

## **Pneumatische Schalungen im Brückenbau**

*Benjamin Kromoser, Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, benjamin.kromoser@tuwien.ac.at*

*Johann Kollegger, Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, johann.kollegger@tuwien.ac.at*

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, stellt sich im Tragwerk ein Membranspannungszustand ein und es treten im Querschnitt hauptsächlich gut vom Beton aufnehmbare Druckspannungen und nur geringe, für das Tragwerk ungünstige Biegespannungen und transversale Schubspannungen auf.

Die Errichtung von freigeformten Betonschalen ist mit den momentan zur Verfügung stehenden konventionellen Schalungsmethoden aufgrund der zweifachen Krümmung der Oberfläche sehr aufwändig und teuer. Oft werden deshalb Entwürfe aufgrund fehlender finanzieller Mittel nicht verwirklicht und müssen dann den konventionellen massiven Bauweisen weichen. Eine wesentlich günstigere alternative Baumethode ist die Herstellung von Schalenträgwerken mit Hilfe von pneumatischen Schalungen und anschließend appliziertem Spritzbeton oder das Verformen von frischem Beton mit pneumatischer Schalung.

Eine erstmalige Anwendung war vermutlich jene von Nose, T. für die Herstellung von Rohren im Jahr 1926 [1]. 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 [2], [3]. Die Basis bildete eine aufgeblasene Membran, auf die anschließend Beton aufgebracht wurde. 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 [4], [5]. Eine weitere Möglichkeit für die Herstellung von kostengünstigen Häusern mit pneumatischen Schalungen entwickelte Heifetz, H. in Israel in den 1960er Jahren [6]. 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 [7], [8], [9]. Zum Verformen wurden zwei Membranen verwendet. Die eine diente als Hebe-pneu unter der Frischbetonplatte und die andere als Gegenschalung 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 der Applikation des Betons ausgesteift wurde [10], [11]. 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 durch nachträgliches Aufspritzen von Wasser ausgehärtet [12]. Schlaich, J. und Sobek, W. entwickelten in den 1980er Jahren ein Verfahren, bei dem Betonfertigteile auf eine pneumatische Schalung aufgelegt werden [13] um die nachträglichen Verformungen in der Schalung möglichst klein zu halten.

An der Technischen Universität Wien wurde in den vergangenen Jahren eine neue Baumethode mit dem Namen „Pneumatic Forming of Hardened Concrete (PFHC)“ entwickelt [14], [15], [16]. Diese ermöglicht die Herstellung einer zweifach gekrümmten Schale aus einer ebenen Ausgangslage. Zu Beginn des Herstellungsvorganges wird eine kreisrunde Platte aus Beton hergestellt, die keilförmige Aussparungen enthält. In diesen keilförmigen Aussparungen sind keilförmige Pneus mit Hilfe von Kederschienen montiert, die eine Verbindung zwischen den Betonelementen herstellen. 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 formt sich schließlich von einer Platte zu einer zweifach gekrümmten Schale. Da in den pneumatischen Keilen ständiger Überdruck herrscht, besteht während des Umformungsprozesses, bei dem sich die keilförmigen Öffnungen zu einer Planfuge mit konstanter Dicke schließen, kein Stabilitätsproblem durch das Zusammendrücken dieser Keile. Durch die Befestigung mit Kederschienen können die Pneus nach Fertigstellung der Schale einfach entfernt und gegebenenfalls wiederverwendet werden.

Da die einzelnen Betonelemente während des Herstellungsvorganges sehr stark verkrümmt werden, muss eine Beton- Bewehrungskombination eingesetzt werden, die diese Krümmungen aufnehmen kann. Im Zuge von Voruntersuchungen wurden zentrische Zugversuche und 4-Punkt-Biegeversuche an unterschiedlich bewehrten rechteckigen Betonplatten durchgeführt. Als Bewehrung wurden, basierend auf den Ergebnissen, Edelstahlseile mit 5mm Durchmesser, 7x19 Litzen und einer Zugfestigkeit von 1570N/mm<sup>2</sup> gewählt. Diese können einfach eingebaut werden und garantieren eine gleichmäßige Dehnungsaufnahme.

Im Vergleich zu den aus der Literatur bekannten pneumatischen Schalungen kann mit PFHC entscheidend von einer rotationssymmetrischen Schalenform abgewichen werden. Wird die ebene Platte am Boden mit entsprechender Genauigkeit hergestellt und werden alle keilförmigen Aussparungen während des Verformungsprozesses nach Plan geschlossen, so kann garantiert werden, dass die Endform der Schale nur geringe Abweichungen zur Referenzgeometrie aufweist. Für die Herstellung der ebenen Betonplatte ist lediglich eine einfache Abschalung der Elemente notwendig und es kann im Vergleich zu den oben genannten pneumatischen Schalungssystemen anstatt von Spritzbeton bzw. stückweise langsam und gleichmäßig aufgebrachtem Ortbeton konventionell betoniert werden. Dies ermöglicht eine genauere und raschere Arbeitsweise und vor allem einen höheren Qualitätsstandard des Betons.

Das mögliche Einsatzspektrum des neu entwickelten Bauverfahrens reicht von einer simplen Grünbrücke (z.B. Wildquerung) durch das Einschneiden von 2 Portalen bis hin zur Verwendung bei Veranstaltungspavillons. Das Bauverfahren konnte im Rahmen von zwei Großversuchen an einer Kugelschale mit 13m Durchmesser und 3,2m Höhe (Abbildung 1) und einer Freiformschale mit den Abmessungen von 17,6x10,8m und einer Höhe von 2,9m (Abbildung 2) erfolgreich baupraktisch überprüft werden.

[1] *Nose, T.*: Process of Constructing Culverts of Pipes of Concrete, U.S. Pat. 1,600,353, 1926.

- [2] *Neff, W.:* Building construction, U.S. Pat. 2,270,229, 1941.
- [3] *Head, J.:* No Nails, No Lumber – The Bubble Houses of Wallace Neff. Princeton Architectural Press, New York, 2011.
- [4] *Mathews, C.B. et al.:* Inflatable Core for Use in Casting Hollow Concrete Units, U.S. Pat. 2,485,898, 1949.
- [5] *Mora, R.L.:* Inflatable Construction Panels and Method of Making Same, U.S. Pat. 3,388,509, 1968.
- [6] *Heifetz, H.:* Inflatable Forms, U.S. Pat. 3,643,910, 1972.
- [7] *Bini, D.:* A new pneumatic technique for the construction of thin shells. International Association for Shell Structures, Proceedings from the 1<sup>st</sup> IASS International Colloquium on Pneumatic Structures, University of Stuttgart, Germany. 1967.
- [8] *Bini, D.:* Concrete Domes. Official Journal of the Masters Builders' Association of New South Wales, Vol. 3, Nr. 7, 1974.
- [9] *Bini, D.:* Building with Air. Butler Tanner and Dennis, UK, 2014.
- [10] *South, D.B.:* Economics and Thin Shell Dome. Concrete International Magazine, Vol. 12, No. 8, 1990.
- [11] *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.
- [12] *Nicholls, R.L.:* Air-inflated fabric-reinforced concrete shells. U.S. Pat. 4,446,038, 1984.
- [13] *Schlaich, J., Bergermann, R.:* Pneumatische Schalung, Deutsche Patentanmeldung, DE3500153, 1985.
- [14] *Kromoser, B., Kollegger, J.:* Herstellung von Schalenträgwerken 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.
- [15] *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.
- [16] *Kromoser, B., Kollegger, J.:* Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century. Submitted to Structural Concrete (Journal of the fib). 2014.



Abbildung 1 Großversuch an einer rotationssymmetrischen Betonschale mit 13m Durchmesser und 3,2m Höhe



Abbildung 1 Großversuch an einer Freiformschale mit Endabmessungen von 17,6x10,8m und einer Höhe von 2,9m