einzelnen Elemente entgegenzuwirken, wurde der Druck der pneu-

Tab. 2 Frischbetoneigenschaften
Properties of the fresh concrete

Sand 0/4	1 106 kg/m ³
Split 4/8	732 kg/m ³
Zement	270 kg/m ³
Wasser	216 kg/m ³
Fließmittel	80 kg/m ³

Tab. 3 Festbetoneigenschaften (Mittelwerte)
Properties of the hardened concrete (mean values)

Würfeldruckfestigkeit	50,3 N/mm ²
Festbetonrohddichte	2 397 kg/m ³

Tab. 4 Materialparameter Stahlseile
Material properties steel ropes

Durchmesser	5 mm
Anzahl Drähte	6 × 7
Zugfestigkeit	1 770 N/mm ²
Bruchlast	14,8 kN
Gewicht	0,1 kg/m
E-Modul, Erstbelastung	41 000 N/mm ²

Tab. 5 Materialparameter Silofolie (Hebepneu)
Material properties silo foil (pneumatic lifting formwork)

Material	PE-LD
Dicke	110 µm
Durchstoßfestigkeit	500 g
Reißfestigkeit längs	23 N/mm ²
Reißfestigkeit quer	21 N/mm ²
Reißdehnung längs	580 %
Reißdehnung quer	680 %

Tab. 6 Materialparameter Complan Plane (pneumatische Keile)
Material properties Complan Foil (used for the pneumatic wedges)

Material	Polyestergarn
Garnfeinheit	1 100 dtex
Bindung	L 1:1
Flächengewicht	670 g/m ²
Höchstzugkraft	3 000 N/50 mm
Haftung	110 N/50 mm

matischen Keile zwischen 30 und 150 mbar variiert. Die Spannlitzen wurden anfangs mit 8,7 kN je Presse und in weiterer Folge mit 20 kN gespannt und nach Abschluss des Verkrümmungsvorgangs an den Ankerblöcken verkeilt. Abschließend wurden die Fugen zwischen den Elementen mit Sika Fast-Fix 4 Mörtel verspachtelt und die gesamte Schale mit Avenarius Planfix RZ geglättet.

4.2.5 Versuchsergebnisse

Der erfolgreich abgeschlossene Großversuch zeigt (Bild 10 und 14), dass das neue Bauverfahren funktioniert. Durch eine Steigerung des Volumenstroms der Seitenkanalverdichter während des Hebeprozesses konnten die auftretenden Leckagen in der Silofolie kompensiert werden. Die Plattenverdickung im Randbereich verhinderte durch die ebenfalls ansteigende Biegesteifigkeit eine durchgehend homogene Krümmung der Schale. Die an einen Kugelabschnitt angenäherte Geometrie wies somit in den Randbereichen eine geringere Krümmung und damit eine Abflachung auf. Dieser Effekt wurde durch den geometrischen Anstieg der Plattendicke zusätzlich verstärkt. In Bild 11 wird die gemittelte Form aller Elemente mit der Form eines Kreisbogens verglichen. Bild 12 zeigt den Verlauf der Abstände zwischen den Betonelementen (vgl. Bild 3), gemessen an der Außenkante, bei 30 %, 60 % und 90 % Baufortschritt. Mit zunehmender Krümmung berührten sich die Elemente im oberen Bereich der Schale während des Verformungsprozesses. Durch diesen Kontakt wurden die Abstände der Elemente zueinander mit zunehmender Verkrümmung der Platte wieder gleichmäßiger (Bild 12). Die maximalen Abweichungen von der Kugelform betrugen im Randbereich der Schale 72 mm und im Mittel 17 mm. Gemessen wurde an der Oberfläche der Schale an zehn Stützstellen im Abstand von 0,5 m. Gegen Ende des Verformungsprozesses kam es zu geringfügigen Relativverschiebungen der jeweiligen Elemente zueinander.

5 Bemessung

Um für weitere zweifach gekrümmte Schalenformen eine Vorhersage für eine mögliche Endform treffen zu können, wurde der Verkrümmungsprozess mithilfe des in Bild 13 dargestellten Finite-Elemente-Modells nachgerechnet. Das Anheben und Verformen der dünnen Betonplatte musste unter Beachtung des Verhältnisses von Eigengewicht, zusätzlicher Randlast (Randverdickung) und den durch den Hebeplan von unten einwirkenden Luftdruck durchgeführt werden. Die Plattendicke wurde konstant 50 mm dick und mit einem linearen Anstieg auf 120 mm innerhalb der äußeren 1,2 m gewählt. Es wurde ein Beton der Festigkeitsklasse C25/30 verwendet. Um die verminderte Steifigkeit des gerissenen Betons zu berücksichtigen, wurde der E-Modul mit 1124 N/mm^2 an die Ergebnisse der Vorversuche (vgl. Abschn. 4.1) angepasst. Der Luftdruck im Hebeplan wurde mit 14 mbar gewählt. Wie in Bild 13 dargestellt, kommt es in der Berechnung am verformten System, wie bereits im Großversuch gemessen, zu einer Abflachung im Randbereich der Struktur. Die maximale berechnete Schalenhöhe beläuft sich auf 3,06 m. Wird die Steifigkeit der Elemente anhand von Vorversuchen (vgl. Abschn. 4.1) kalibriert, kann der Verformungsprozess realistisch durch eine Finite-Elemente-Berechnung simuliert werden. Für die Bemessung im Bauendzustand wurde die fertiggestellte Schalenkonstruktion ebenfalls mit einem Finite-Elemente-Programm



Bild 10 Fertiggestellte Schale im Innenbereich
Finished shell structure interior view

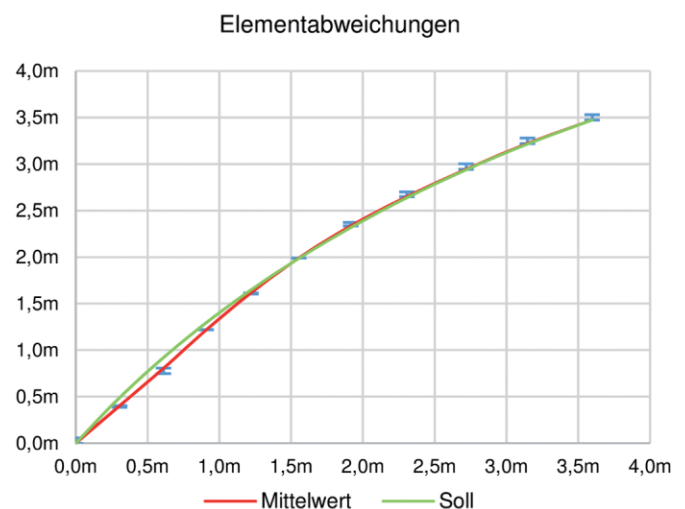


Bild 11 Die Elementabweichungen im Mittel über alle 16 Segmente (rote Linie) und die maximale Streuung (blaue kurze Linien) verglichen mit einem Kreisbogen
The average deviation over all 16 segments (red line) and the maximal deviation (short blue lines) in comparison to an arc of a circle

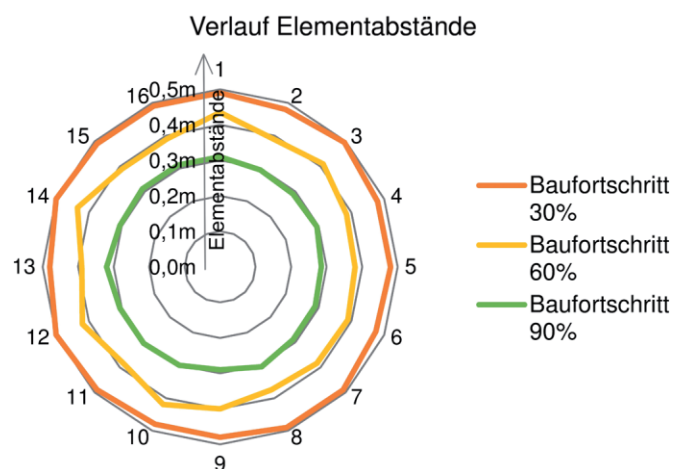


Bild 12 Der Verlauf der Elementabstände an der Außenkante der Schale während des Transformationsprozesses
The trend of the distance between the concrete elements at the outer circle

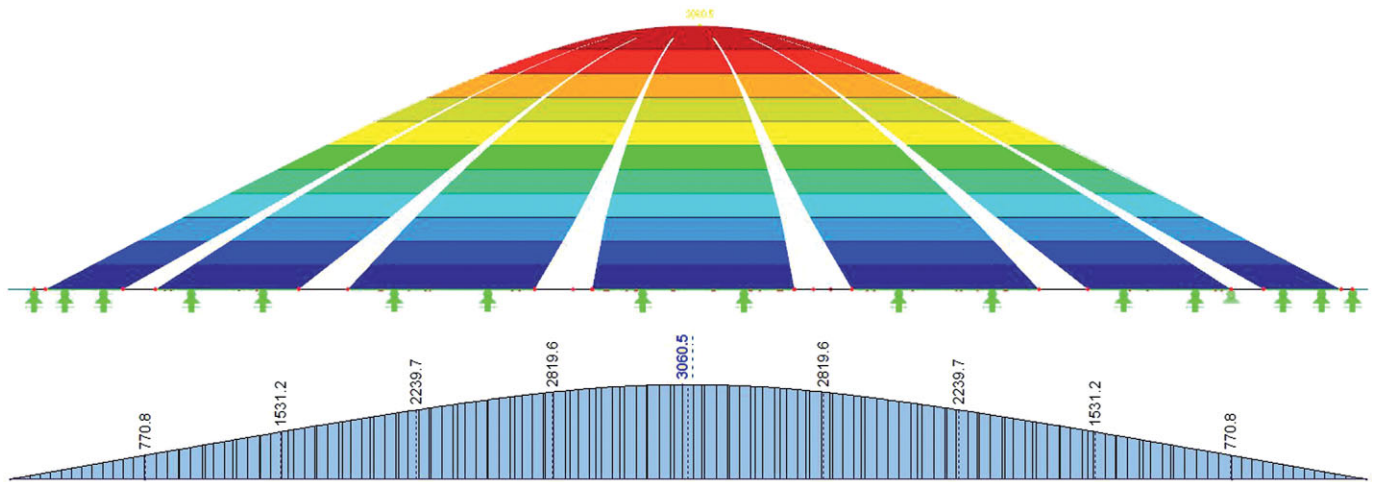


Bild 13 Belastung und Verformungen beim Umformungsprozess
Load and deformation during the transformation process



Bild 14 Außenansicht der fertiggestellten Schale
Exterior view of the finished shell structure

modelliert und nachgerechnet. Die Konstruktion wurde ebenfalls mit einer konstanten Dicke von 50 mm und einer Betonfestigkeit von C25/30 angenommen. Als Schneelast wurde eine Flächenlast von $p_{ed} = 1,5 \text{ kN/m}^2$ angesetzt. Da bei flächigen Betonbauteilen keine Verzerungen in der Platten- beziehungsweise Schalenebene möglich sind, muss eine mit der „Pneumatic Wedge Method“ hergestellte Schale von einer freigeformten Fläche in mehrere einfach gekrümmte Flächen diskretisiert werden. Die Abweichungen von der ursprünglich freigeformten Geometrie hängen dabei von der Krümmung der Ausgangsfläche sowie der gewählten Anzahl der Teilflächen ab. Für den Großversuch wurde entschieden, den Kugelschnitt in 16 Segmente zu unterteilen. Die dadurch auftretenden Momente belaufen sich auf maximal 0,4 kNm und sind in Bild 15b dargestellt. Die Lasten wer-

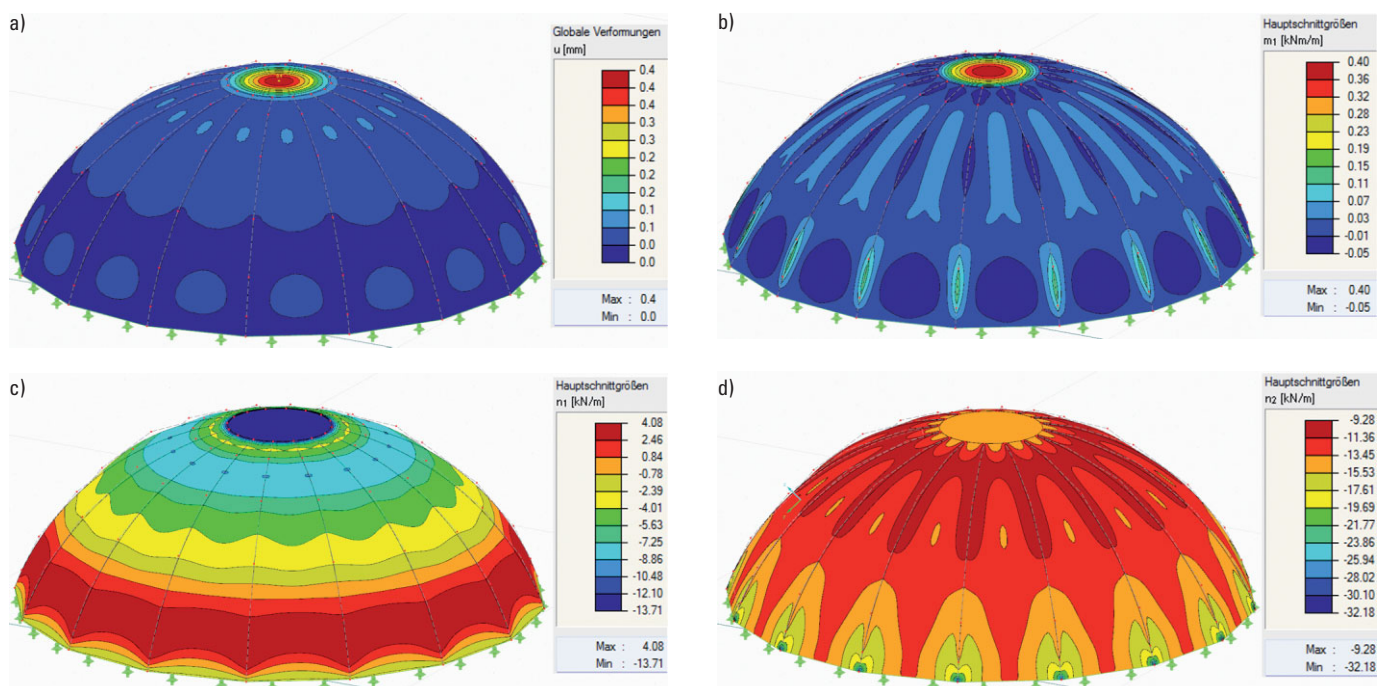


Bild 15 Durchbiegung und Schnittgrößen unter Eigengewicht und einer zusätzlichen Vertikal-Design-Flächenlast von $1,5 \text{ kN/m}^2$ (Schnee)
Deflection (a) and internal forces M1 (b), N1 (c) and N2 (d) under self-weight and an additional vertical-design-load of $1,5 \text{ kN/m}^2$ (snow)

den großteils in Form von Normalkräften in Ring- und Meridianrichtung (Bilder 15c und 15 d) abgetragen. Aufgrund des sich einstellenden Membranspannungszustands bleiben die in Bild 15a dargestellten Verformungen mit maximal 0,4 mm sehr gering.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag konnte gezeigt werden, dass die „Pneumatic Wedge Method“ eine wirtschaftliche Alternative zu den konventionellen Schalenbauverfahren darstellt, mit der Material und Arbeitszeit gespart werden können. Durch den Einsatz von pneumatischen Keilen anstatt der in [2] beschriebenen Styroporkeile konnten die Stabilitätsprobleme gelöst und die Begrenzung auf kleine Segmentkrümmungen und geringe Spannweiten aufgehoben werden. Die Vorversuche haben gezeigt, dass die als Bewehrung verwendeten Stahlseile den Anforderungen einer guten Krümmbarkeit, guten Verbundeigenschaften und einer hohen Bruchdehnung gerecht werden können. Anhand des bereits durchgeführten Großversuchs wurde gezeigt, dass das Verfahren auch bauprak-

tisch umsetzbar ist. Schalen stellen nach wie vor wirtschaftliche Tragwerke dar, mit denen große Spannweiten mit geringem Materialaufwand realisiert werden können. Eine mögliche Erweiterung für die Anwendung ist eine Aufbetonschicht aus Spritzbeton in die eine zusätzliche fugenübergreifende Bewehrung eingebracht werden kann. Die neue Baumethode soll zeitgemäße Entwürfe für zweifach gekrümmte Tragwerke umsetzbar machen und die Entwicklung, Schalen wieder vermehrt in der Praxis einzusetzen, unterstützen.

Dank

Die Versuche wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Freiformflächen aus Beton“ in Zusammenarbeit mit der Österreichischen Bautechnikvereinigung durchgeführt. Der besondere Dank der Autoren gilt der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und allen Projektpartnern (Doka, ÖBB, Asfinag, Strabag, Porr, Alpine, Bilfinger, Habau, Swietelsky, Holcim, Lafarge, Wopfinger, Sika, and Festo) für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] HEINLE, E.; SCHLAICH, J.: *Kuppeln aller Zeiten – aller Kulturen*. Stuttgart: DVA, 1996.
- [2] SCHMIDT, H.: *Von der Steinkuppel zur Zeiss-Dywidag-Schalenbauweise*. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 1, S. 79–91.
- [3] VITRUV: *Zehn Bücher über Architektur. Übersetzt und mit Anmerkungen versehen von Fensterbusch C.* Darmstadt, Wiss. Buchgemeinschaft, 1981, S. 95–99.
- [4] RAMM, E.; SCHUNK, E.: *Heinz Isler, Schalen*. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich, 3. Auflage 2002.
- [5] RAUTNER, W.; RAMSBERGER, J.: *Kuppelbau – ein Benchmark für Fertigteile*. Beton-Zement 2006, Heft 1, S. 36–38.
- [6] FREI, O.: *Pneu und Knochen*. In: IL35, Mitteilung des Instituts für leichte Flächentragwerke Universität Stuttgart, 1995.
- [7] SCHLAICH, J.; BERGERMANN, R.: *Pneumatische Schalung*. DE 3500153. Deutsche Patentanmeldung 1985.
- [8] KOLLEGGGER, J.: *Construction method for free-formed reinforced concrete shells*. In: 10 years of progress in shell and spatial structures – 30 anniversary of IASS (Hg. F. del Pozo und A. de las Casas), Madrid, 1989.
- [9] KOLLEGGGER, J.; PREISINGER, C.: *Method for the production of double – bent shells*. European Patent EP 1706553. 2008.
- [10] PREISINGER, C.; HARRER J.; RESSL C.; KOLLEGGGER J.: *Stahlbetonschalen ohne Schalung – ein neuer Weg im Schalenbau*. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 1, S. 31–38.
- [11] BURTSCHER, S.; DALLINGER, S.; AMBRO, S. Z.; KOLLEGGGER J.: *Fügen von glasfaserbewehrten Betonplatten und Betonschalen durch Vorspannung*. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 2, S. 85–92.
- [12] CHUDоба, R.; VAN DER WOERD, J. D.; SCHMERL, M.; HEGGER, J.: *Oricrete: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures*. Advances in Engineering Software, Elsevier Science Ltd. Oxford, UK, 2013.
- [13] VAN DER WOERD, J. D.; CHUDоба, R.; SCHOLZEN, A.; HEGGER, J.: *Oricrete: Eine Entwurfs- und Herstellungsmethodik für dünnwandige Faltwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen*. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 11, S. 774–782.
- [14] MUTTONI, A.; LURATI, F.; RUIZ, M. F.: *Concrete shells – towards efficient structures: construction of an ellipsoidal concrete shell in Sitzerland*. Structural Concrete 1, Volume 14, March 2013, S. 43–50.

Autoren



Dipl.-Ing. Benjamin Kromoser
benjamin.kromoser@tuwien.ac.at



Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger
johann.kollegger@tuwien.ac.at

TU Wien
Institut für Tragkonstruktionen
Forschungsbereich für Stahlbeton- und Massivbau
Karlsplatz 13
1040 Wien

2 Publikation [2]

Titel:	Application Areas for Pneumatic Forming of Hardened Concrete
Autoren:	Benjamin Kromoser, Johann Kollegger
Veröffentlichungstyp:	Aufsatz in Fachzeitschrift
Titel des Mediums:	Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)
ISSN:	1028-365X
Ausgabe:	--
Seiten:	11
Herausgeber:	Sergio Pellegrino
Verlag:	International Association for Shell and Spatial Structures
Druck:	SODEGRAF
Erscheinungsjahr:	-
Peer Reviewed:	Ja, impact factor 0,457
Status:	Eingereicht, angenommen

APPLICATION AREAS FOR PNEUMATIC FORMING OF HARDENED CONCRETE

BENJAMIN KROMOSER ¹, JOHANN KOLLEGGER ²

¹ Vienna University of Technology, Institute for Structural Engineering, Karlsplatz 13, E212-2,
Email: benjamin.kromoser@tuwien.ac.at

² Vienna University of Technology, Institute for Structural Engineering, Karlsplatz 13, E212-2,
Email: johann.kollegger@tuwien.ac.at

Editor's Note: This space reserved for the Editor to give such information as date of receipt of manuscript, date of receipt of revisions (if any), and date of acceptance of paper. In addition, a statement about possible written discussion is appended.

DOI: Digital Object Identifier to be provided by Editor when assigned upon publication

ABSTRACT

Doubly curved concrete shell structures are strong, material saving structures that can be built with very large diameters. State-of-the-art construction methods for these structures require high labor input. Therefore, such structures will rarely be built unless labor-saving construction methods are developed. A new construction method called the "Pneumatic Forming of Hardened Concrete" has been invented at the Institute for Structural Engineering at the Vienna University of Technology. The idea behind this new construction method is to build concrete shells with double curvature starting from an initially flat plate. During the transformation process, the concrete plate is lifted, and the elements are bent with the aid of a pneumatic formwork until the required curvature is reached. A large-scale experiment on a concrete shell with a 13 m diameter showed the practical applicability of the new construction method. Due to the use of a pneumatic formwork the proposed building method is limited in its applicable range. This paper provides an overview of the production process and defines the boundary conditions for the shell design, focusing on analytically describable and free-form surfaces.

Keywords: free-form shell structure, pneumatic formwork, concrete shell structures, construction methods, Gaussian curvature

1. INTRODUCTION

Numerous impressive and well-known ancient buildings are shells. Cupolas like St Peter's Basilica and the Pantheon in Rome or the Jahrhunderthalle in Breslau as well as the Zeiss Planetarium in Jena span very large areas without requiring any columns, thereby making efficient use of the structural material [1], [2]. The applied loads induce mainly normal forces in the shell, which leads to a very uniform and efficient distribution of the stresses in the entire structure [3]. The costs for formwork and framework have made these fascinating structures less and less economical to build. Thus, the construction of shells decreased over the years, and hardly any shells have been built in the last 30 years. Recently, architects and engineers have started to integrate free-form concrete surfaces in their building designs once again [6], [7]. The Pneumatic

Wedge Method presents a new way to build doubly curved shells in an economical as well as labor- and resource-effective manner.

2. CONSTRUCTION PRINCIPLE OF PNEUMATIC FORMING OF HARDENED CONCRETE

Forming structural shells from flat plates avoids the need for scaffolding and formwork. During the transformation process, the plate is lifted and distorted with the aid of a pneumatic formwork and two post-tensioned tendons attached to the perimeter of the plate. Orthotropic plates that exhibit high flexibility in one direction and high compressive strength in the other direction are best suited for transformation into doubly curved shells.

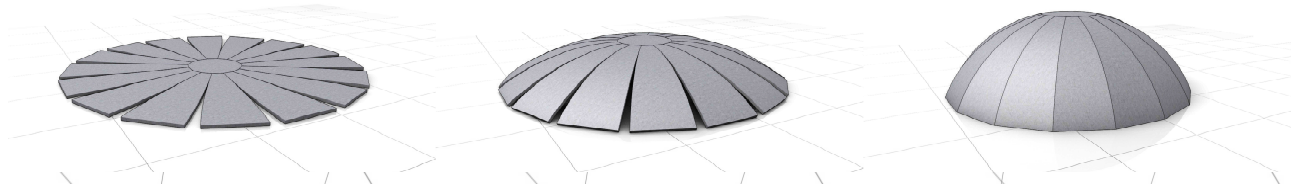


Figure 1: Transformation process from an initially flat plate into a doubly curved shell

Since concrete is a stiff material, wedge-shaped gaps in the flat plate are required to allow the plate to assume the desired shape (Figure 1).

A pneumatic structure consisting of thin foil is used as the lifting formwork. The stresses σ in the membrane are linearly related to the radius of curvature r , the thickness of the foil t , and the internal pressure p_1 of the pneumatic structure:

$$\sigma = \frac{p_1 * r}{2 * t} \quad (1)$$

Figure 2 shows the relation between the tension in the foil and the radius of curvature for different pressures in the pneumatic formwork. The two red lines mark the breaking strengths of foils with low (4kN/m) and high breaking strength (15kN/m), respectively. To avoid high stresses in the foil, and to support the lifted structure, it is necessary to use a pneumatic formwork that extends over the entire surface of the plate.

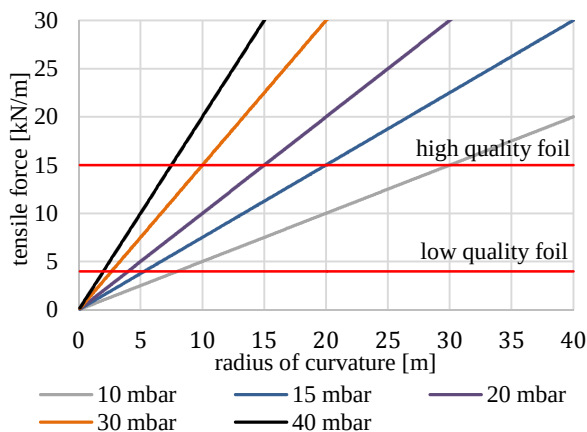


Figure 2: Relation between the tension in the foil of the pneumatic formwork and the radius of curvature for different air pressures p_1

In the area of the gaps, the membrane stresses due to large radii of curvature and high internal pressure of the pneumatic structure would exceed the membrane strength. Therefore, pneumatic wedges with smaller curvatures are mounted between the wedge-shaped gaps (Figure 3) to reduce the occurring stresses. A digital steering system is used to control the pressure p_2 in each pneumatic wedge. This way, the distance between the “petals” of the concrete slab can be controlled and uniform movement can be ensured.

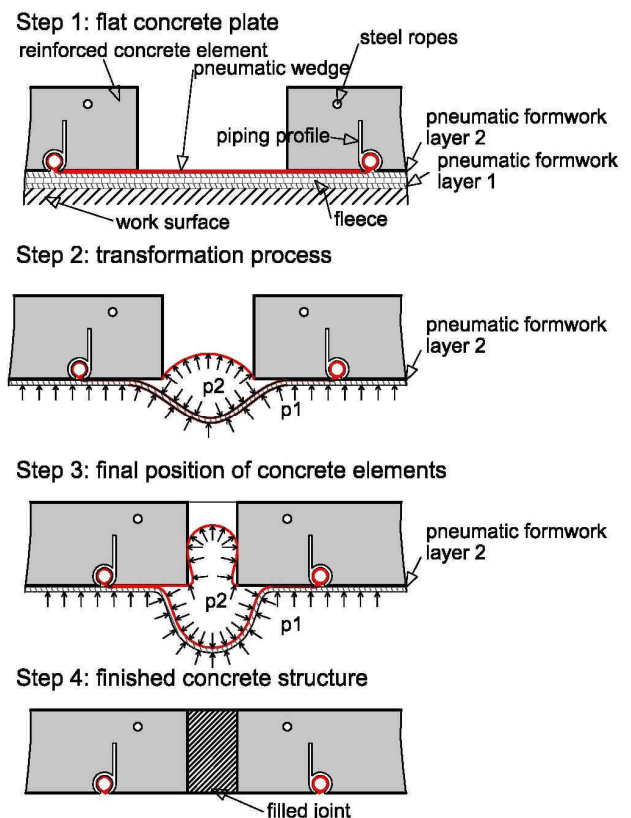


Figure 3: Cross section of the pneumatic wedge and the reinforced concrete segments during erection

The curvature of the pneumatic wedges is constant due to the constant internal pressure p_2 . At the beginning of the transformation process, the pneumatic wedges are flat (uninflated). When they are filled with air to reach pressure p_2 , they naturally assume a circular shape (in cross section), thereby inducing tensile forces between the concrete segments (step 2 in Figure 3). As the transformation process continues, the concrete segments move toward each other until the designed joint width is reached. At the same time the pneumatic wedges are compressed, and thus their curvature increases. The tensile forces between the concrete elements, caused by inflation of the pneumatic wedges, decrease and are replaced by compressive forces during the transformation process (step 3 in Figure 3).

3. SHAPES OF PNEUMATICALLY-FORMED CONCRETE STRUCTURES

This new building method could be used for a range of doubly curved surfaces. In this paper, the boundary conditions for the design of pneumatically-formed concrete structures using Pneumatic Forming of Hardened Concrete are defined. Because concrete is not very flexible, it is generally possible to bend large reinforced concrete plates in one direction only, provided that the used concrete and the reinforcement are able to accommodate the occurring strains. Hence, developable surfaces have to be used. The challenge in the design of these surfaces is to produce non-overlapping representations consisting of connected singly curved segments. Developable surfaces have the great advantage that they can easily be manufactured using a stiff material [4]. The entire perimeter of the final structure needs to touch the ground; otherwise an auxiliary construction has to be used to cover the gaps in the surface to avoid high stresses in the pneumatic formwork. To unfold a shape with a positive Gaussian curvature, wedge-shaped gaps have to be introduced (see for example Fig. 4)

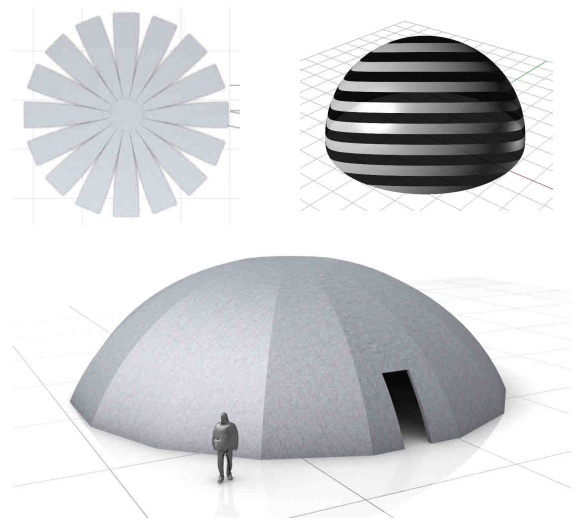


Figure 4: Shell in the shape of a spherical segment

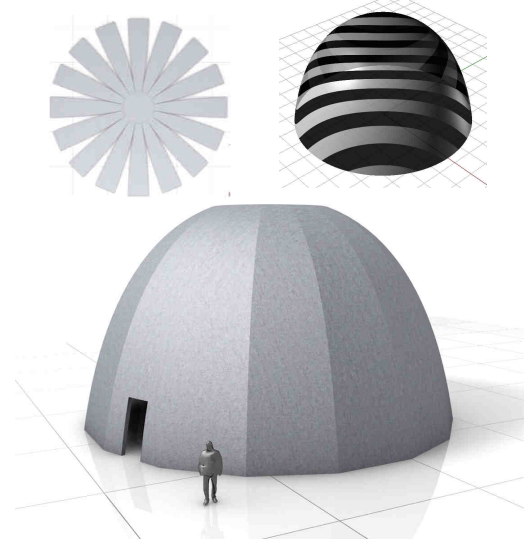


Figure 5: Shell in the shape of a half-paraboloid (rotation axis normal to the base plate)

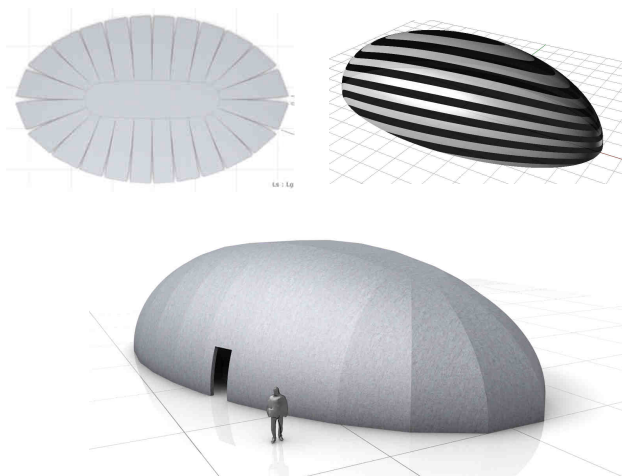


Figure 6: Shell in the shape of a half-ellipsoid (rotation axis parallel to the base plate)

Unfolding a structure with a negative Gaussian curvature, such as a hyperbolic vertex, causes problems, because segments of the unfolded shape overlap. Therefore, only structures with a positive Gaussian curvature can be built. To apply the new building method, the boundary conditions mentioned above have to be observed. The free-form surface has to be discretized, and suitable dimensions for the singly curved elements have to be chosen. In the following subsection the feasibility of analytically describable shapes and possible free-form surfaces for this construction method will be discussed.

3.1. Analytically Describable Surfaces

If Pneumatic Forming of Hardened Concrete is used to build shells with analytically describable surfaces, three different types of shapes can be used. The first type covers shapes for which the rotation axis is normal to the base plate of the construction. The big advantage of these shapes is that all wedge-shaped gaps required for construction are the same. Therefore, the formwork can be produced economically. The second type represents shapes for which the rotation axis is parallel to the base plate of the structure. Because these shapes are doubly symmetric, the dimensions of the wedge-shaped gaps are different, although they repeat in each quarter of the structure. Therefore, the effort required to construct the formwork for the gaps increases with respect to structures of type 1. The third type of shapes is defined by a rotation axis that intersects with the base plate at an angle unequal to 90 degrees in both the x and y directions. Consequently, all wedge-shaped gaps are different from each other. Hence, the number of buildable shapes of type 3 structures is large. Figure 4, Figure 5, and Figure 6 show examples of shells with analytically describable surfaces. Additionally, the initially flat concrete plate is depicted, as well as the curvature of the structure. An abrupt change in curvature is shown as a sharp bend in the zebra-type stripes, and continuously changing curvature is shown as curved stripes. Furthermore, the differences in size and shape of the wedge-shaped gaps can be seen in the flat plates. Summarizing, the most important analytically describable forms are:

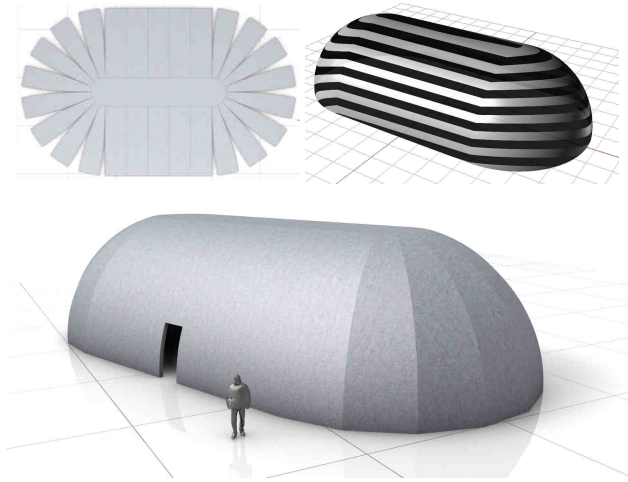


Figure 7: Shell in the shape of a half-cylinder combined with two spherical segments

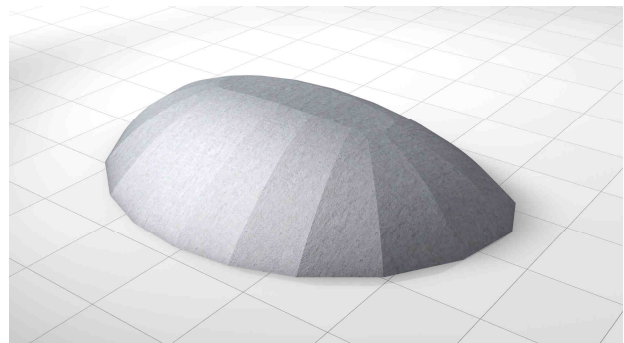


Figure 8: Variation of the base line of the shell

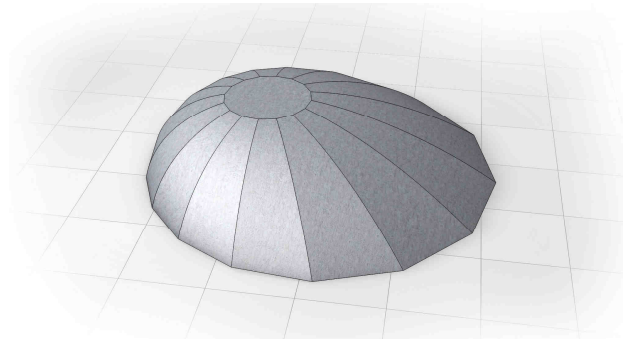


Figure 9: Modified shell with translation of the vertex

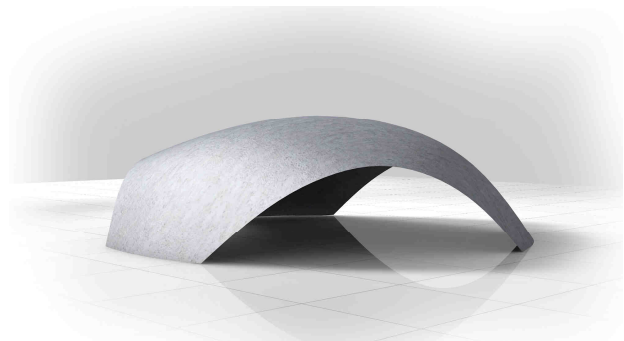


Figure 10: Modified shell with cutouts

1. Sphere

$$(x_1 - a)^2 + (x_2 - b)^2 + (x_3 - c)^2 = r^2 \quad (2)$$

2. Paraboloid

$$\frac{x_1^2}{a^2} \pm \frac{x_2^2}{b^2} - 2z = 1 \quad (3)$$

3. Ellipsoid

$$\frac{x_1^2}{a^2} + \frac{x_2^2}{b^2} + \frac{x_3^2}{c^2} = 1 \quad (4)$$

To increase the variety of buildable analytically describable surfaces, structures combining the surfaces mentioned above can be designed. Figure 7, for example, shows the combination of a half-cylinder and a spherical segment. One of the disadvantages of combining different forms is that an abrupt change in curvature as shown in Figure 7 results in stress peaks in the finished structure.

3.2. Free-form surfaces

Using state-of-the-art design and calculation software, it is possible to build free-form surfaces with the new construction method. Considering the boundary conditions defined in section 3, the shape types mentioned in subsection 3.1 can be modified to obtain new types of structures. Possible modifications are the variation of the base line as shown in Figure 8 or a translation of the vertex of the structure (Figure 9). Figure 12 shows a free-form concrete shell designed from scratch, which maximizes the amount of usable floor space. The confining curves shown in Figure 11 have higher curvatures at the edges and lower curvatures at the vertex of the structure, so that more floor space with adequate room height is available in the interior. Figure 13 shows the discretization of the shape into a structure consisting of singly curved elements, and Figure 14 shows the initially flat plate.

3.3. Post-processing

To increase the field of application for this method, parts of the structure can be removed or cutouts can be made in the fully assembled concrete shell (Figure 10).

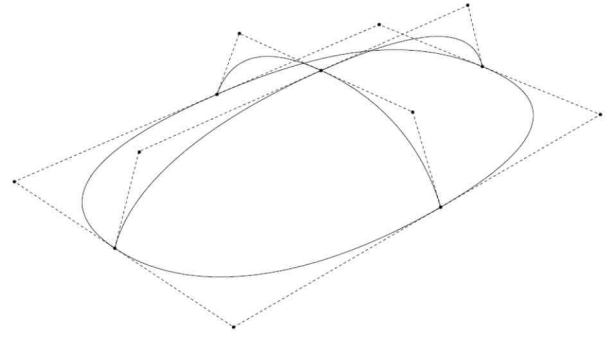


Figure 11: Confining design curves

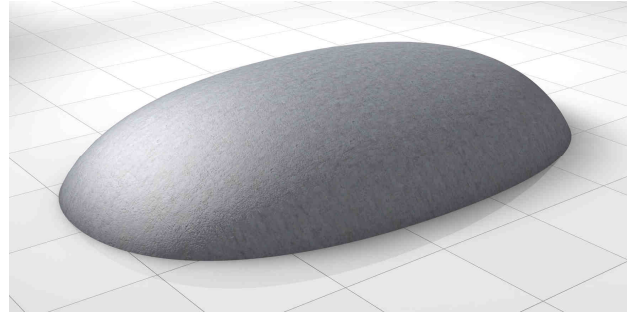


Figure 12: Free-form shell structure designed from scratch

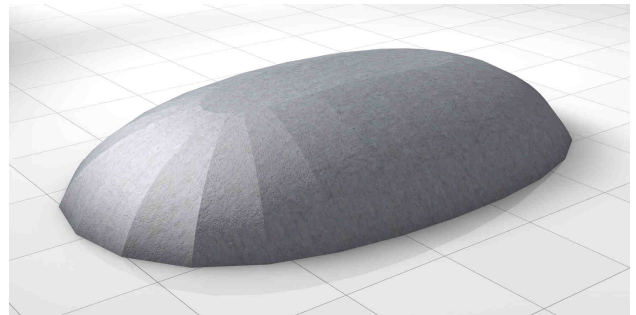


Figure 13: Simplified shell structure consisting of singly curved segments



Figure 14: Initially flat concrete plate

4. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

4.1. Large-scale experiment

In November 2012, a prototype of a concrete shell with a 13m span was built in Amstetten, Austria, to test the Pneumatic Wedge Method. The concrete shell, with a height of 3.29m and a diameter of 10.81m, was erected from a flat circular plate with a thickness of 50mm and a diameter of 13m.

Fabrication of the flat concrete plate

The erection of the concrete shell was carried out in different steps. Initially, it was necessary to create a flat work surface for the following steps. Two layers of thin foil (110 μ m) with a fleece layer in between, serving as the lifting formwork, were placed onto the work surface. The pneumatic wedges, used to reduce the stresses in the foil during the transformation process, were placed on the two layers of foil before the wooden formwork for the plate and for the wedges were mounted. 1200m of 5mm steel rope, used as radial reinforcement, were fixed like spokes in a wheel to a steel ring in the middle of the plate and to the outside of the formwork ring at an average distance of 100mm. Conventional reinforcing 6mm steel bars, serving as structural reinforcement, were attached to the steel ropes in the tangential direction at distances of 150mm. Finally, the concrete was poured. To be able to carry out the subsequent forming process, the thickness of the flat concrete plate varied from 50mm at the center to 120mm at the perimeter of the plate.

Testing procedure

After three months of curing, the flat concrete plate was transformed into the finished shell structure within eight hours. First, the pneumatic wedges were filled with air using a compressor. Then the foil, serving as pneumatic formwork, was inflated, thereby deforming the initially flat concrete plate. Additionally, post-tensioning tendons, mounted at the perimeter of the concrete plate, were tightened with four hydraulic jacks. After the shell had reached its final shape, the post-tensioning tendons were fixed in place. Finally, the joints between the concrete segments were filled with grout.

4.2. Small-scale model of a free-form shell

The construction of a spherical shell in the large-scale experiment showed that the construction



Figure 15: Initially flat concrete plate



Figure 16: Finished shell structure



Figure 17: Internal view of the finished shell structure



Figure 18: Free-form shell (scale 1:10)

method can be used for doubly symmetric surfaces with a circular footprint. The next step was to build a free-form shell structure with a scale of 1:10. To provide a realistic combination of self-weight, thickness, and stiffness, the structure of the large-scale experiment was used for the model. 12mm thick plywood was chosen as the construction material. To achieve the desired relationship between self-weight and modulus of elasticity, which reflected that of the large-scale structure, cuts were made in the surface of the boards. The required distance and depth of the cuts were determined with additional tests. The results indicated that the behavior of boards with 10mm deep surface cuts spaced at 30mm would reflect that of the large-scale experiment at a smaller scale. To avoid relative transverse displacement between the individual singly curved elements, rails were mounted on the initially flat plates (black lines in Figure 18). A 5mm steel rope was used to simulate the tendons at the perimeter. A pneumatic formwork was used to lift the structure. The small-scale experiment showed that it is possible to build a variation of the spherical shape used in the large-scale element.

5. STATIC ANALYSIS OF THE LIFTING PROCESS

The erection of the structure with the aid of a pneumatic formwork can be divided into three different steps (Figure 19):

1. Compensation of the self-weight of the concrete structure with the aid of the pneumatic formwork
2. Distortion of the structure with the aid of the pneumatic formwork
3. Distortion of the structure with the aid of the post-tensioning tendons

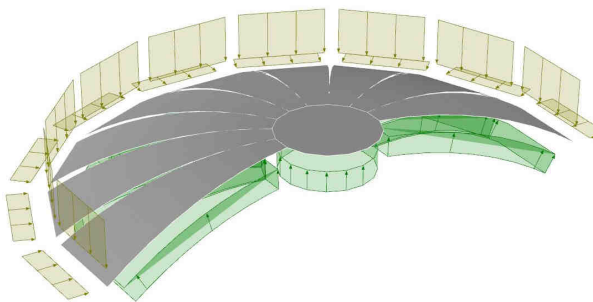


Figure 19: Loads during the transformation process

Initially, the pneumatic formwork is inflated until the self-weight of the structure is compensated. In a second load step the air pressure is increased to induce a bending moment and distort the concrete plate. An additional concrete layer at the perimeter of the structure is used to prevent the entire structure from lifting off the ground. Structures with constant stiffness (i.e. constant slab thickness and constant reinforcement ratio) as well as constant curvature, such as the spherical shell shown in Figure 20, can easily be distorted without additional post-tensioning in the tangential direction. If a structure with non-uniform curvature is chosen, additional post-tensioning during the transformation process is required. The curvature of the free-form shell described in subsection 3.2 and shown in Figure 21, for example, exhibits a decreasing curvature from the edges to the vertex. The gaps between the parts of the concrete elements with smaller curvatures close more slowly. To ensure that the finished structure assumes the designed form, all wedge-shaped gaps must close. The post-tensioning strands support the transformation and ensure that the final shape is attained.

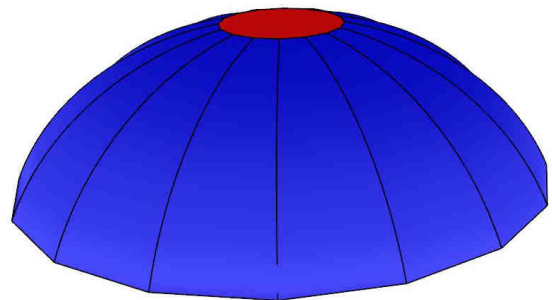


Figure 20: Curvature distribution of a spherical shell

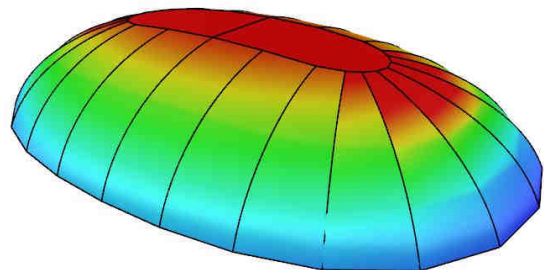


Figure 21: Curvature distribution of a free-form shell

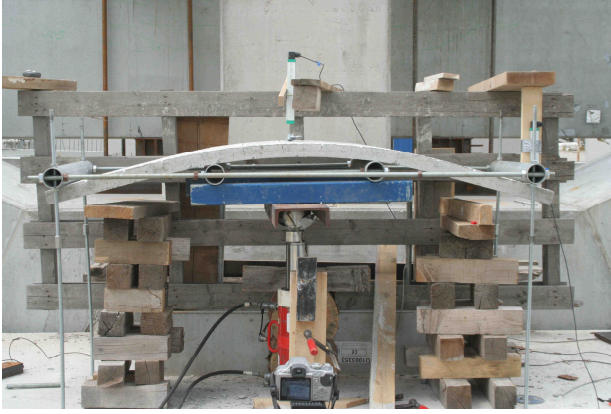


Figure 22: Bending test setup

5.1. Curvature of the concrete elements

To determine the bending behavior, the maximum attainable curvature, the cracking behavior, and the uniformity of the curvature of the concrete plates, four-point bending tests (Figure 22) were carried out [5]. Six concrete specimens with dimensions 2000x500x50mm (Figure 22) were tested. 5mm steel ropes and conventional 6mm reinforcing bars were used to carry the occurring tensile forces during the bending process. The reinforcement was placed at different vertical positions in the specimen so as to test specimens with different internal lever arms. The specimens reinforced with steel ropes attained double curvatures of 0.24-0.25 1/m, compared to the values of 0.48-0.52 1/m for the specimens reinforced with conventional steel rods.

Physically, the curvature can be calculated using the correlation between the compressive strain of the concrete ε_c , the strain of the steel rope ε_s and the effective depth d :

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} \quad (5)$$

In the experiments maximum strains of 0.0038 in the concrete and 0.015 in the reinforcement were measured. Figure 23 shows the attainable radius of curvature depending on the effective depth of the different concrete plates.

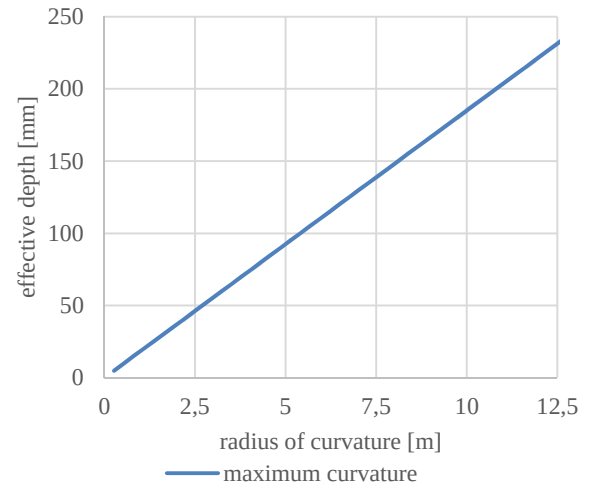


Figure 23: Correlation between the effective depth and the attainable radius of curvature

To determine the maximum attainable curvature, the compressive strain of concrete was assumed to be 0.0035 and the strain of the steel ropes was assumed to be 0.015. The reinforcement ratio ρ influences the correlation between the resisting bending moment and the effective depth of the concrete elements (see Figure 24). Generally speaking, larger forces are required to distort thicker concrete plates. The reinforcement ratio can also be used to control the forces required in the transformation process.

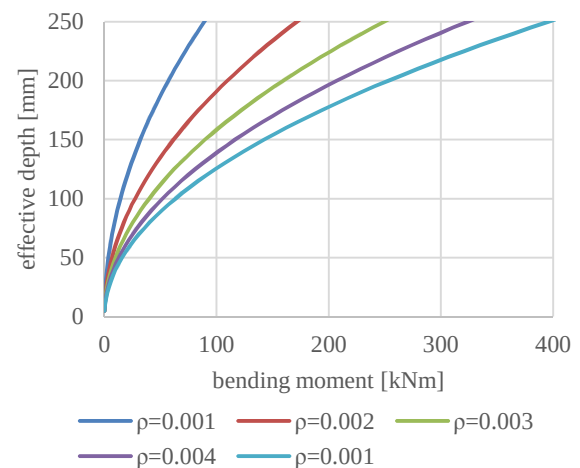


Figure 24: Correlation between the bending moment and the effective depth of concrete plates

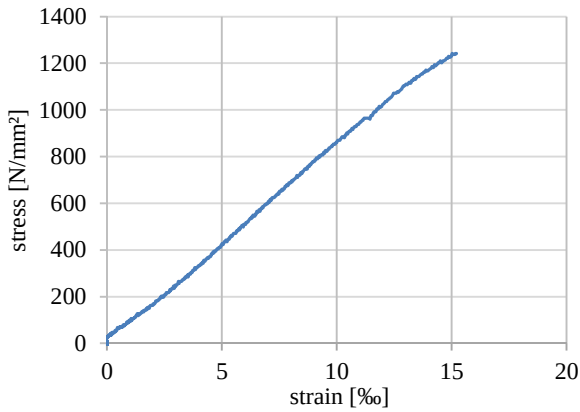


Figure 25: Stress-strain curve of the steel ropes

5.2. Material behavior

Using steel ropes as reinforcement has the advantage that their material behavior is linear elastic (Figure 25). Consequently, the force-deflection relationship of the concrete element at mid-span also shows nearly linear behavior in the stabilized cracking stage (Figure 26), indicating that the stiffness of the segments remain constant throughout the deformation process.

6. STATIC ANALYSIS OF SHELLS CONSTRUCTABLE WITH THE PNEUMATIC WEDGE METHOD

To activate the advantageous load-bearing behavior of a shell, it is necessary to connect the single segments to form a monolithic concrete structure. Depending on the intended usage of and the loads on the finished structure, two different solutions for connecting the elements were developed:

1. Specially designed joints with textile reinforcement
2. Additional reinforced concrete layer using sprayed concrete

6.1. Tension joints

As the thickness of the initially flat concrete plate is the same as the thickness of the finished shell, it is sufficient to fill the designed joints with grout, as was shown in the large-scale experiment (Figure 16). A specially designed joint using textile reinforcement is capable of withstanding the occurring tensile forces

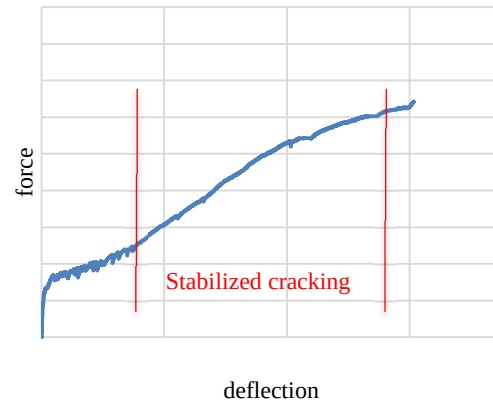


Figure 26: Force-deflection curve bending test

between the elements. The textiles are placed on the formwork before the concrete is cast. The joint is filled with grout after the transformation is finished (Figure 28).

Experimental investigation

The construction of a joint designed to withstand the tensile forces in the ring direction was tested. Figure 28 shows a test specimen, which has a concrete thickness of 50mm. Textile reinforcement was used in order to provide tensile strength across the joint. The length of the tested joint was 500mm, the overlap length of the textiles was 100mm, and the anchorage length was 150mm. The joint without any grout is shown in Figure 29, and Figure 30 shows the same joint filled with grout. Figure 27 shows the force-displacement curve of the tested joint. The relative displacement between the faces of the concrete elements (original distance 115mm) was measured. It can be seen that the textile reinforcement transmits the forces occurring in the structure with very low displacements.

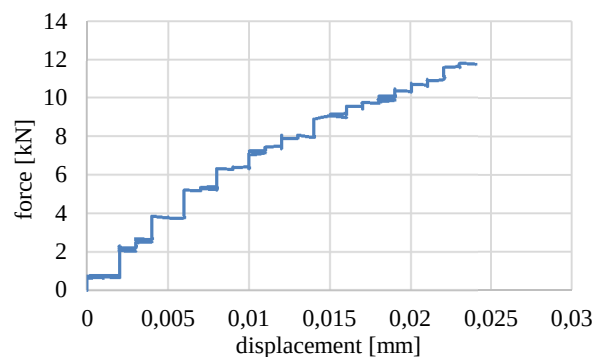
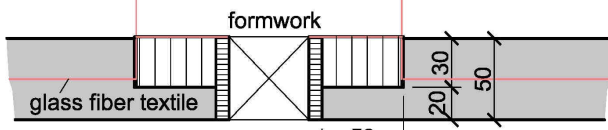
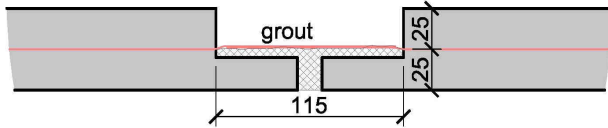


Figure 27: Force-displacement curve of a representative tension joint test

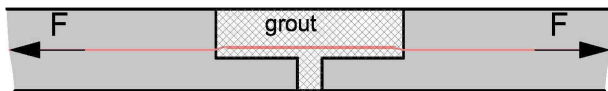
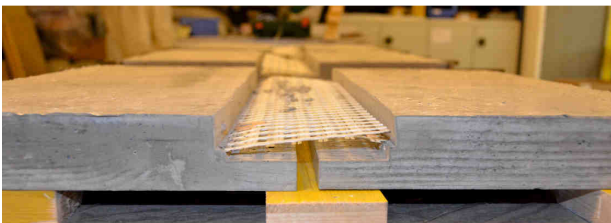
Step 1: production of concrete elements



Step 2: arrangement of the textiles in the half filled joint



Step 3: ready filled joint

**Figure 28:** Cross section of test specimen**Figure 29:** Joint with textile reinforcement**Figure 30:** Grouted joint

6.2. Additional concrete layer

For thicker shells it is required to add an additional concrete layer to the outside of the structure and to use the original shell as lost formwork. The static behavior is improved due to the monolithic connection of the concrete segments and the increased load-bearing resistance of the thicker cross-section with additional reinforcement in the ring direction. An additional concrete layer further seals the surface and thus improves serviceability. The required thickness of the additional layer and the reinforcement ratio have to be determined with static calculations for every project.

**Figure 31:** Viaduct for wildlife**Figure 32:** Information booth

7. APPLICATION AREAS OF SHELLS BUILT WITH PFHC

Considering the boundary conditions mentioned previously, PFHC could be used to build a wide range of free-form shell structures. The possibilities range from viaducts for wildlife (Figure 31) to info booths (Figure 32) and concert shells (Figure 33). At a larger scale it would also be possible to build sports stadia (Figure 34).

8. CONCLUSIONS

At a time when resources are scarce and we look to nature for structural templates, we are looking forward to building thin concrete shells that make optimal use of the utilized materials. Doubly curved and free-form shells are strong and material-saving structures, which can span exceptionally large areas without requiring any columns. While conventional slab-on-beam structures can be built with a span-to-effective-depth ratio of 8 to 25, the same ratio is much higher for shells (up to 400).



Figure 33: Concert shell



Figure 34: Sports stadium

In this paper it is shown that PFHC is an economical as well as material- and resource-saving alternative to conventional building methods. With this construction method it is possible to build a large variety of differently shaped shells. However, the shells can currently only be built from singly curved elements, and the attainable shapes are limited to free forms with positive Gaussian curvature.

ACKNOWLEDGEMENT

The test series were performed in collaboration with the Austrian Society for Construction Technology and conducted as part of the research project “Free-form concrete”.

The financial support of all project partners (doka, ÖBB, Asfinag, Strabag, Porr, Alpine, Bilfinger, Habau, Swietelsky, Holcim, Lafarge, Wopfinger, Sika, and Festo) and the Austrian Research Promotion Agency (FFG) is gratefully acknowledged.

REFERENCES

1. **Heinle, E., Schlaich, J.**, Kuppeln aller Zeiten – aller Kulturen, Stuttgart: DVA, 1996.
2. **Schmidt, H.**, Von der Steinkuppel zur Zeiss-Dywidag-Schalenbauweise, *Beton- und Stahlbetonbau*, No.100, 2005, p. 79-91.
3. **Billington, D.P.**, Thin shell concrete structures, McGraw-Hill Book Company, 1965.
4. **Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M., and Kilian, A.**, Architectural Geometry, Bentley Institute Press, 2007.
5. **Sohm, M.**, Entwurf von geeigneten Schalenformen für die “Pneumatic wedge method” *Diplomarbeit. TU Wien*. 2014
6. **Van der Woerd, J.D., Chudoba, R., Scholzen, A., Hegger, J.**: ORICRETE: Eine Entwurfs- und Herstellungsmethodik für dünnwandige Faltwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen, *Beton- und Stahlbetonbau*, 108(2013), p. 774-782.
7. **Muttoni, A.; Lurati, F.; Ruiz, M.F.**: Concrete shells – towards efficient structures: construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland, *Structural Concrete* 1, Volume 14, March 2013, p. 43-50.

3 Publikation [3]

Titel	Pneumatic Forming of Hardened Concrete – building shells in the 21 st century
Autoren:	Benjamin Kromoser, Johann Kollegger
Veröffentlichungstyp:	Aufsatz in Fachzeitschrift
Titel des Mediums:	Structural Concrete
ISSN:	1464-4177
DOI:	10.1002/suco.201400057
Ausgabe:	Volume 16, Issue 2
Seiten:	11
Herausgeber:	Luc Taerwe
Verlag:	Ernst & Sohn
Erscheinungsjahr:	2015
Peer Reviewed:	Ja, impact factor 0,857
Status:	Eingereicht, angenommen

Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century

Double-curvature shells, used as supporting structures, are strong and save materials. Major parts of the applied loads can be carried by normal forces. Thus, the stresses are distributed very uniformly and efficiently over the entire cross-section, and long spans can be built with small thicknesses. The state of the art in the construction of shell structures is characterized by a high labour input for formwork and falsework. A new construction method without formwork and falsework has been invented at the Institute for Structural Engineering at Vienna University of Technology. The idea of this new construction method is to build concrete shells with a double curvature originating from an initially plane plate. During the transformation process, the hardened concrete plate is lifted and the elements are bent with the aid of pneumatic formwork until the required curvature is reached. Non-linear finite element calculations, tension tests, bending tests and bonding tests were carried out in order to determine a suitable combination of concrete and reinforcement. The second part of the paper describes a large-scale experiment for the erection of a 17.6×10.8 m, 2.9 m high free-form shell. Finally, different applications for the new method are explained.

Keywords: free-form shell, concrete shell, pneumatic formwork, flat starting position

1 Introduction

Like snail shells, nutshells or even the cranial bone of the human body, shells are hardwearing structures that use comparatively little material. Most of the applied loads can be carried by in-plane membrane forces. The bending moments and shear forces are small in comparison to the normal forces. Famous architects have used this advantage to build impressive cupolas without reinforcement spanning over large areas, such as the Pantheon in Rome built with opus caementitium 1900 years ago, and St. Peter's Basilica in Rome made of stone 500 years ago. Both structures are described in detail in [1], [2]. Some 90 years ago, the construction of shells took a decisive step forward. Concrete with better properties and steel as reinforcement were available for building thin, long-span shell structures. An example of a well-known gridshell is the

Centennial Hall in Wrocław, Poland, finished in 1913. A few years later, in 1926, the Zeiss Planetarium in Jena; Germany, was built with the then newly invented Zeiss-Dywidag construction method. Concrete was sprayed on a pre-assembled network of steel rods using a local formwork. Since then, a great number of shells, such as Algeciras market hall [3], Sidney Opera House [4], Naturtheater Grötzingen [5] or L'Océanografic in Valencia [6], have been built by famous engineers such as *Eduardo Torroja*, *Jorn Utzon*, *Heinz Isler*, *Felix Candela*, *Frei Otto* or *Santiago Calatrava*, to mention just a few of them.

The production of the formwork and falsework for shells built using conventional construction methods requires considerable input. As is known, labour costs in industrialized countries have increased over recent decades in comparison to the costs for construction materials. Consequently, the practical application of shells has decreased and the aforementioned building technique has hardly been employed in the last 30 years. Recently, architects and engineers started to integrate free-form concrete surfaces in their building designs once again. State-of-the-art design software and industrial engineering methods save costs and provide the technologies for building shells in an economic way. One example of an impressive post-tensioned shell structure measuring 93×52 m was built in Chiasso, Switzerland [7]. The formwork, shown in Fig. 1,



Fig. 1. Formwork for a 93×52 m shell in Chiasso, Switzerland [7] (photo credit: Aurelio Muttoni)

* Corresponding author: benjamin.kromoser@tuwien.at

Submitted for review: 16 July 2014

Revised: 24 September 2014

Accepted for publication: 24 September 2014

was fabricated with the aid of CNC milling machines and the concrete was applied in the form of sprayed concrete on the lower part of the shell and cast-in-place concrete on the upper part of the shell.

Another way of saving costs is to build shells with the aid of pneumatic formwork, without conventional formwork and falsework. The principle of this construction method is to spray concrete on the inside or outside of an inflated membrane [8], [9]. One of the main problems is that the very flexible membrane is deformed by the jet of concrete during the production process. A remedy for this is to apply an additional layer of polyurethane foam or other plastic to increase the stiffness of the sheeting. *Dante Bini* invented another alternative in the 1960s [10]. He cast the concrete on flat circular formwork and the whole structure with the green concrete was lifted with the aid of pneumatic formwork placed under the flat plate. Yet, even this method had technical problems, with imperfections in the finished shell surface.

A new economic construction method for free-form concrete surfaces using pneumatic formwork – “pneumatic forming of hardened concrete” – is presented below.

2 Pneumatic forming of hardened concrete

An initially flat hardened concrete plate is transformed into a double-curvature shell with the aid of pneumatic formwork and the post-tensioning of two tendons in the circumferential direction. After being cut into regular segments like an orange peel and flattened, the transformation of a plane plate into a double-curvature surface causes large strains in the circumferential direction. As the concrete is not able to absorb these strains, wedge-shaped cut-outs in the flat starting plate are needed. During the transformation process, the petal-shaped elements are deformed into the finished shell consisting of single-curvature elements as shown in Fig. 2.

An air cushion is used as lifting formwork and additional pneumatic wedges are mounted between the concrete elements.

A balloon fully covered with a hard material such as pasted paper can be inflated with a much higher pressure than a balloon without such a covering. The reason for this is that the expandable rubber of the balloon is pressed against the harder material with its higher stiffness. Hence, the tensile forces are collected by this “harder” material. Where there is a hole in the “hard” structure, the rubber material has to absorb the higher inflated pressure in the area of the hole, but it is not able to. Consequently, the balloon escapes and bursts. In connection with the new building method, the air cushion could be seen as a balloon, the concrete plate as the “hard” covering material and the wedge-shaped cut-outs as “holes”. So how do we



Fig. 2. Transformation process from an initially flat plate to a double-curvature shell

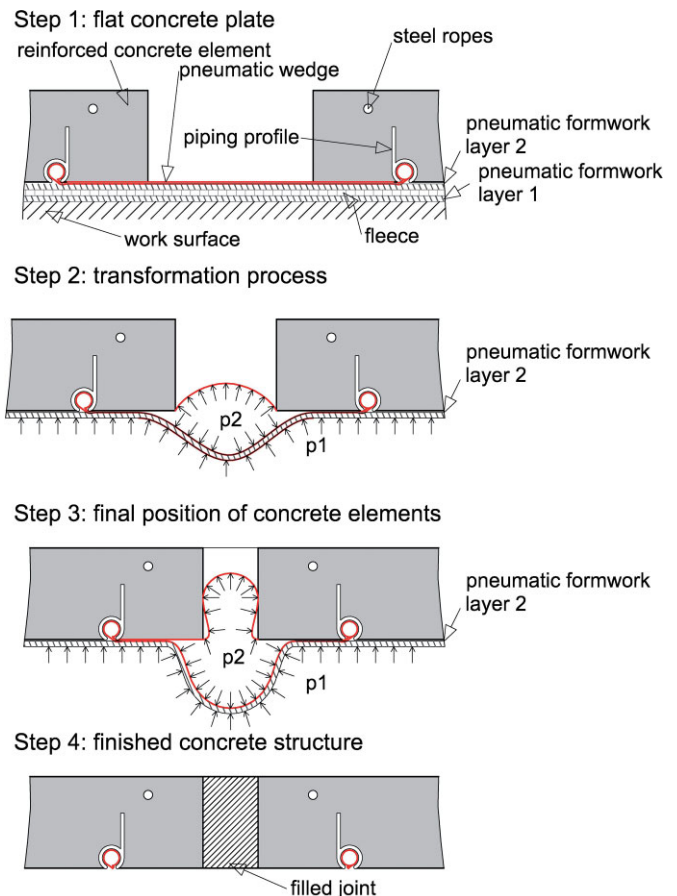


Fig. 3. Section through pneumatic wedge and reinforced concrete elements during the forming process

fill these “holes”? The tensile forces f in a membrane used for pneumatic structures have a direct relation to the radius of curvature r and the internal pressure p of the pneumatic structure:

$$f = \frac{p \cdot r}{2} \quad (1)$$

Consequently, the pneumatic wedges provide an easily compressible stable filling for the “holes” (cut-outs) and can withstand a much higher internal pressure p_2 because of their smaller radius of curvature, as shown in Fig. 3, where p_1 represents the internal pressure of the lifting air cushion and p_2 the internal pressure of a pneumatic wedge.

3 Preliminary numerical simulations and experiments

3.1 Numerical simulations

Basically, the forms of the new construction method that can be produced depend on the curvature of the single-curvature concrete elements that can be attained. There is a direct relationship between the maximum attainable curvature and the compressive strain in the concrete compression zone and the elongation behaviour of the reinforcement in the tension zone. Geometrically, this relationship is defined by the sum of the concrete strain in compression and the strain in the reinforcement divided by the effective depth d of the concrete plate:

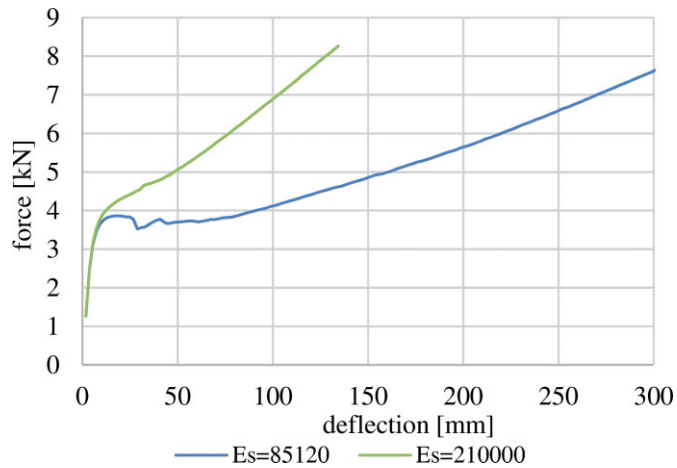


Fig. 4. Influence of different moduli of elasticity of the reinforcement on the bending behaviour of concrete plates

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} \quad (2)$$

The maximum attainable curvature is connected to a combination of tensile strains in the reinforcement and compressive strains in the concrete, as explained above. Conventional concrete, with a compressive strength of 20–60 N/mm² and a modulus of elasticity of 30 000–40 000 N/mm², is able to deform up to a strain of 0.004 in compression. By comparison, stainless steel ropes, for example, have a tensile strength of 1570 N/mm² and a modulus of elasticity of 85120 N/mm² and can be deformed up to a tensile strain of 0.02. Thus, the major part of the strains has to be taken up by the reinforcement. Non-linear finite element calculations were carried out on bending test specimens with a variation in the modulus of elasticity of the reinforcement and constant material parameters for the concrete. The results are shown in Fig. 4. Additional calculations were carried out with a variation in the age of the concrete (1, 2, 6 and 28 days) and constant material parameters for the reinforcement (Fig. 5). The results show that the age of the concrete is a non-critical factor for the construction method. The concrete should at least be 2 days old to guarantee that the bonding of the steel ropes is sufficient. However, the material parameters of the reinforcement influence the bending behaviour decisively. In the preliminary experiments, the focus was therefore on the reinforcement.

The aim of the preliminary tests was to find a reinforcement type with good bonding properties for an equal crack width and a high elasticity with an almost linear elastic load–displacement behaviour in the crack formation section and the stabilized cracking afterwards. In order to determine the strain behaviour, the cracking behaviour and the regularity of the crack spacings for different materials used as reinforcement, centric tension tests were performed. Based on the results of these tests, further four-point bending tests were carried out to determine the bending behaviour. Crack spacing and crack width were measured in particular. In the last preliminary experiments, the bonding behaviour of the different types of reinforcement was determined.

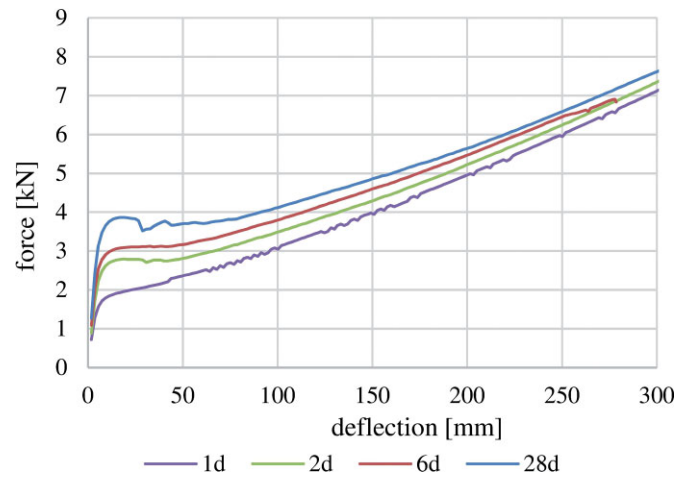


Fig. 5. Influence of concrete age on the bending behaviour of concrete plates

3.2 Tension tests

Extensive research work has been carried out on the tensile loadbearing characteristics of reinforced concrete, e.g. [14, 15]. In order to determine the properties relevant to the building method, mentioned in section 3.1, a test series with 56 test specimens was performed in the second half of 2013 at Vienna University of Technology. The following types of reinforcement were tested: conventional reinforcing bars (6 mm dia.), four different types of steel rope (5 mm dia.), two types of plastic rod, two types of plastic fibre and glass fibre and carbon fibre textiles. The dimensions of the concrete test specimens were 1300 × 100 × 100 mm (Fig. 6). Threaded rods (type M20) were encased in the concrete at both ends for mounting the specimens in the testing frame. Nuts were mounted on the ends of the threaded rods to improve the anchorage. Additional reinforcement cages were arranged in the end zones to absorb the ensuing transverse tensile forces.

A hydraulic jack was used to produce the tensile force and load cells at the top of the testing frame measured the ensuing normal forces. Two linear variable differential transformers (LVDTs), mounted on both sides of the test specimens, measured the elongation of the tensile members over a measuring length of 1 m. Displacement control was used for the experiment with a loading rate of 1.5 mm/min.

Fig. 7, representative for the test series, shows three different test specimens with steel ropes as reinforcement. The testing procedure is divided into three different sections. In the first, “uncracked”, section the load–displacement curve exhibits a linear elastic material behaviour. After the tensile strength of the concrete has been reached, cracks occur in the second, “crack formation”, section. In the third section, “stabilized cracking”, the reinforcement has expanded and no further cracks occur.

The results show that the test specimen reinforced with plastic fibres (reinforcement ratio = 2 % of concrete volume) with lengths of 12 and 39 mm broke into two pieces after the tensile strength of the concrete was reached. The reason for this was that the loadbearing capacity of the fibres, distributed over the entire cross-section,

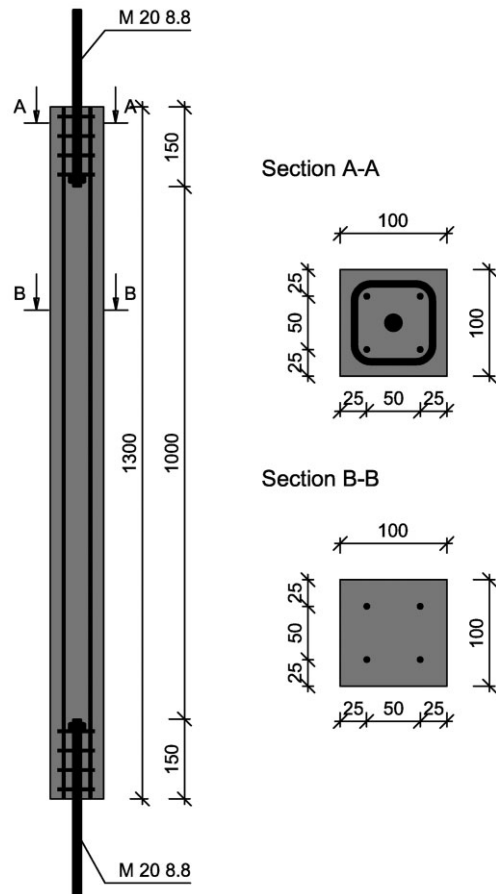


Fig. 6. Tension test setup

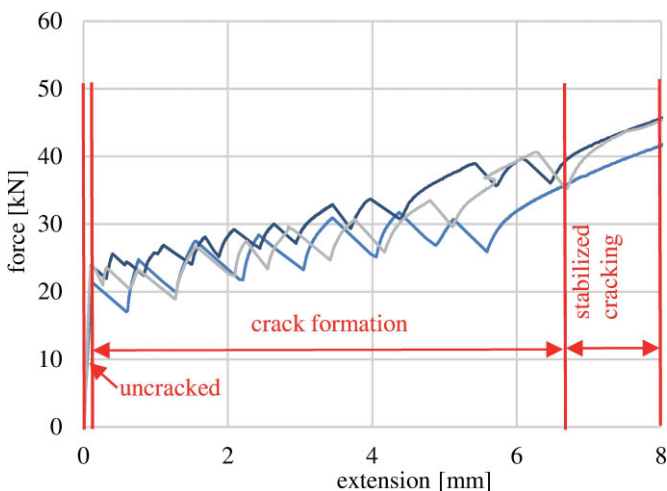


Fig. 7. Force–elongation relationship of tension members reinforced with steel ropes

tion, was lower than the loadbearing capacity of the concrete. Plastic rods as reinforcement exhibited large cracks normal and parallel to the reinforcement and caused the destruction of the test specimen. As is well known, conventional reinforcing bars exhibit an elastic-plastic stress–strain correlation. Accordingly, one of the cracks widens much faster than the others when the yield strength of these steel rods is exceeded. Consequently, these three configurations were unusable. The test specimen reinforced with 5 mm dia. stainless steel ropes with 7



Fig. 8. Bending test with test specimen

× 19 wires as well as the test specimen reinforced with the textiles exhibited the best bonding properties and thus these configurations were used for further bending tests.

3.3 Bending tests

Numerous different experiments on the bending behaviour of reinforced concrete specimens, e.g. [16, 17], have been carried out in the past. Four-point bending tests, as shown in Fig. 8, were performed in order to determine the relevant bending behaviour for the large-scale experiment, the maximum attainable curvature, the bending–cracking behaviour and the regularity of the curvature of rectangular concrete plates. Twenty-four test specimens measuring 2500 × 500 × 50 mm were tested. Stainless steel ropes with a diameter of 5 mm and 7 × 19 wires, glass-fibre textiles of type Fraas SITgrid 200KB, carbon textiles of type SGL Sigratex Grid 300KB and SGL Sigratex 600KB as well as combinations of steel ropes and textiles were used as reinforcement. This reinforcement was mounted at different levels in order to test members with different effective depths (25, 35 and 40 mm).

The force was applied with the aid of a hydraulic jack via two bearings 1.5 m apart (Fig. 8) and seven LVDTs were used to measure the deflection of the test specimens. A pressure sensor measured the pressure in the hydraulic system to determine the force induced.

The results show that stainless steel ropes with 7 × 19 wires and concrete plates with an effective depth of 40 mm are able to absorb the ensuing forces. The measured crack spacings and crack widths, listed in Table 1, meet the requirements of a smooth curvature. In addition, stainless steel ropes are easy to install.

The specimens with combined reinforcement (steel ropes and textiles) exhibited the smoothest force–deflection correlation (Fig. 9) and the smallest crack spacings and crack widths (Table 1), but required far too large induced forces for the bending process. Besides, two kinds of reinforcement are much more complicated when it comes to their installation and require a higher labour input.

The variation in the effective depth from 25 to 40 mm (Fig. 10) showed that the test specimen reinforced

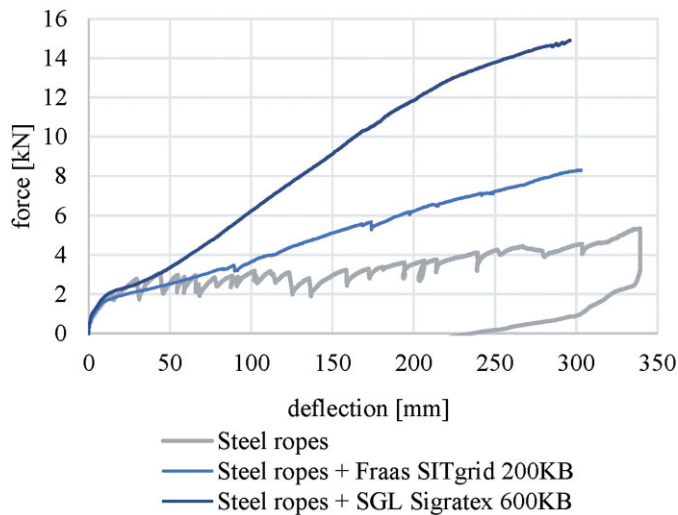


Fig. 9. Variation in the reinforcement

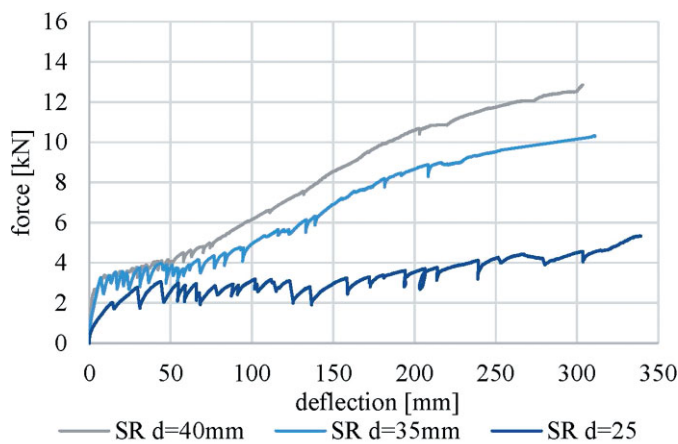


Fig. 10. Variation in the effective depth

with steel ropes with higher internal lever arms exhibits a much smoother distribution of crack spacings and crack widths (Table 1). This is explained by the fact that the distortion could be better controlled at a higher load level of the steel ropes. Thus, if the reinforcement is able to absorb the larger forces and strains, test specimens with higher effective depths for the same thickness show a smoother curvature, a smaller crack spacing and smaller crack width.

Table 1. Cracking behaviour of bending tests

	Steel ropes & Fraas SITgrid 200KB	Steel ropes & SGL Sigratex 600 KB	Steel ropes	Steel ropes	Steel ropes
effective depth [mm]	35	35	25	35	40
average crack spacing in [mm], $\kappa = 0.3$ (1/m)	40.4	44.4	84.4	66.7	60.6
std. dev. of c_d in [mm], $\kappa = 0.3$ (1/m)	14.3	12.6	38.2	18.0	17.3
average crack width in [mm], $\kappa = 0.15$ (1/m)	0.12	0.10	0.86	0.3	0.25
average crack width in [mm], $\kappa = 0.3$ (1/m)	0.23	0.22	1.18	0.6	0.45

3.4 Bonding tests

Additional bonding tests were carried out to investigate the bonding properties of the steel ropes. According to [11], the bonding area was determined with the following equations. First, the entire steel cross-section is converted into an area equal to cross-section:

$$d_e = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot A_s} \approx 1,13 \cdot \sqrt{A_s} \quad (3)$$

An additional coefficient η is created to find the bonding circumference :

$$u_b = \eta \cdot \pi \cdot 1,13 \cdot \sqrt{A_s} \quad (4)$$

The coefficient η is chosen to be 1.7 [12]

Ten bonding experiments referring to [13] were carried out with a bonding length of 25 mm = $5d$.

Fig. 11 shows the setup for the pull-out tests and Fig. 12 shows the average bond stress–displacement curve obtained.

4 Erection of a free-form concrete shell

4.1 Experimental Design

A prototype of a free-form shell covering an area of 17.6×10.8 m and with a height of 2.9 m was built in Vienna in spring 2014 to test the practical functionality of the new building method, as shown in Fig. 13. After another large-scale experiment on a spherical shell structure 10 m in diameter and 3.5 m high had been carried out in Amstetten, Austria, in autumn 2012 [14], it was necessary to test the shell construction method on a larger structure with a more complicated free-form geometry and greater curvature of the elements.

The use of the peripheral areas of buildings in the form of shell structures often creates a problem owing to the low room height. The fitting of further equipment-like installations, e.g. furniture, might be problematic. The shape of an ellipsoid was therefore modified to a similar structure with a different curvature to obtain a larger floor area with an adequate room height.

The “perfect” smooth geometry was discretized into a polyhedron and split into 24 segments to enable the application of “pneumatic forming of hardened concrete”. Afterwards, the polyhedron was developed to a flat plate

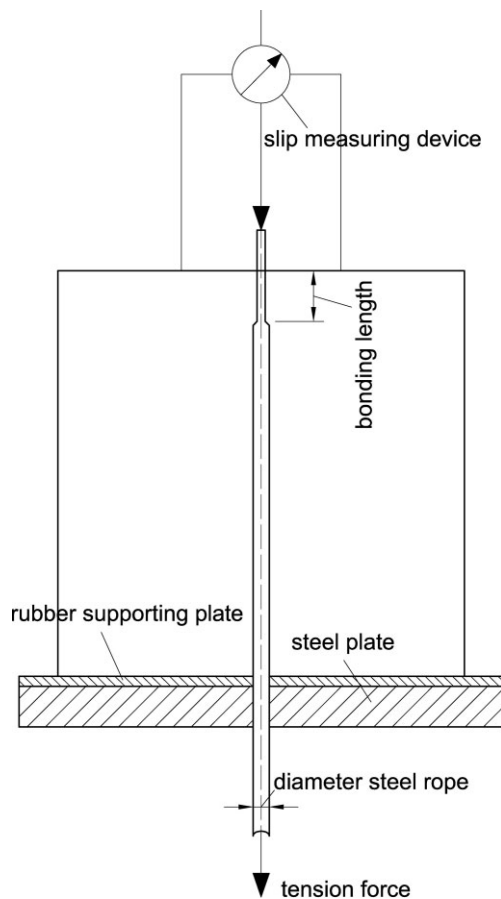


Fig. 11. Setup for pull-out tests [13]

consisting of the 24 segments and 24 wedge-shaped cut-outs to compensate for the compressive strains in the circumferential direction during the transformation process from a flat plate to the free-form shell.

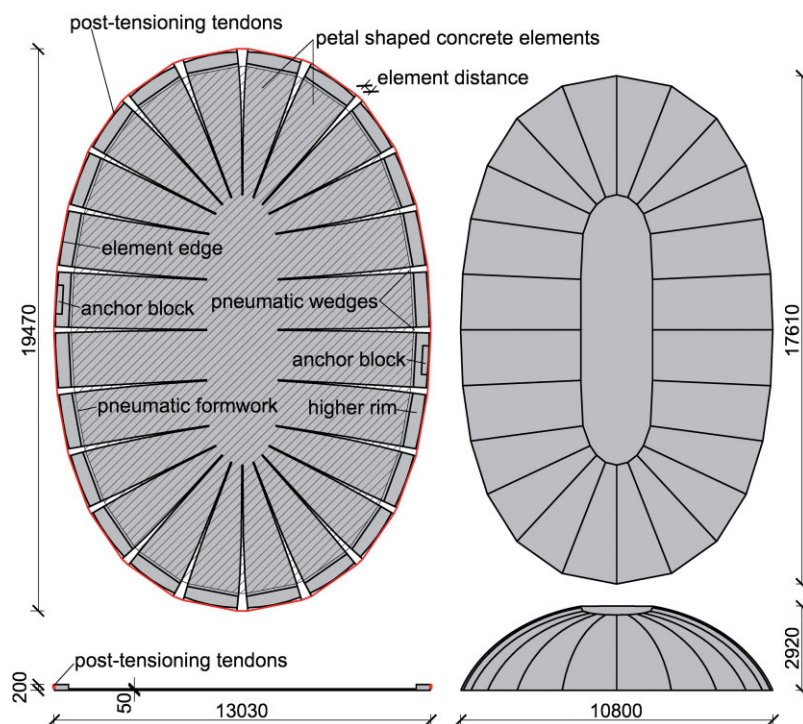


Fig. 13. Overview of the prototype of the free-form shell

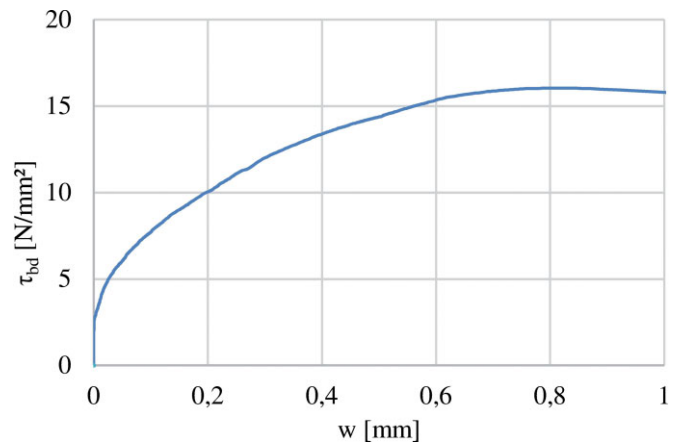


Fig. 12. Bond stress–displacement curve for steel ropes in concrete

According to the preliminary experiments described in sections 3.2, 3.3 and 3.4 above, the thickness of the initially flat plate was chosen to be 50 mm over the entire surface and 200 mm in the outer 0.5 m of the elements. The greater thickness at the edge of the plate was necessary for the bending of the concrete plate. Otherwise, a plate with a constant thickness would be lifted as a whole by the pneumatic formwork. Stainless steel ropes 5 mm in diameter with 7×19 wires were selected as reinforcement. These steel ropes were mounted between a steel tension ring in the middle of the structure and the bulkhead formwork. Each rope was post-tensioned with a force of 0.8 kN to fix its position (Fig. 15). Conventional steel mesh reinforcement with 6 mm dia. bars every 100 mm was welded into the tension ring. Additional reinforcing bars 6 mm in diameter and 250 mm long were welded to the outside of the tension ring to serve as connecting reinforcement for each element. Conventional reinforcing bars 6 mm in di-



Fig. 14. Fixing the formwork around the circumference and for the wedge-shaped cut-outs



Fig. 16. Casting the flat concrete plate



Fig. 15. Formwork with reinforcement already installed



Fig. 17. Installing the lateral displacement protection (steel sections)

imeter every 150 mm served as transverse reinforcement in the petal-shaped elements. A special nylon foil, “Riverseal 200” from Rivertex, normally used for lifejackets, was used as the pneumatic formwork and for the pneumatic wedges. The pneumatic formwork consisted of two welded flat sheets of foil. This flat welded foil was 0.5 m smaller than the bulkhead formwork (hatched area in Fig. 13) to avoid any damage to the foil possibly caused by the edge of the elements when the rim slides towards the centre of the concrete plate during the lifting process. Since the elements were not connected during the lifting process, differential out-of-plane displacements between the elements occurred in the large-scale experiment in autumn 2012. In order to prevent these displacements, U140 steel sections were attached to the concrete plate before the transformation was started (Fig. 17). The construction of the flat concrete plate included the following steps:

1. Creation of a flat subgrade level
A flat concrete plate served as working surface for further operations.
2. Unfolding the pneumatic formwork
The prefabricated pneumatic formwork was spread out on the flat working surface.
3. Unfolding the pneumatic wedges
The pneumatic wedges, also prefabricated, were rolled out and placed in the right position.
4. Installation of formwork (Fig. 14)
The wedge-shaped formwork, consisting of three pieces, was assembled on top of the pneumatic wedges already measured. Bulkhead formwork was installed around the circumference.
5. Installation of reinforcement (Fig. 15)
In the next step, the steel tension ring, the steel rods and the conventional reinforcement were installed.
6. Preparing for fixing the steel sections
It is necessary to install steel sections over segments to avoid a relative displacement of the elements. Therefore, threaded rods with steel plates welded at the end were mounted in the formwork for fixing after casting the concrete in the formwork.
7. Casting the concrete plate (Fig. 16)
Concrete grade C30/37 with a maximum grain size of 16 mm was cast in the formwork.
8. Dismantling the formwork
This step includes removing the wedge-shaped formwork and the bulkhead formwork.
9. Installation of steel sections (Fig. 17)
After the formwork had been removed, the steel sections were installed to serve as protection against lateral displacement.
10. Installation of distance pieces

The formwork wedges are 30 mm at their tip due to the minimal thickness of the plywood sheeting. Thus, a planned joint of 30 mm over the entire element length is required and distance pieces were mounted.

4.2 Test erection process

The experiment for the transformation from an initially flat plate to a free-form shell was started after six days of hardening. A compressor was used to fill the pneumatic wedges. The pressure was kept at a constant level of 30 mbar during the whole experiment. After all the pneumatic wedges had reached a pressure of 30 mbar, the inflation of the pneumatic formwork (plan area, see Fig. 13) was started. A side-channel blower provided enough air-flow (max. 300 m³/h at an air pressure of 16 mbar) to lift the structure. At the beginning, the pressure was adjusted

to 15 mbar and increased to 16 mbar during the experiment due to the decreasing ground floor area and the consequential higher weight per unit area. The two post-tensioning tendons were tightened with four hydraulic jacks and supported the transformation process in the final part of the experiment with a maximum tensioning force of 15 kN per jack. The entire transformation process took only about two hours until the intended free-form was reached, as shown in Fig. 18.

4.3 Material parameters

The properties of the hardened concrete, the stainless steel ropes and the nylon foil are summarized in Table 2, Table 3 and Table 4 respectively.

4.4 Test results

The large-scale experiment showed that free-form concrete structures can be built with “pneumatic forming of hardened concrete”. The pneumatic formwork remained completely leak-proof during the experiment, confirming



Fig. 18. Transforming a flat plate into a free-form shell

Table 2. Properties of hardened concrete (mean values)

Compressive strength (cube)	26.1 N/mm2
Density	2317 kg/m³

Table 3. Material parameters of stainless steel ropes

Number of cords	7 × 19
Tensile strength	1570 N/mm²
Filling factor for metallic cross-section	0.418
Fill factor	0.532
Rope diameter	5.0 mm
Cross-sectional area of rope	10.45 mm²
Factor for minimum tensile strength	0.362
Minimum tensile loading	14.21 kN
Calculated tensile loading	16.41 kN

Table 4. Material parameters of foil used for all pneumatic structures

Fabric type	nylon
Total weight	275 g/m²
Breaking strength in two main directions N/50mm	> 1100/1000
Breaking strength after water immersion (24 h @ 20 °C)	> 1000/900 N/50mm
Tear strength	> 35/35 N
Adhesion, welded seam	> 400/400 N/50mm
Adhesion – wet (336 h in water @ 70 °C), welded seam	> 300/300 N/50mm

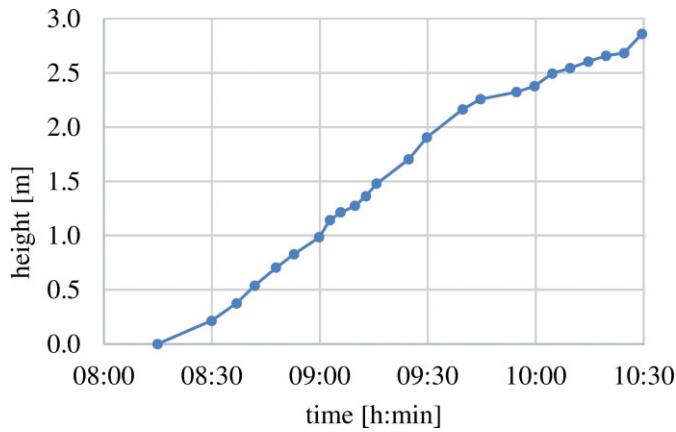


Fig. 19. Chronological evolution of the shell height

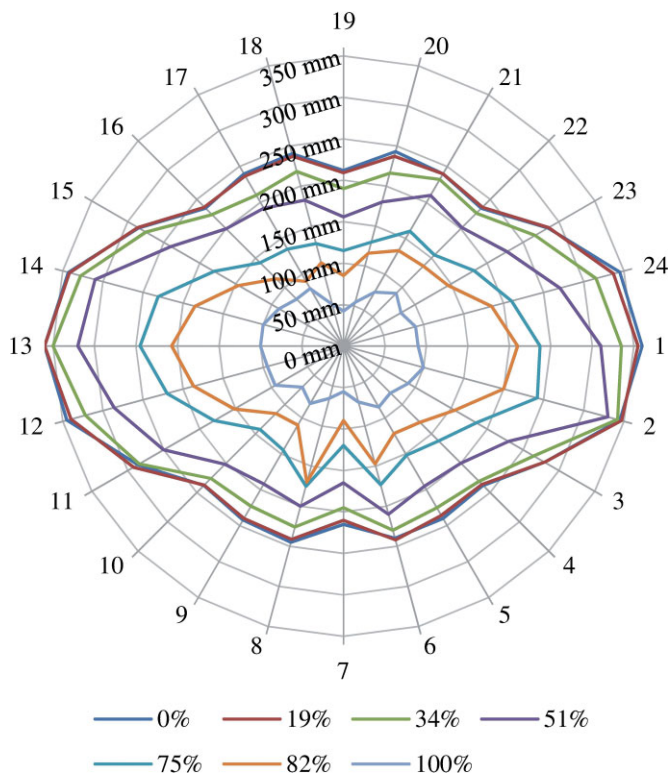


Fig. 20. Chronological evolution of the element spacing

the choice of the nylon foil. Figs. 19 and 20 show the chronological evolution of the shell height and the distance between the 24 concrete elements (shown in Fig. 13) where the pneumatic wedges were mounted. The average rate of growth amounted to 20 mm/min and the final height was 2.85 m. Apart from that, the steel sections protecting against lateral displacement improved the transformation of the single elements into a complete structure and actively prevented transverse movement of the elements. The distance pieces ensured that the design joint of 30 mm remained free during the transformation process. A 3D laser scanner was used to determine the final shape of the free-form shell. Fig. 21 shows the difference between the designed free-form and the finished shell. The maximum deviations were 0.25 m. Fig. 22 shows the cracking in the finished shell.

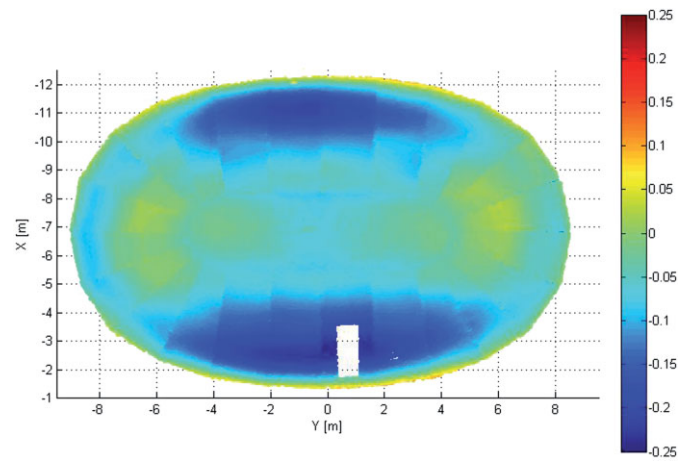


Fig. 21. Deviations between designed structure and finished structure

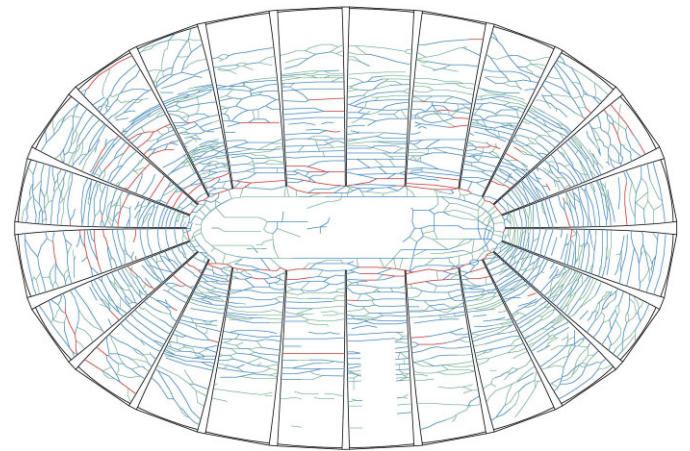


Fig. 22. Cracks in the free-form shell (green: 0.0–0.3 mm; blue: 0.3–2.0 mm; red: > 2 mm)

4.5 Possible applications of the new construction method

Considering the boundary conditions of the construction method, a wide range of free-form structures can be built with the new construction method, e.g. deer pass, information corner, exhibition space (Fig. 23), event location, concert stage roof, even a concert hall. Three of these applications are shown in the large-scale experiment explained above. Work on the shell continued as shown in Fig. 18 and as explained in the following: At first, a door was cut in the shell. Afterwards, the pneumatic formwork and the pneumatic wedges were removed and the 30 mm wide joints filled with grout. An additional layer of sprayed concrete 30 mm thick was then applied in two operations, as shown in Fig. 24. Between spraying the two layers, a carbon textile, soligrid Q90-CEP-21 from Solidian, was installed to serve as reinforcement. Finally, the structure was demolished in two stages. Figs. 25 and 26 show applications as a deer pass over a railway track and/or street and as a concert stage roof.

5 Structural analysis

The entire structure consists of a middle plate and 24 individual single-curvature elements connected to the plate.



Fig. 23. Application as event location



Fig. 24. Applying the layers of sprayed concrete



Fig. 25. Application as deer pass (photo credit, visualization: Zechner&Zechner ZT GmbH)

To benefit from the structural advantages of a double-curvature shell, it is necessary to merge these elements into a monolithic structure. Either the joints are connected with special reinforcement [18], filled with grout and the entire structure smoothed with filler afterwards, or an additional layer of sprayed concrete, including the necessary reinforcement, is applied. The additional layer of sprayed concrete was tested in the large-scale experiment. Based on



Fig. 26. Application as concert stage roof

the fact that the elements are connected to a double-curvature shell, the finished structures can be calculated with a commercial finite element program. A sample calculation for the prototype with the dead loads plus 1.5 kN/m^2 snow load is shown in Fig. 27. The principal bending moments M_1 and M_2 do not exceed 0.39 kNm/m in comparison to the resisting bending moment of 2.57 kNm/m determined in the bending tests. The normal forces also exhibit low values, with a maximum compressive force of 130 kN/m . Consequently, the applied forces can be easily carried by the shell structure.

Another positive aspect is that the tensile force in the steel ropes increases during the experiment. To summarize, the post-tensioning force of 0.8 kN at installation and an additional tensile force of $9\text{--}10.5 \text{ kN}$ due to distortion (depending on the final curvature) result in a final tensile force of $9.8\text{--}11.3 \text{ kN}$ (60–69 % of the maximum load of the steel ropes). With regard to the creep redistributions, 30–35 % of the tensile force still remain in the structure after 28 days and 18–21 % of the tensile force can be established after one year.

6 Conclusions

Shells are impressive and economic load-carrying structures. Pneumatic forming of hardened concrete provides a fast, labour- and material-saving building method in comparison to construction methods with formwork and falsework. The preliminary tests showed that the steel ropes as reinforcement are able to absorb the ensuing strains and provide smooth cracking formation and distribution. Consequently, a smooth curvature of the elements can be attained. The large-scale experiment of the transformation from a flat plate to a free-form shell showed that the transfer from the laboratory tests to the application as a free-form shell works as calculated and the designed form is achieved with very minor deviations. Asymmetrical free-form structures up to 50 m span, taking account of the boundary conditions, can be built with the current state of knowledge.

7 Acknowledgements

The test series were performed in collaboration with the Austrian Society for Construction Technology and con-

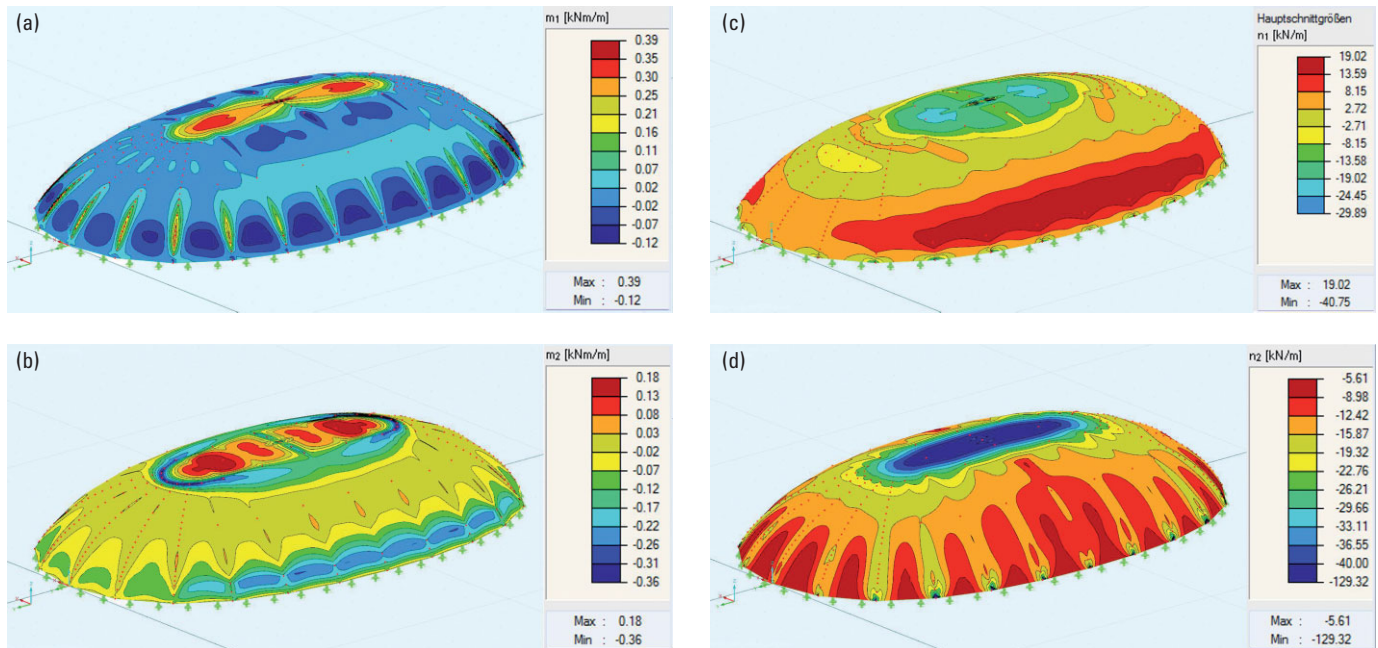


Fig. 27. The internal forces in the prototype: a) M1, b) M2, c) N1, d) N2

ducted as part of the “Free-form concrete surfaces” research project. The financial support of all project partners (doka, ÖBB, Asfinag, Strabag, Porr, Alpine, Bilfinger, Habau, Swietelsky, Holcim, Lafarge, Wopfinger, Sika and Festo) and the Austrian Research Promotion Agency (FFG) is gratefully acknowledged.

References

- Heinle, E., Schlaich, J.: Kuppeln aller Zeiten – aller Kulturen. DVA, Stuttgart, 1996.
- Schmidt, H.: Von der Steinkuppel zur Zeiss-Dywidag-Schalbauweise. Beton- und Stahlbetonbau, 2005, No. 100, pp. 79–91.
- Billington, D. P.: The Tower and the Bridge – The New Art of Structural Engineering. Basic Books, New Jersey, 1983.
- Shafner, S.: Sydney Opera House – Modern Wonders of the World. Creative Education, Mankato, 2007.
- Schlaich, J., Schüller, M.: Ingenieurbauführer Baden-Württemberg. Bauwerk Verlag, Berlin, 1999.
- Domingo, A., Lázaro, C., Sema, P.: Design of a thin shell steel fibre reinforced concrete hypar roof. Shell and Spatial Structures: from recent past to the next millennium, CEDEX, 1999, pp. 169–179.
- Muttoni, A., Lurati, F., Ruiz, M. F.: Concrete shells – towards efficient structures: construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland. Structural Concrete 1, vol. 14, Mar 2013, pp. 43–50.
- Van Hennik, P. C., Houtman, R.: Pneumatic Formwork for Irregular Curved Thin Shells. Textile Composites and Inflatable Structures II, Springer, 2008, pp. 99–116.
- Sobek, W.: Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. PhD thesis, University of Stuttgart, 1987.
- Bini, D.: A new pneumatic technique for the construction of thin shells. International Association for Shell Structures, Proc. of 1st IAASS Intl. Colloquium on Pneumatic Structures, University of Stuttgart, 1967.
- Wille, F.: Charakteristik und Modellbildung des Verbundtragverhaltens von einlagigen Rundlitzenseilen in Beton. PhD thesis, Technical University of Cottbus, 2004.
- Will, N.: Zum Verbundtragverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund unter statischer und dynamischer Dauerbeanspruchung. PhD thesis, RWTH Aachen, 1997.
- ÖNORM EN 10080: Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel. Austrian Standard Institute, Vienna, 2005.
- Lorenz, E., Schütze, E., Schladitz, F., Curbach, M.: Textilbeton – Grundlegende Untersuchungen im Überblick. Beton- und Stahlbetonbau, 2013, No. 108, pp. 711–722.
- Contamine, R., Si Larbi, A., Hamelin, P.: Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites. Materials Science and Engineering, 2011, A 528, pp. 8589–8598.
- Hegger, J., Voss, S.: Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. Engineering Structures, 2008, No. 30, pp. 2050–2056.
- Hegger, J., Will, N., Zell, M.: Tragverhalten von Textilbeton unter Biege- und Querkraftbeanspruchung. In: Curbach, M., Jesse, F. (ed.): CTRS4 – 4th Colloquium on Textile-Reinforced Structures, Dresden, 3–5 Jun 2009, pp. 145–156.
- Kromoser, B., Kollegger, J.: Herstellung von Schalentragwerken aus Beton mit der “Pneumatic Wedge Method”. Beton- und Stahlbetonbau, 2014. No. 109, pp. 557–565.



Benjamin Kromoser
Vienna University of Technology
Institute for Structural Engineering
Karlsplatz 13, E212-2
benjamin.kromoser@tuwien.ac.at



Johann Kollegger
Vienna University of Technology
Institute for Structural Engineering
Karlsplatz 13, E212-2
johann.kollegger@tuwien.ac.at

Publikationen und Konferenzbeiträge

Konferenzbeiträge

1. Kollegger, J., Kromoser, B., Dallinger, S.:
"The building of ice and concrete shells by employing pneumatic formwork";
Vortrag: Second International Conference on Flexible Formwork, Bath;
27.06.2012 - 29.06.2012; in: *"Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork"*, (2012), ISBN: 978-0-86197-184-8; S. 52 - 55.
2. Kromoser, B.:
"Methods for transforming flat concrete plates to double curved shell structures";
Vortrag: The 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Karlsruhe; 22.07.2012 - 25.07.2012; in: *"Proceedings of the 9th fib International PHD Symposium in Civil Engineering"*, (2012), ISBN: 978-3-86644-858-2; S. 275 - 280.
3. Kromoser B., Kollegger, J.:
"Using Ice to Build Shell Structures";
Vortrag: 10th International Conference and Exhibition on Performance of Ships and Structures in Ice, Banff; 17.09.2012 - 20.09.2012; in: *"Proceedings of the 10th International Conference and Exhibition on Performance of Ships and Structures in Ice"*, (2012), ISBN: 978-0-9780896-3-4.
4. Kromoser, B., Ritt, M.:
"Concrete Design Award" - Betonmöbel aus Textilbeton
Vortrag: VÖZ Kolloquium 5.11.2013; in: *"VÖZ Kolloquium 2013"*, Online-Tagungsband, S 32-33.
5. Kromoser, B., Eichwalder, B., Kollegger, J.:
Simulation of large strains in concrete specimen – centric tensile tests using steel ropes as reinforcement
Vortrag: Euro-C St. Anton, 24.03.2014 – 27.03.2014; in: *Proceedings: Computational Modelling of Concrete Structures*, ISBN: 978-1-138-00145-9; S 1067-1072.
6. Kromoser, B., Kollegger, J.:
Building free formed concrete surfaces by using the "pneumatic wedge method" Vortrag: The 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering 21.07.2014-23.07.2014, Quebec; in: *Proceedings: The 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, ISBN: 978-2-9806762-1-5; S 303-308.
7. Kollegger, J., Foremniak, S., Kromoser, B.:
Innovations for the Design of Concrete Bridges Developed at Vienna University of Technology

Vortrag: 10th Japanese German Bridge Symposium in Munich, München
16.09.2014 - 17.09.2014, in: *Proceedings: 10th Japanese German Bridge Symposium in Munich*.

8. Kollegger, J., Foremniak, S., Kromoser, B.:
Innovative Proposal for the Construction of Concrete Bridges
Vortrag: International Seminar on Long Span Bridge, Shanghai 23.10.2014 -
25.10.2014, Shanghai; in: *Proceedings of International Seminar
on Long Span Bridge*, S 26-37.
9. Kromoser, B., Ritt, M.:
DONAUWELLE – freigeformte Grillmöbel aus Textilbeton
Vortrag: VÖZ Kolloquium 5.11.2014; in: "*VÖZ Kolloquium 2014*"; Online-
Tagungsband, S 42-43.
10. Kollegger, J., Kromoser, B.:
Neue Tragwerke – Eine Betonkuppel zum Aufblasen
Vortrag: Betontage Ulm 24.-26.02.2015, in: *Proceedings 58. Betontage Ulm*;
S 142-143.
11. Kollegger, J., Foremniak, S., Kromoser, B.:
*Egg-Graben Brücke, Wildbrücke AM2, Lafnitzbrücke - Anwendung von
neuen Bauverfahren für Brücken in Österreich*
Vortrag: Dresdner Brückenbausymposium 09.-10.03.2015, in: *Proceedings
Dresdner Brückenbausymposium*, ISBN: 978-3-86780-421-9; S193-214.

Patente

1. Kollegger, J., Kromoser, B.:
"Verfahren zur Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalen";
Patent: Österreich, Nr. A1770/2011; eingereicht: 30.11.2011, erteilt:
15.04.2013.
2. Kollegger, J., Kromoser, B.:
"Verfahren zur Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalen";
Patent: Europa, Nr. EP2012/073678; eingereicht: 27.11.2012.

Rezensionen

1. Zement + Beton
Concrete Student Trophy 2011-3. Preis "Urban Shells"
Gruppen-Rezension über Kromoser, B., Pachner, T., Schretzmayer, J.: Zement + Beton 5_11, S. 14 – 16, 2011.
2. Zement + Beton
Concrete – Design Award 2013-1. Preis „Donauwelle“
Gruppen-Rezension über Kromoser, B., Ritt, M.: Zement + Beton 3_13, Titelblatt S. 10 – 11, 2013.
3. Österreich Baublatt
Luftpolster als Stützkonstruktion
Gruppen-Rezension über Kollegger, J., Kromoser, B., Waglechner, M.: Österreich Baublatt 6, S. 58 – 59, 2014.
4. architektur Fachmagazin
Grillen auf der Donauinsel
Gruppen-Rezension über Kromoser, B., Ritt, M.: Architektur Fachmagazin Nr. 6, S. 12, 2014.
5. architektur.aktuell
Cooler Mobiliar
Gruppen-Rezension über Kromoser, B., Ritt, M.: architektur.aktuell – the art of building, Nr. 10, S. 42, 2014.
6. Solid – Wirtschaft und Technik am Bau
Harte Schalen, neue Kerne
Gruppen-Rezension über Kollegger, J., Kromoser, B.: Solid – Wirtschaft und Technik am Bau Nr. 10, Titelblatt S. 42, 2014.
7. Tracés 03
UNE CONQUE GONFLÉE
Gruppen-Rezension über Kollegger, J., Kromoser, B.: Tracés 03 – Bulletin technique de la Suisse romande (141e année / 13 février 2015) S. 6-11, 2015.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Benjamin Kromoser
Geburtsdatum: 04.04.1987
Geburtsort: Amstetten, Österreich
Staatsbürgerschaft: Österreich

Ausbildung:

11/2011-03/2015	Dr.-Studium der technischen Wissenschaften Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Wien
02/2011-11/2011	Masterstudium „Konstruktiver Ingenieurbau“ an der Technischen Universität Wien
03/2007-02/2011	Bachelorstudium „Bauingenieurwesen und Infrastrukturplanung“ an der Technischen Universität Wien
2001-2006	Höhere Technische Bundeslehranstalt (HTBLA) Hallstatt, Fachrichtung Holztechnik, Spezialisierung Innenraumgestaltung und Möbelbau
1997-2001	Bundesrealgymnasium Amstetten
1993-2001	Volksschule Amstetten

Berufserfahrung:

Seit 10/2012	Universitätsassistent an der Technischen Universität Wien, Institut für Tragkonstruktionen- Betonbau
01/2014-04/2014	Freier Dienstnehmer bei Öhlinger + Partner ZT-Ges.m.b.H. im Rahmen des Projektes Donauwelle 2.0 in Zusammenarbeit mit der Stadt Wien
2012/03-09	Projektassistent an der Technischen Universität Wien, Institut für Tragkonstruktionen- Betonbau
2003-2010	Verschiedene Praktika während der Studienzeit

Auszeichnungen und Preise:

2010	Verleihung eines Leistungsstipendiums für ausgezeichnete Studienerfolge an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien
2011	3.Platz Concrete Student Trophy mit dem Projekt „Urban Shells“
2012	1.Platz Concrete Design Award mit dem Projekt „Donauwelle“