

Die Herstellung von Betonschalen auf pneumatisch gestützten Schalungen

W. Sobek, Hannover und Stuttgart

Übersicht. Durch die Verwendung pneumatisch gestützter Schalungen erscheint es möglich, den Betonschalensbau nach einer Phase des Quasi-Stillstandes erneut zu beleben. In einem kurzen Abriss werden in dem nachfolgenden Aufsatz einige der wesentlichen Gesichtspunkte bei der Verwendung pneumatisch gestützter Schalungen angesprochen, bevor näher auf die bisher entwickelten Bauverfahren und die damit gemachten Erfahrungen eingegangen wird. Die abschließenden Literaturverweise ermöglichen eine weitergehende Information.

Concrete shells constructed on air-supported formwork

Contents. Air-supported forming seems to be able to revive the building of concrete shells. This focuses on a short discussion of the main aspects of this forming method, followed by a more detailed overall view of the variants of this type of formwork. The references given at the end of the survey allow a comprehensive information.

1 Einleitung

Die Schalen als vorwiegend durch Normalkräfte beanspruchte räumlich gekrümmte Strukturen gehören sicherlich zu den elegantesten und effektivsten Tragwerken, mit denen der entwerfende Ingenieur heute arbeiten kann. Um so bedauerlicher ist es, daß gerade der Bau von Betonschalen, also jener idealen Kombination zwischen Konstruktionsform und Konstruktionswerkstoff, in den vergangenen Jahrzehnten immer mehr zurückgegangen ist.

Die Gründe hierfür sind nahezu ausschließlich in der arbeitsintensiven und deshalb mit hohen Kosten verbundenen Herstellung der Schalung zu suchen (Bild 1). Der durch die Verwendung eines effizienten Tragwerkes und eines preiswerten Baustoffes erlangte Kostenvorsprung wird hierdurch zunichte gemacht, häufig ad absurdum geführt. Der Wunsch, den Betonschalensbau wieder zu beleben, setzt damit die Entwicklung geeigneter Schalungsverfahren voraus.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden eine Reihe von Entwicklungen zur Lösung des Schalungsproblems vorangetrieben [1–6]. Als wichtigste sind zu nennen:

- Freivorbau von Schalen
- Verwendung von Fertigteilen
- Torkretieren gegen ein engmaschiges Drahtnetz
- Herstellen der Schale auf einem speziell hierfür angeschütteten Erdhügel
- Herstellen der Schale auf einer pneumatisch gestützten Schalung.

Prof. Dr.-Ing. Werner Sobek ist Leiter des Instituts für Tragwerksentwurf und Bauweisenforschung der Universität Hannover sowie Inhaber eines eigenen Ingenieurbüros in Stuttgart und Hannover.

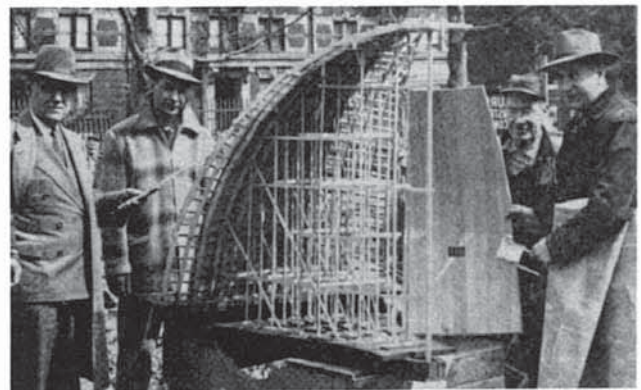


Bild 1. Ein Beispiel für eine Holzschalung, wie sie zur Herstellung doppelt gekrümmter Schalen häufig verwendet wurde.

Der aktuelle Erkenntnisstand weist der Methode der pneumatisch gestützten Schalungen eine besondere Bedeutung zu, da nur mit ihr die Forderungen

- schneller Auf- und Abbau der Schalung,
 - Realisierbarkeit nahezu beliebig räumlich gekrümmter Flächen, selbst über große Spannweiten,
 - mehrfache Verwendung der Schalung,
- erfüllbar sind. Diese Bauweise soll deshalb nachfolgend näher beschrieben werden. Dabei wird der Schwerpunkt auf die Erläuterung der verschiedenen Bauverfahren und die damit gemachten Erfahrungen gelegt.

Im Sinn einer knappen Darstellung wird bezüglich der wichtigen Fragen zu den verwendeten Membranwerkstoffen, von denen hauptsächlich PVC-beschichtete Polyestergewebe und Polyamidgewebe mit einer Beschichtung aus Synthekautschuk eingesetzt werden, auf die angegebene Literatur, insbesondere auf [1] verwiesen. Dort findet sich auch eine Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Beton in jungem Alter sowie eine ausführliche Diskussion des mit pneumatisch vorgespannten Membranen realisierbaren Formenspektrums. Vorwegnehmend soll hier jedoch bereits erwähnt werden, daß die überaus große Formenwelt der pneumatisch vorgespannten Membranen nicht auf Flächen mit positiver Gaußscher Krümmung beschränkt ist, sondern durch die Forderung nach der Nichtnegativität der Hauptmembrankräfte, also eine statische (Ungleichungs-)Bedingung, gekennzeichnet wird (Bild 2).

2 Die Methode der pneumatisch gestützten Schalungen

Eine pneumatisch gestützte Schalung besteht aus einer Schalungsmembrane, die mit den Methoden des textilen Bauens aus speziell zugeschnittenen Streifen eines beschichteten

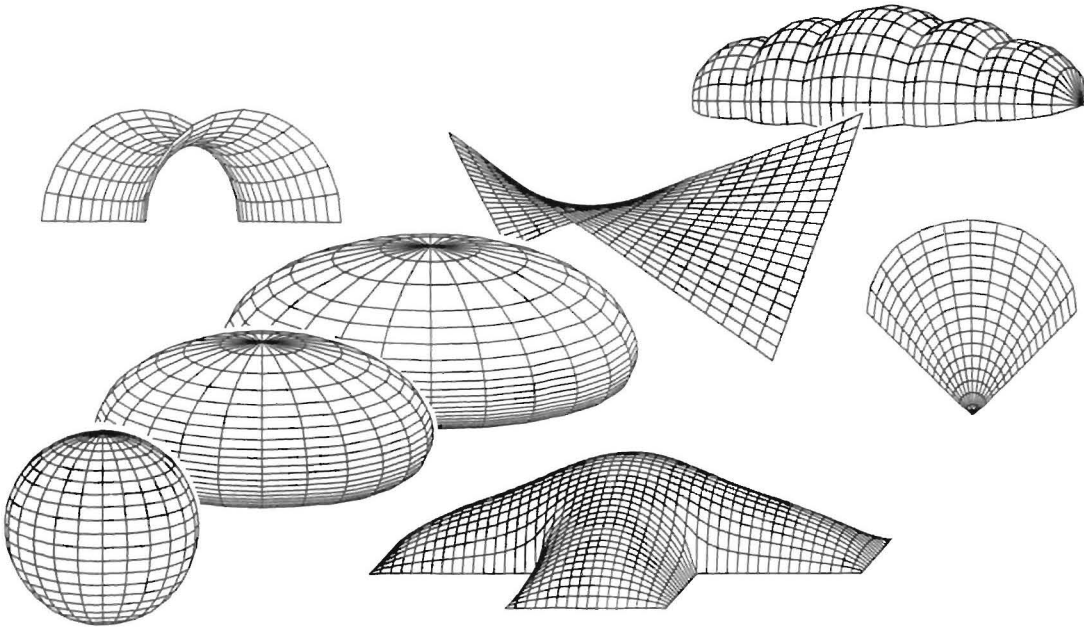


Bild 2. Ein kleiner Auszug aus dem Formenspektrum der pneumatisch bildbaren Tragwerke

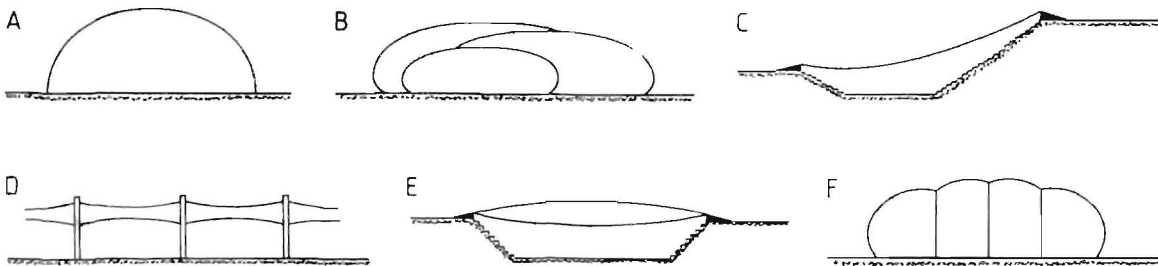


Bild 3. Die unterschiedlichen Möglichkeiten einer Stabilisierung der Schalungsmembrane. *A* Standardlösung: Die durch Luftüberdruck stabilisierte, traglufthallenartige Schalung; *B* Durch Luft- und Flüssigkeitsfüllung vorgespannte, tropfenähnliche Schalungshüllen; *C* Eine durch Unterdruck stabilisierte Membrane; *D* Eine Serie durch Unterdruck stabilisierter Membrankissen; *E* Ein durch Luftüberdruck vorgespanntes Kissen; *F* Eine durch aufgelagerte Seile strukturierte Hülle unter innerem Überdruck

Chemiefasergewebes zusammengefügt wird. Die Dicke dieser faltbaren, nur durch Zugkräfte beanspruchbaren Membranen liegt bei 1 bis 1,5 mm, ihr Gewicht beträgt zwischen 0,9 und 1,3 kg m⁻².

Durch Erzeugen einer Druckdifferenz zwischen ihrer Außen- und ihrer Innenseite wird die Schalungsmembrane vorgespannt. Üblicherweise wird dabei ein Luftüberdruck im Innenraum der Schalung erzeugt, es können jedoch auch unterdruckstabilisierte Systeme oder durch Flüssigkeitsdruck stabilisierte Systeme verwendet werden (Bild 3).

Durch die Höhe der Druckdifferenz werden die Kräfte in der Schalungsmembrane und deren Steifigkeit, das heißt ihre Nachgiebigkeit beim Aufbringen einer zusätzlichen Belastung, bestimmt. Das in Hinblick auf den Betoniervorgang wünschenswerte hohe Druckniveau muß dabei in nahezu allen Fällen reduziert werden zugunsten einer wirtschaftlich vertretbaren Dimensionierung der Schalungsmembrane und ihrer Fundation. Eine pneumatisch gestützte Schalung stellt damit stets eine vergleichsweise nachgiebige Schalungsfläche dar. Dies bedeutet bautechnisch keinen prinzipiellen Nachteil, es erfordert jedoch bezüglich Betonieretechnik und Betonetechnologie einige zusätzliche Überlegungen und Maßnahmen. Hauptursache hierfür sind die mechanischen Eigenschaften des Betons im Verlauf seiner Erstarrung und Erhärtung.

3 Die mechanischen Eigenschaften von Beton in den ersten Stunden nach dem Einbau

Eine pneumatisch gestützte Schalung verformt sich unter der Auflast des in einem üblicherweise kontinuierlichen Verfahren aufgetragenen Betons, aber auch infolge Windbelastung. Der auf der Schalung befindliche Beton folgt diesen Deformationen. Er unterliegt damit einem instationären Verformungszustand, der, je nach Stand der Festigkeitsentwicklung, auch zu einer mittragenden Wirkung der (unter Umständen erst teilweise fertiggestellten) Betonschale führt.

Zur Abschätzung der mittragenden Wirkung des Betons, aber auch zur gezielten Vermeidung einer Schädigung des Betongefüges, ist die Kenntnis der zeitlichen Entwicklung der mechanischen Eigenschaften von Beton erforderlich.

Qualitativ verläuft diese zeitliche Entwicklung stets nach dem gleichen Muster. Durch die Hydratation des Zementleims bedingt, ist eine kontinuierliche Zunahme der Druck- und der Zugfestigkeit zu beobachten (Bild 4). Damit einher geht eine Zunahme des Elastizitätsmoduls, während das anfänglich noch sehr große Verformungsvermögen laufend abnimmt, um im Zeitraum von ca. 8 bis 12 Stunden nach dem Anmachen ein Minimum zu erreichen (Bild 5). In diesem durch Betonzusammensetzung, Zusatzmittel und Expositionsbedingungen bestimmten Zeitraum liegt eine kritische

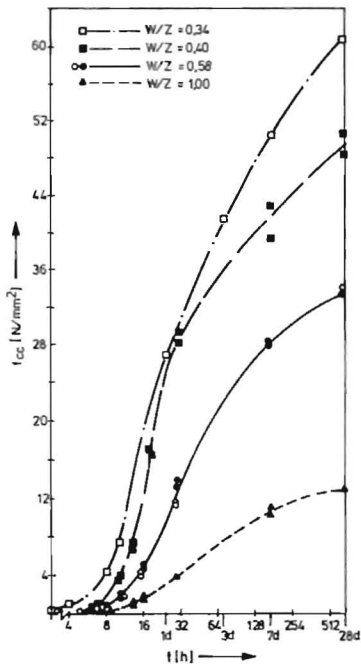


Bild 4. Die zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit

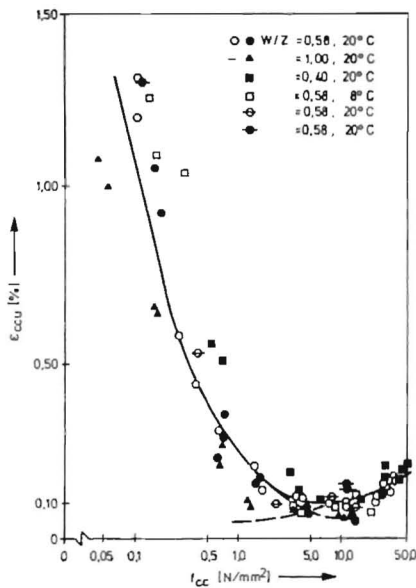


Bild 5. Die Abhängigkeit der Druckbruchdehnung von der aktuellen Betonfestigkeit

Phase des jungen Betons vor: Ein minimales Verformungsvermögen bei gleichzeitig noch niedrigen Festigkeiten. Insbesondere in dieser Phase des jungen Betons können zu große Deformationen der Schalung zu einer Schädigung des Betons führen.

Nach Durchlaufen der kritischen Phase nehmen die Bruchdehnungen geringfügig, die Bruchfestigkeiten und die Materialsteifigkeiten jedoch noch wesentlich zu [1].

4 Bauverfahren

Seit der erstmaligen Verwendung pneumatisch gestützter Schalungen, die ungefähr auf 1938 datiert werden kann, wurden eine Reihe von Verfahren entwickelt, mit denen das

Problem zu großer Deformationen der Schalung insbesondere während der kritischen Phase des jungen Betons reduziert oder umgangen wird. Im einzelnen können dabei folgende Methoden unterschieden werden [1-3]:

- Hochdrucksysteme
- Schalen mit lokal stark gekrümmter Schalenfläche
- Stabilisierung der Schalung durch die Bewehrung
- Aufbringen des Betons in mehreren Lagen
- Stabilisierung der Schalungsmembrane durch Kunststoffschäume
- Auflegen von Fertigteilen auf die Schalungsmembrane
- Verschieben der kritischen Phase des Betons auf einen Zeitraum nach Abschluß der Betonierarbeiten.

Nachfolgend werden, in Form einer Auflistung, die wichtigsten Varianten der Bauweise beschrieben.

4.1 Hochdrucksysteme

Diese Systeme sind generell dann sinnvoll anwendbar, wenn die Schalung sehr kleine Krümmungsradien aufweist. Die Membrankräfte verbleiben dann in einem wirtschaftlich vertretbaren Bereich. Hochdrucksysteme, die üblicherweise das Einbringen des Betons in einer Lage ermöglichen, verwendete man bereits seit 1938 für die Herstellung von Rohrleitungen (Bild 6). In Form dünner Schläuche werden sie vereinzelt zur Herstellung von Leichtbaudeckenplatten eingesetzt.

Als eine Variante der Hochdrucksysteme kann die von H. Heifetz entwickelte halbkugelförmige Schalung angesehen werden, die mit Hilfe einer speziellen Unterkonstruktion aus radial angeordneten Fachwerkbindern eine kräftemäßig in sich kurzgeschlossene Schalung bietet [8]. Um 1970 wurden mit dieser Schalungsmethode in Israel eine Vielzahl kleinerer Wohneinheiten hergestellt (Bilder 7, 8).



Bild 6. Die wahrscheinlich erste Anwendung pneumatisch gestützter Schalungen: Leitungssystem in Italien. 1938

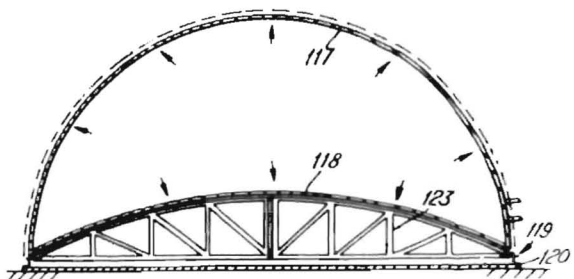


Bild 7. Aus der Patentschrift von H. Heifetz entnommene Abbildung



Bild 8. Eine Siedlung mit kleinen Wohnhäusern in Israel, die nach dem Verfahren von H. Heifetz hergestellt wurden.

Eine weitere Variante der Hochdrucksysteme stellen die flüssigkeitsgefüllten Schalungen dar, die insbesondere zur Herstellung von Behältern geeignet sind (Bild 9).

4.2 Schalen mit lokal stark gekrümmter Oberfläche

Schalungsformen mit geringer Krümmung, so wie sie immer wieder bei Überdachungen mit größeren Spannweiten auftreten, führen in den meisten Fällen zu hohen Kräften in der Schalungsmembrane bei gleichzeitig großer Nachgiebigkeit der Schalung. Aus architektonischen Erwägungen und auch aus Überlegungen zum Beulverhalten bietet sich bei großen und flach gekrümmten Betonschalen eine Strukturierung der Schalenform in dem Sinn an, daß durch Schaffung von Rippenstrukturen bei Einbehaltung der geringen globalen Krümmung große lokale Krümmungen erzeugt werden. Derartige Strukturierungen können mit pneumatisch gestützten Schalungen sehr einfach realisiert werden, beispielsweise durch Auflegen von Seilen oder Seilnetzen oder durch Einarbeiten von textilen Gurten. Sie eignen sich damit natürlich generell für eine Kombination mit den anderen hier dargestellten Herstellungsmethoden.

Bei der in Bild 10 dargestellten Schalung für ein Regenwasserüberlaufbecken wurde durch Auflegen radial angeordneter Seile eine Strukturierung der Schalungsform erzielt, die das Ansteuern eines relativ hohen Innendruckes ermöglichte, obwohl die Schalungsmembrane nur eine mittlere Festigkeitsklasse hatte. Aufgrund der dadurch gleichzeitig verbesserten Form der Betonschale konnte auf eine Bewehrung der Schale im oberen Teil weitestgehend verzichtet werden.

4.3 Stabilisierung der Schalungsmembrane durch die Bewehrung und Aufbringen des Betons in mehreren Lagen

Diese 1948 von W. Neff entwickelte und patentierte Methode stellt den eigentlichen Durchbruch in der Entwicklung pneumatisch gestützter Schalungen dar [7] (Bild 11). Neff gelang erstmals die Herstellung größerer Bauwerke. Ermöglicht wurde dies durch den Kunstgriff, die Schalungsmembrane durch nachträgliche Druckerhöhung gegen die Bewehrung zu verspannen und so eine kombinierte Tragwirkung zu erzielen, sowie durch die Verwendung eines in mehreren Lagen aufgetragenen Spritzbetons (Bild 12).

Bis heute wurden mehrere hundert Schalen und Behälter nach Neffs Methode errichtet, darunter auch die Schalen von H. Harrington, die Spannweiten bis zu 65 m bei Höhen

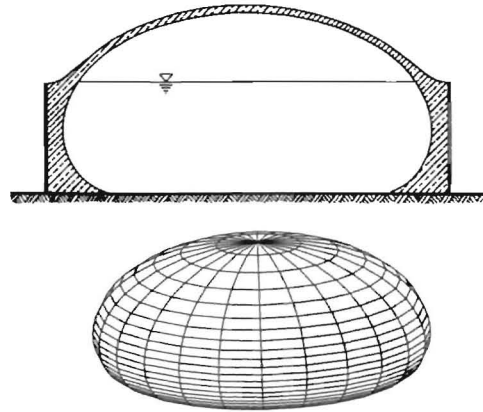


Bild 9. Ein Vorschlag zur Herstellung von Behältern mit einer teilweise flüssigkeitsgefüllten Schalung.

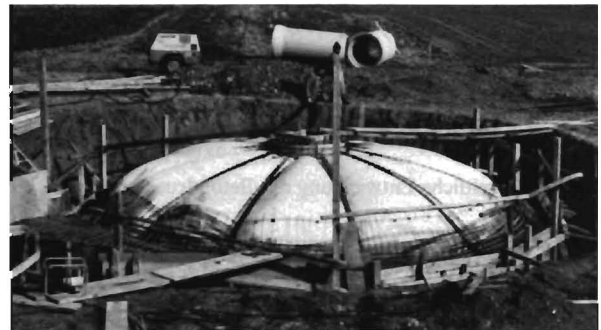


Bild 10. Ein später erdüberdecktes Regenwasserüberlaufbecken während der Herstellung.

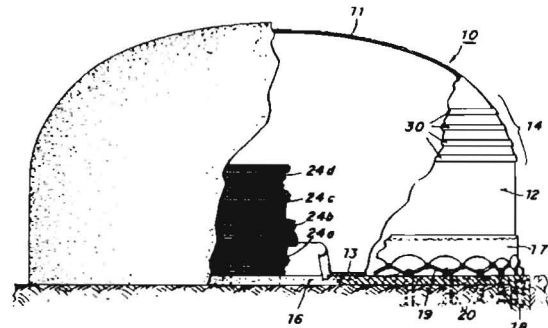


Bild 11. Aus der Patentschrift von W. Neff entnommene Abbildung



Bild 12. Verfahren nach Neff: Torkretieren auf die Außenseite der Schalung

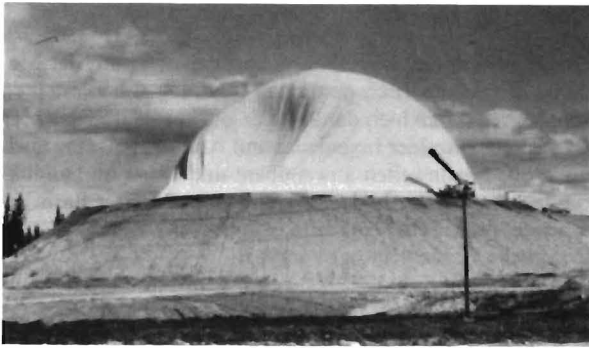


Bild 13. Eine kuppelförmige Schalungsmembrane während des Aufblasens



Bild 15. Die erste Lage des Betons ist aufgebracht



Bild 14. Die in Bild 13 dargestellte Schalung während des Betoniervorgangs

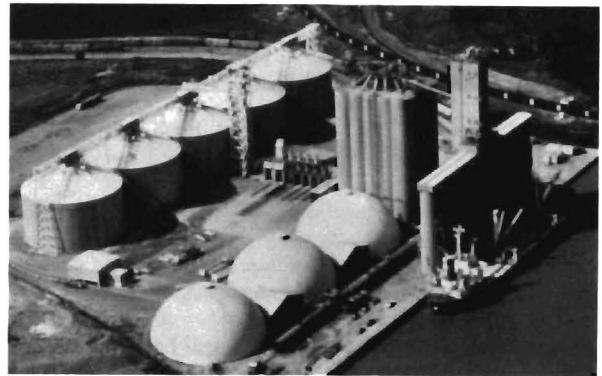


Bild 16. Drei fertiggestellte Schalen. Die Schalungsmembrane verbleibt als Außenhaut, die PU-Schale dient als Wärmedämmung

bis zu 35 m besitzen (Bilder 13, 14). Bei den Schalen von Neff und Harrington wurde üblicherweise auf die Außenseite der Schalung betoniert und diese nach dem Erhärten der Schale wiederverwendet. In einigen wenigen Fällen wurde auch schon von innen gegen die Schalungsmembrane torkretiert und diese dann abschließend als Abdichtung auf der Betonschale belassen. Hierbei wurden allerdings immer wieder Probleme mit der Haftung des frischen Betons an der Schalungsmembrane festgestellt.

4.4 Stabilisierung der Schalungsmembrane durch Kunststoffschäume

Dieses vom kalifornischen Architekten Lloyd Turner entwickelte Verfahren beruht auf einer schichtweisen Versteifung der Schalungsmembrane durch Aufspritzen von Kunststoffen. Besonders bewährt haben sich hierbei nach dem Aufspritzen aufschäumende und sofort verfestigende Polyurethane. Eine derartige PU-Schäumung wird lagenweise aufgebracht, üblich sind 3 bis 4 Schichten mit einer Dicke von jeweils 2 bis 4 cm. Während des Spritzvorgangs werden spezielle Verankerungselemente eingearbeitet. Sie dienen der späteren Befestigung der Bewehrung. Anschließend wird der Beton als Spritzbeton in 2 bis 3 Lagen aufgebracht (Bild 15).

Die Kunststoffe und anschließend der Beton werden vorwiegend von innen auf die Schalungsmembrane aufgetragen. Da sich die Polyurethanschale fest mit der Schalungsmembrane verbindet, wird diese als Wasserdichtung auf der Schale belassen. Die zwischen der Außenhaut und der Betonschale verbleibende Polyurethanschale dient als Wärmedämmung.

Das Verfahren wird von mehreren Firmen insbesondere in den USA seit langer Zeit erfolgreich angewendet (Bild 16).

Bisher wurden mehrere hundert Schalen und Behälter nach diesem Verfahren hergestellt, darunter die von Dome Systems realisierte Rekordspannweite von 105 m.

Die Bauzeiten sind bei diesem Verfahren sehr kurz, da alle Bauarbeiten in dem durch die Schalung gebildeten wettergeschützten Innenraum stattfinden.

Die Vorteile des Verfahrens hinsichtlich problemloser Integration der Wärmedämmung in den Baufortschritt,

Arbeiten im wettergeschützten Raum

haben in letzter Zeit zu einer Reihe von erfolgreichen Anwendungen im europäischen Raum geführt. Mehrere Anwendungen in Deutschland befinden sich in der Planungsphase.

4.5 Auflegen von Fertigteilen auf die Schalungsmembrane

Der Grundgedanke des Verfahrens besteht darin, einzelne Fertigteile auf die pneumatisch gestützte Schalung zu legen. Dabei eventuell auftretende größere Deformationen der Schalung können akzeptiert werden, solange die Lagesicherung der einzelnen Fertigteile durch einfach herzustellende Scharnierwirkungen gewährleistet ist. Das Vergießen der Betonfertigteile findet erst nach dem Abschluß der Verlegearbeiten statt. Der größte Teil der Schale ist dann bereits montiert, durch die geringe Masse des zusätzlich eingebrachten Vergußbetons werden nur kleine zusätzliche Deformationen hervorgerufen (Bild 17). Diese Baumethode wurde bisher noch nicht angewendet. Mehrere Studien, darunter für eine Überdachung mit einer Spannweite von 100 m, liegen vor.

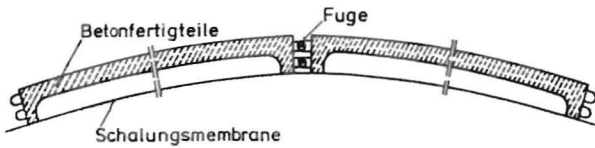


Bild 17. Fertigteile, wie sie auf eine pneumatisch gestützte Schalung aufgelegt werden können



Bild 18. System Bini: Die Schalung wird durch Luftüberdruck hochgehoben.

4.6 Verschieben der kritischen Phase des Betons auf einen Zeitraum nach Abschluß der Betonarbeiten

Neben dem nicht weiter erläuterten, weil bautechnisch mit Schwierigkeiten behafteten, Verfahren von Nicholls [1], ist hier das allgemein bekannte Verfahren nach D. Bini zu nennen [9]. Bei dieser Variante wird die an ihrem Rand mit der Fundation verbundene Schalungsmembran in regelmäßiger Faltung eben ausgelegt. Die danach aufgelegte Bewehrung besteht aus linienförmigen Elementen, die jeweils aus einem Spiralstab und einem in den Spiralstab eingelegten geraden Stab bestehen. Der mit Verzögerern behandelte Beton wird anschließend auf die ebene Schalung aufgebracht und mit einer zweiten Membrane abgedeckt. Nach Abschluß dieser Arbeiten wird das Gesamtpaket durch Einblasen von Luft in kurzer Zeit hochgehoben (Bild 18).

Während dieses Hubvorgangs gleiten die geraden Bewehrungsstäbe relativ zu den Spiralstäben. Die Verdichtung des Betons erfolgt unmittelbar nach Abschluß des Hubvorgangs mit Hilfe von Außenrüttlern. Nach ca. 36 Stunden wird der Luftüberdruck abgelassen, die Schale kann durch einfaches Abziehen der anschließend wiederverwendbaren Membrane ausgeschalt werden.

5 Ausblick

Ein Rückblick auf die bisher mehr als tausend mit der Methode der pneumatisch gestützten Schalungen hergestellten Schalen zeigt, daß hier, dank des Engagements und des Muttes weniger einzelner Ingenieure und Architekten, eine auch für große Spannweiten anwendbare und sicher zu handhabende Schalungsmethode vorliegt. Der auf breiter Basis beruhende praktische Erfahrungsstand wird durch wissenschaftliche Untersuchungen ergänzt.

Ein Rückblick auf die bisher mit der Methode der pneumatisch gestützten Schalungen hergestellten Schalen zeigt aber auch, daß nahezu alle bisherigen Anwendungen eine Kuppelform haben. Angesichts der Vielfalt der Formen, die mit pneumatisch vorgespannten Membranen herstellbar sind, ist dies zu bedauern. Denn es sind gerade die pneumatisch gestützten Schalungen, durch die neben Nutzungs- und Kostengesichtspunkten auch hohe formale Qualitäten erfüllt werden können. Die heute verfügbaren Formfindungs- und Berechnungsmethoden ermöglichen es, auch vordergründig kompliziert erscheinende Formen zu entwerfen und zu bearbeiten. Für die mit der Herstellung der Schalungsmembranen betrauten Konfektionäre sind derartige Formen nichts Besonderes. Pneumatisch gestützte Schalungen sind damit ein geeignetes Hilfsmittel, um den Stahlbetonbau im Bereich des Schalenbaus und wahrscheinlich auch darüber hinaus zu neuen und innovativen Lösungen zu führen.

Literatur

1. Sobek, W.: Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. Stuttgart, 1987
2. Sobek, W.: Concrete Shells Constructed on Pneumatic Formwork, in: Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka (Japan), Amsterdam, 1986
3. Schlaich, J.; Sobek, W.: Suitable Shell Shapes, in: Concrete International, 8, 1986, H. 1
4. Sobek, W.: Betonschalen und pneumatisch vorgespannte Membranen. Deutsche Bauzeitung 124, 1990, H. 7.
5. Joedicke, J.: Schalenbau, Stuttgart, 1962
6. Otto, F.: Zugbeanspruchte Konstruktionen. Berlin, 1966
7. Neff, W.: Verfahren zur Herstellung von schalenförmigen Betonkonstruktionen auf einer inneren, aufblasbaren Schalung. Auslegungsschrift/052 103, Deutsches Patentamt
8. Heifetz, H.; Har'el, G.: Realisation of inflatable forms simplifies hastens and reduces costs of shell structures. Institute of Technology, Haifa, 1971, Publication No. 169
9. Morelli, G.: Cassaforme pneumatiche per la costruzione di cupole in cemento armato. L'Industria Italiana del Cemento, Juni 1978

Zuschriften

Zuschrift

Korrektur zum Beitrag **J. Cassens: Zum Kippen von Durchlaufträgern**. Bauingenieur 66 (1991) 429–435.

Die Momentendarstellungen in den Bildern 2 und 3 sind beim Druck verwechselt worden: Die Darstellung aus Bild 2 gehört in Bild 3, die aus Bild 3 in Bild 2.
J. Cassens, Bremen