

Pneu und Schale

Werner Sobek: Betonschalen und pneumatisch vorgespannte Membranen

Es gibt nur wenige Tragwerkstypen, mit denen so materialsparend und effizient gebaut werden kann wie mit den Schalen. Und es gibt außer Beton keinen Werkstoff, der sich auf einer Baustelle in beliebige Formen gießen läßt, dazu noch schnell erhärtend, preiswert und beständig ist. Schalen aus Beton also als die ideale Kombination von Konstruktionsform und Konstruktionswerkstoff, als reinste Form materialgerechten Bauens? Das Bauschaffen heute deutet nicht darauf hin [1, 2].

Betonschalen

Die große Blütezeit des Betonschalensbaus lag in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts. Namen wie Dischinger, Bauersfeld, Maillart, Torroja, Tedesco, Freyssinet, Nervi und Candela sind untrennbar mit Bauwerken verknüpft, deren natürliche Schönheit und Eleganz, deren Kühnheit bis heute Bewunderung hervorrufen.

In den letzten Jahrzehnten wurden kaum noch Betonschalen gebaut. Die wenigen Ausnahmen, und hierzu gehören die Schalen von Heinz Isler, bestätigen diese Entwicklung. Die Ursachen hierfür sind in den sehr hohen Kosten zu suchen, die durch das Erstellen einer räumlich gekrümmten Schalungsform entstehen (Bild 1). Nun wurde zwar in den vergangenen Jahren versucht, das Problem der teuren Schalungen zu lösen, hierzu gehören beispielsweise die Entwicklungen

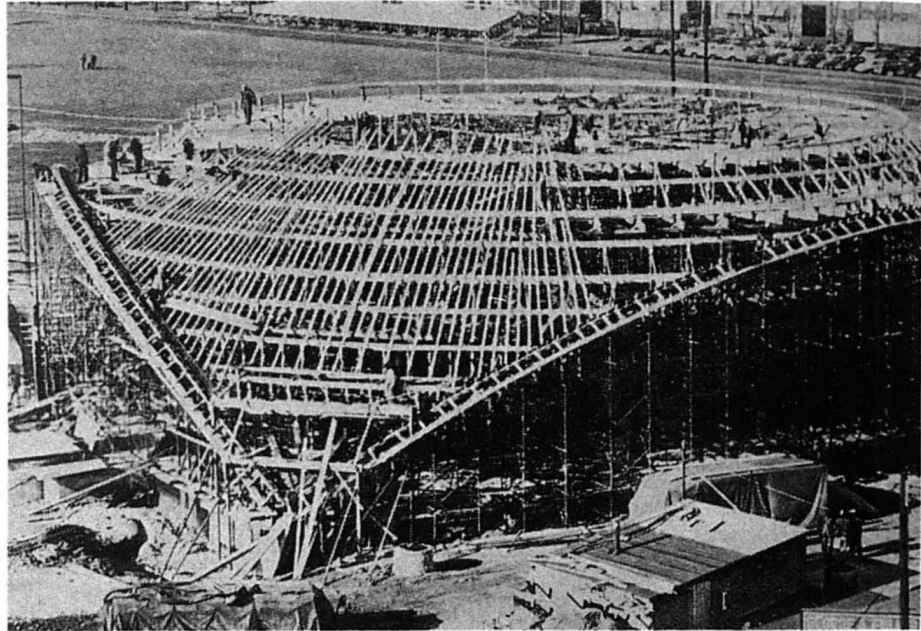
– Herstellung von Schalen aus Fertigteilen [3]

– Freivorbau von Schalen

– Herstellen der Schale auf einem speziell hierfür angeschütteten Erdhügel, alle diese Methoden sind allerdings bezüglich ihres Anwendungsbereiches sehr beschränkt, so daß sie sich schließlich kaum durchsetzen konnten. Das einzige Verfahren, das einen wirklichen Schub zur Wiederbelebung des Schalensbaus leisten könnte, scheint die Methode der pneumatisch gestützten Schalungen zu sein.

Pneu als Schalung

Die Idee, eine Hülle aus beschichtetem Gewebe durch Überdruck zu stabilisieren und dann als Schalung zu verwenden ist nicht neu, sie ist faszinierend und naheliegend: Die pneumatisch gebildeten Strukturen entstammen doch offensichtlich einer Formenwelt, die



derjenigen der Betonschalen verwandt ist. Die textilen Hüllen besitzen den hohen Grad an Vorfertigung, der zur Reduktion der Schalungskosten unbedingt erforderlich ist, und eine pneumatisch gestützte Schalung kann schnell aufgeblasen und auch wieder entlüftet werden, gegebenenfalls kann sie sogar mehrfach Verwendung finden. Die Methode der pneumatisch gestützten Schalungen wurde wahrscheinlich 1938 in Italien erstmals zur Herstellung von Wasserleitungen angewandt [2] (Bild 2). Die Bauweise wurde seitdem in einer Reihe von Varianten weiterentwickelt, in bautechnischer Hinsicht kann sie heute als erprobt und anwendbar angesehen werden [5,6]. Interessant und gleichzeitig zu bedauern ist jedoch, daß die Schalungsmethode bisher lediglich zur Herstellung von kuppelförmigen Schalen verwendet wurde. Der Formenreichtum der pneumatisch vorgespannten Strukturen blieb also ungenutzt und damit auch die Möglichkeit, endlich einmal freie und »ideale« Schalenformen zu vertretbaren Kosten herzustellen. Der Grund hierfür kann nur in einer Unsicherheit beim Entwerfen von Schalen und pneumatisch gebildeten Formen gesehen werden, obwohl doch die Überlegungen und Gesetzmäßigkeiten, welche die Geometrie der Betonschalen und die Geometrie der pneumatisch gebildeten Strukturen bedingen, sehr anschaulich und transparent sind.

Zum Entwerfen von Betonschalen

Schalentragwerke zeichnen sich wie alle hocheffizienten Tragwerke dadurch aus, daß »günstiger« Kraftfluß und Schalenform sich in ausgeprägter Weise gegenseitig bedingen. Da das Verhältnis von Schalendicke zu Schalenspannweite klein sein soll, ist im allgemeinen die Baubarkeit einer dünnen Schale erst mit der Entwicklung einer geeigneten Schalenform gegeben (Bild 3).

Der entwerfende Ingenieur wird eine Schale stets so formen, daß Biegebeanspruchungen weitgehend vermieden werden, daß die Schale ein ausgeprägt zweiaxiales Lastabtragungsverhalten besitzt und daß die dabei in der Schale entstehenden Spannungen möglichst gleichmäßig groß sind.

Man kann die Größe der auftretenden Spannungen und auch ihr Vorzeichen, ob es sich also um Druck- oder Zugspannungen handelt, durch die Formgebung der Schale steuern. Dadurch wird es möglich, auf die charakteristischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe einzugehen. Da Beton durch eine hohe Druck- und eine geringe Zugfestigkeit gekennzeichnet ist, wird man beim Entwerfen einer Betonschale stets versuchen, eine Tragwerksform zu entwickeln, die in dem als maßgebend erachteten Belastungszustand unter ausschließlicher Druckbeanspruchung steht. Der Werkstoff Beton erfährt hierdurch seine optimale Ausnutzung, die Menge an Bewehrungsstahl wird redu-

ziert, wodurch auch die kostenintensiven Verlegearbeiten verringert werden. Wenn man vom Fall der rotationssymmetrischen Schalen einmal absieht, dann entzieht sich der Entwurf einer solchen Schalenform allerdings einer Erarbeitung »von Hand«. Dies ist darin begründet, daß nicht nur eine räumlich gekrümmte Fläche zu definieren ist, sondern daß diese Fläche gleichzeitig eine Gleichgewichtsfigur mit bestimmten Eigenschaften, wie z. B. ausschließlicher Druckbeanspruchung, sein muß. Der Entwurf von Betonschalen erfolgt deshalb schon seit langem mit Unterstützung von Modellen, wobei man sowohl auf experimentelle wie auch auf computergestützte Modelle zurückgreift.

Experimentelle Formfindung

Die experimentellen Methoden haben den Vorteil großer Anschaulichkeit, sie lassen das prinzipielle Tragverhalten sehr schnell erkennen, und sie lassen sich leicht an einen neuen Entwurfsgedanken anpassen.

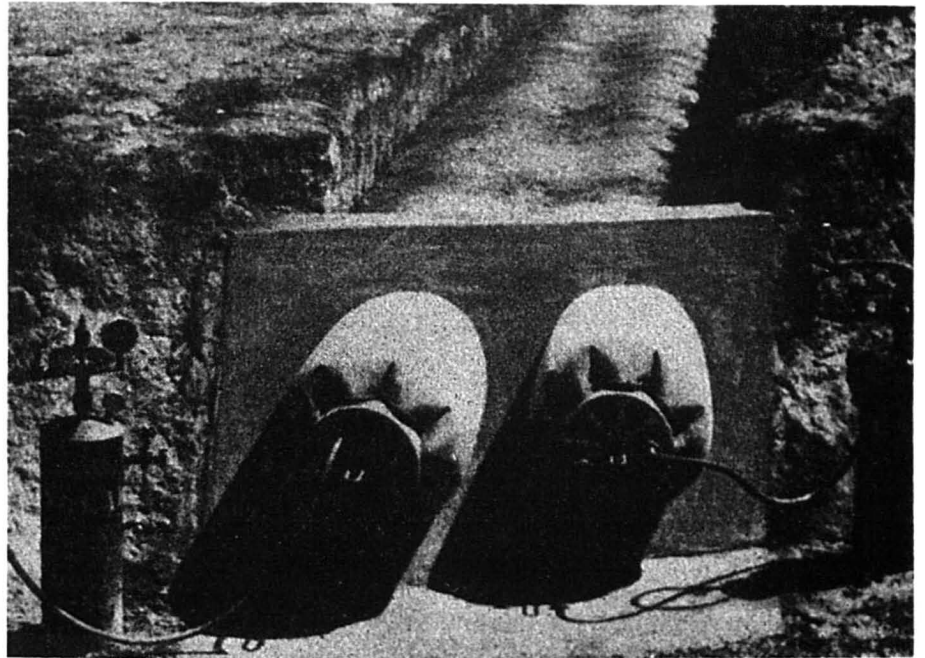
Im wesentlichen kann man die experimentellen Methoden in folgende Gruppen einteilen:

- Hängemodelle
- Fließformen
- Pneumatisch gebildete Formen.

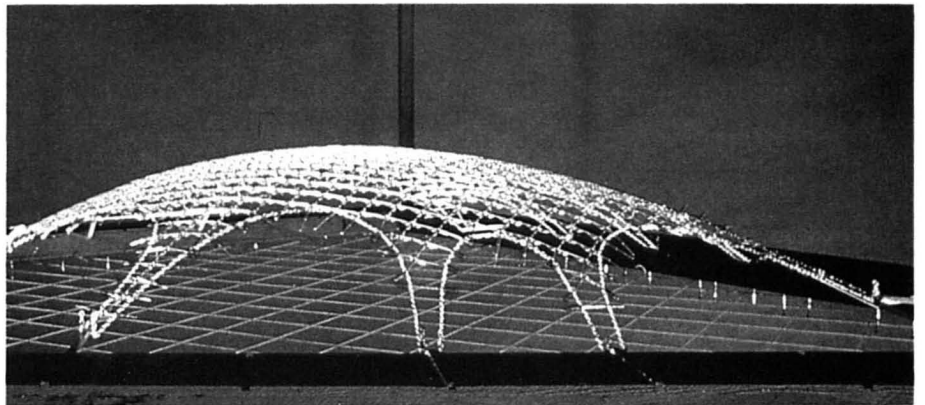
Interessanterweise sind alle diese Formen zugbeanspruchte Konstruktionen. Der Grund dafür liegt darin, daß sich eine stabile Gleichgewichtsform bei einer zugbeanspruchten Struktur im Modell sehr einfach, bei einer druckbeanspruchten Form eigentlich nur in wenigen Fällen erarbeiten läßt.

Das Arbeiten mit zugbeanspruchten Modellen basiert auf dem Gedanken der Umkehrform: Eine unter einer bestimmten Belastung ausschließlich zugbeanspruchte Konstruktion steht bei Umkehr der Lastrichtung unter einer ausschließlichen Druckbeanspruchung. Zur Formfindung einer Schale, die bei Eigengewichtsbelastung unter Druckbeanspruchung steht, genügt es also, die Form einer »auf dem Kopf« stehenden, zugbeanspruchten Konstruktion zu ermitteln (Bilder 3, 4).

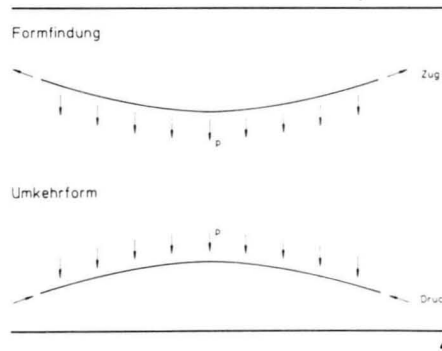
Bei einem hängenden Drahtnetz kann man keine Aussagen darüber machen, inwieweit eine homogene Materialausnutzung vorliegt. Beim Arbeiten mit Fließformen wird versucht, dieses Problem zu umgehen: Spezielle Wachs- und Kunststoffplatten beginnen bei Er-



2



3



4

1 Ein klassisches Beispiel für eine Schalung, deren Herstellungskosten die der Betonschale übersteigen

2 Die Anfänge: Herstellung von zwei Rohrleitungen mit pneumatisch gestützten Schalungen. Italien, 1938

3 Ein Beispiel zu den experimentellen Formfindungsmethoden: Entwicklung der Geometrie einer druckbeanspruchten Betonschale über eine zugbeanspruchte Hängeform. Schale für das Sozialamt der Bundespost, Stuttgart

4 Experimentelle Formfindung von Betonschalen: Die im Modell relativ einfach herzustellende Hängeform steht ausschließlich unter Zugbeanspruchung. Bei Umkehr der Belastungsrichtung oder bei Umkehrung der Form stellt sich eine ausschließliche Druckbeanspruchung der Schale ein

wärmung, sich in eine neue Gleichgewichtsform »hineinzuhängen«. Bei geeigneter Wahl der viskoplastischen Eigenschaften der Modellbauwerkstoffe geht man davon aus, daß sich im Modell ein relativ homogener Spannungszustand einstellt. Das Arbeiten mit Fließmodellen ist allerdings wesentlich umständlicher als die Arbeit mit Hängemodellen. Sie werden deshalb nur sehr wenig angewandt.

Bei den pneumatisch gebildeten Formen werden beispielsweise dünne Gummihäute durch Luft- und/oder Flüssigkeitsdruck in eine neue Form gebracht. Bei geeigneter Wahl des Modellbauwerkstoffes kann dabei ein relativ homogener Spannungszustand in der Haut erzielt werden. Es ist aber auch hier, wie schon bei den Fließformen, prinzipiell nicht möglich, genauere Aussagen über den Spannungsverlauf in der Fläche zu machen. Durch die Arbeit mit Seifenhäuten kann man dieses Problem umgehen. Die Eigenschaften der Seifenhautfilme garantieren ein vollkommen homogenes Spannungsbild in der aufgespannten Fläche.

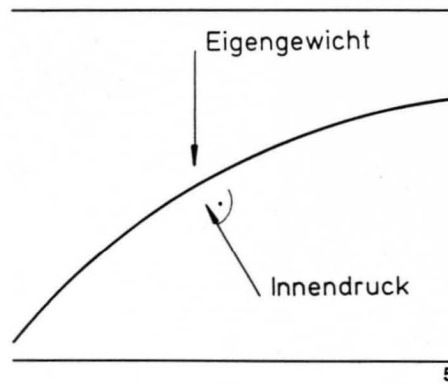
Mit den pneumatisch verformten Membranen läßt sich im Modell sehr einfach arbeiten, ihre Anwendung ist deshalb weit verbreitet. Da eine Druckbelastung aber stets senkrecht zur Oberfläche wirkt, ergeben sich bei stark aus der Horizontalen verformten Häuten deutliche Abweichungen zwischen der Lastrichtung aus Druck- und der aus Eigengewichtsbelastung (Bild 5). Die Methode findet bei der Formfindung von Betonshalen hier ihre Grenzen.

Computergestützte Formfindung

Die computergestützten Formfindungsmethoden sind für die ersten Entwurfschritte häufig nicht anschaulich genug und manchmal zu zeitaufwendig in der Manipulation der Vorgaben. Sie werden deshalb üblicherweise einer Vorklärung der Formfindungsaufgabe mit einem (experimentellen) Modell nachgeschaltet. Hier erweisen sie sich dann jedoch als ideales Entwurfswerkzeug.

Die computergestützten Methoden lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen:

- Indirekte Methoden (Deformationsmethoden)
- Direkte Methoden.



Die indirekten oder Deformationsmethoden stellen eine numerische Simulation der experimentellen Methoden dar.

Es wird dabei jeweils eine vorgegebene Ausgangsform durch Aufbringen einer Belastung so lange verformt, bis die sich einstellende Geometrie auch die übrigen Entwurfsanforderungen erfüllt. Durch die Art der Belastung und durch die Materialeigenschaften, die der zu verformenden Struktur gegeben sind, lassen sich Hängemodelle, Fließformen und pneumatisch vorgespannte Formen berechnen.

Die am häufigsten verwendete Deformationsmethode beruht auf der Methode der Finiten Elemente in der geometrisch nichtlinearen Formulierung [9]. Die Verfahren auf der Basis der Vektoranalysis sowie auf Sonderformen beschränkte Algorithmen werden nur von wenigen Autoren verwendet [10].

Ähnlich wie bei den experimentellen Methoden läßt sich bei den indirekten Methoden ein nicht vollständig befriedigendes Endergebnis einer Berechnung nur durch Änderung der Vorgabedaten und anschließende Neuberechnung, also auf indirektem Weg, verbessern. Dabei ist es sehr schwierig, teilweise auch unmöglich, bestimmte Spannungszustände in der Struktur zu erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist die Aufgabe, eine Betonshale mit konstanten Spannungen unter Eigengewicht durch Verformen einer Gummihaut zu berechnen. Zwar läßt sich auch hier durch Zuschalten eines Steueralgorithmus die Ergebnisqualität verbessern, die indirekten Methoden sind allerdings vom Ansatz her zur Lösung derartiger Probleme nicht geeignet und deshalb den direkten Methoden weit unterlegen.

Die direkten Methoden erlauben die Berechnung einer Struktur, die, bei gegebenen geometrischen Randbedingungen, unter dem Formfindungslastfall einen vorgegebenen Spannungszustand besitzt. Sie erzielen damit eine Form mit dem gewünschten Spannungszustand auf direktem Weg. Die Ausgangsform im üblichen Sinn ist unbekannt oder ohne Belang, da sie lediglich als durch Überlegungen zur numerischen Stabilität bedingter »Startwert« für die Berechnung vorgegeben werden muß und daher manchmal physikalisch nicht zulässig zu sein braucht (z. B. Verstoß gegen die Gleichgewichtsbedingungen).

Die bekanntesten der direkten Methoden sind:

- Die Kraftdichtemethode, die von Linkwitz, Preuss und Schek entwickelt wurde [11]
- Die numerische Lösung des die Membranschale beschreibenden Differentialgleichungssystems, wie sie der Autor in [2] formuliert hat
- Indirekte Methoden in Kombination mit einer Optimierungsstrategie.

Während bei den Deformationsmethoden stets eine Lösung bestimmbar ist, eine (die) zulässige Ausgangsform ist ja bekannt, kann bei den direkten Methoden über die Existenz einer Lösung zunächst keine Aussage gemacht werden: Man kann sich sehr leicht einen Formfindungslastfall und einen vorgegebenen »gewünschten« Spannungszustand vorstellen, die durch keine Geometrie vereinbar sind. Umgekehrt gibt es auch Fälle einer mehrfachen Lösung, wie beispielsweise zwei Seifenhautflächen innerhalb des gleichen Drahtrahmens [12].

Mit den direkten Methoden lassen sich »spannungsoptimale« Strukturen entwerfen, also beispielsweise Seifenhäute als Membranen gleicher Spannung, Türme mit konstanter Spannung im Schaft oder auch Fachwerkstrukturen, bei denen die einzelnen Elemente bestimmte Spannungsvorgaben wie »Nur Zug«, »Nur Druck« usw. erfüllen. Zu sehr interessanten Lösungen führt die Anwendung der indirekten Methoden natürlich beim Entwurf von Betonshalen, da man mit ihnen sehr homogen ausgenutzte Strukturen entwerfen kann und damit zu einer ideal auf die Eigenschaften des Werkstoffes abgestimmten Tragwerksform findet.

Pneumatisch vorgespannte Membranen

Pneumatisch vorgespannte Membranen sind dünne, biegeeweiche, nur durch Zugkräfte beanspruchbare Häute, die entweder selbst oder zusammen mit einem anderen Bauteil eine in sich abgeschlossene Hülle bilden. Diese Hülle ist mit einem Medium wie Luft, Wasser oder Ähnlichem gefüllt. Durch eine Druckdifferenz zwischen dem Medium und der Umgebung wird die Membrane vorgespannt (Bild 6).

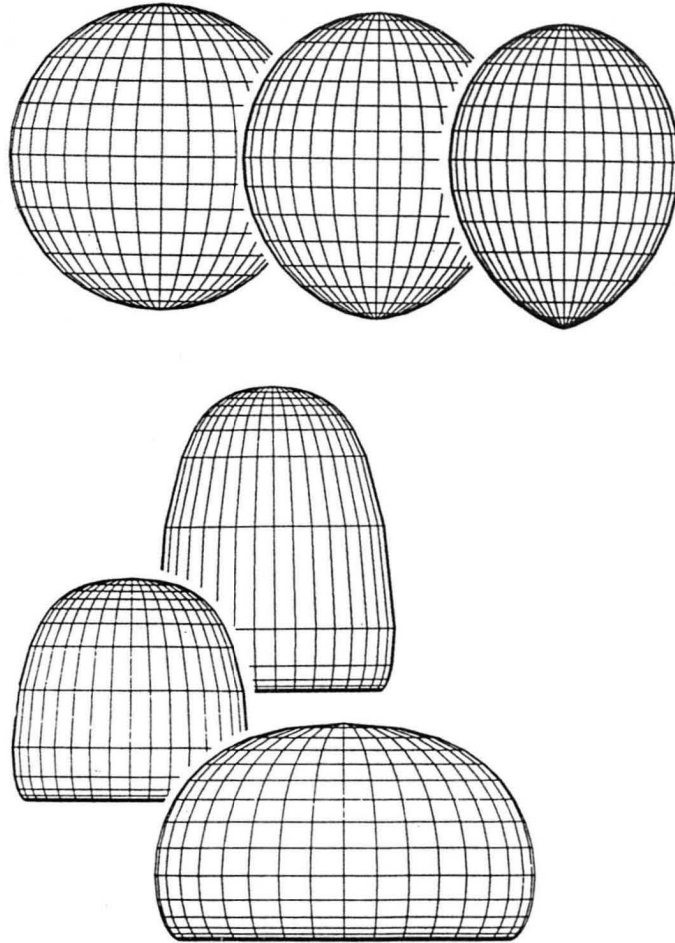
Je nach Kombination der Füllmedien, wobei üblicherweise eine Luftfüllung verwendet wird, und einem Druck in der Hülle, der über oder unter dem Umgebungsdruck liegen kann, läßt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Tragwerke entwickeln, siehe Bild 7 und insbesondere [8].

Pneumatisch vorgespannte Membranen sind als Tragwerke besonders dann geeignet, wenn die äußeren Lasten gleichmäßig verteilt sind und wenn sie dem Innendruckvektor entgegenwirken: Der Innendruck übernimmt dann direkt die Abtragung der äußeren Lasten, das Füllmedium wird zum tragenden Baustoff: Eine flache Haut unter einer Schneeauflage könnte man nahezu beliebig weit spannen.

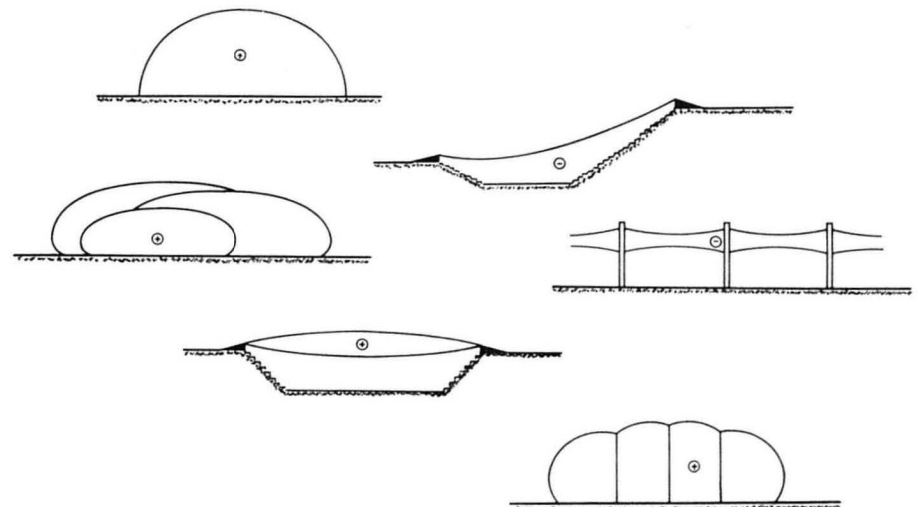
Ungleichmäßig verteilte Belastungen führen bei pneumatisch vorgespannten Membranen stets zu vergleichsweise großen Verformungen, die sich nur durch eine Erhöhung des inneren Überdrucks reduzieren lassen, was bei schwach gekrümmten Strukturen allerdings schnell zu sehr hohen Kräften in der Membrane führt. Man versucht deshalb, durch eine geeignete Formgebung der pneumatisch gestützten Struktur eine erhöhte Steifigkeit zu geben. Dies erreicht man, auch bei insgesamt nur schwach gekrümmten Formen, durch eine Erhöhung der lokalen Krümmungen. Aufgelegte Seile, Seilnetze, lokale Abspannungen und andere strukturierende Elemente sind hier geeignete Mittel.

Lokale Lastanhäufungen sollten, dem Grundgedanken des Tragwerktyps entsprechend, bei pneumatisch gespannten Strukturen stets vermieden werden.

Ähnlich wie bei den Betonschalen entzieht sich das Entwurfsproblem einer Lösung »von Hand«, man arbeitet deshalb wieder auf der Basis der bereits beschriebenen Formfindungsmethoden.



6

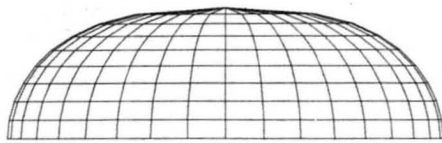


7

5 Während das Eigengewicht einer Betonschale immer in vertikaler Richtung wirkt, bedeutet Luft- oder Flüssigkeitsdruck stets eine Belastung senkrecht (normal) zur Fläche

6 Einige Beispiele aus der Formenwelt der durch Luftüberdruck und eventuelle Wasserfüllung gebildeten pneumatisch vorgespannten Strukturen

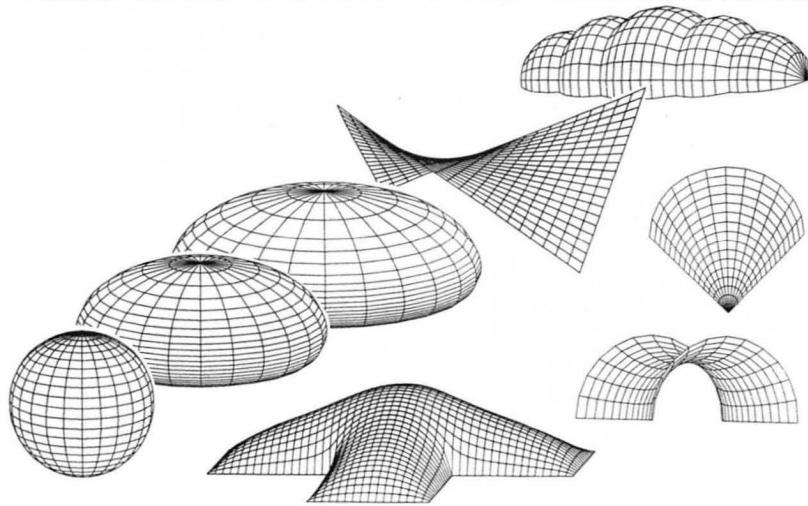
7 Die unterschiedlichen Möglichkeiten der pneumatischen Stabilisierung einer Schalungsmembrane. Neben den bekannten (Luft-) Überdrucksystemen sind Flüssigkeitsfüllungen, auch in Kombination mit Luftüberdruck, sowie Unterdrucksysteme möglich



8

Bei den experimentellen Methoden entfallen dabei natürlich die Hängemodelle.

Innerhalb des Entwurfsprozesses erfolgt die Formfindung einer pneumatisch aufgespannten Hülle auf der Basis der experimentellen Methoden oder der Deformationsmethoden genauso schnell wie bei einer Betonschale; die Anpassung an zusätzliche Randbedingungen, wie zum Beispiel ein vorgegebenes Nutzraumprofil, kann allerdings bedeutend schwieriger sein: Während man beim Entwurf von Betonschalen eine zweiachsigere Druckbeanspruchung (Druck-Druck) zwar anstrebt, in Sonderfällen aber immer noch auf einen lokal begrenzten Druck-Zug-Bereich, eventuell sogar Zug-Zug-Bereich ausweichen kann, ist beim Entwurf von pneumatisch vorgespannten Membranen die ausschließliche Zugbeanspruchung eine *conditio sine qua non*. Der Formenkanon erfährt hierdurch eine Einschränkung, die im einzelnen nur schwierig vorauszusagen ist. Ein schönes Beispiel hierfür sind die sogenannten »Flachsten pneumatisch bildbaren Formen« [13]: Ein rotationssymmetrischer, luftgestützter Pneu kann entlang seines Meridians einen bestimmten Verlauf des Verhältnisses von Ring- zu Meridiankraft zeigen. Bei den direkten Methoden gibt man beispielsweise diesen Verlauf vor. Je nach gemachter Vorgabe erhält man mit der Formfindungsberechnung unterschiedliche Formen. Da als einzige Forderung die der Nicht-Negativität der Membrankräfte zu beachten ist (Zugkräfte haben positives Vorzeichen), ist die Frage nach dem zur flachsten Form (vertikale Tangente am Rand) führenden Verlauf nicht a priori zu beantworten! Nun läßt sich zeigen, daß sich diese Form bei verschwindenden Ringkräften einstellt und daß ihre Höhe dabei das 0,299-fache des Pneudurchmessers beträgt (Bild 8), es wird aber sofort ersichtlich, daß ähnliche Aussagen bei freien Formen nur sehr schwer zu treffen sind.



9

Die Form von Betonschalen und pneumatisch vorgespannte Schalungen

Aufgrund der bei flachen Formen nahezu identischen Wirkungsrichtungen (umgekehrtes Vorzeichen) von Innendruck und Beton hat man schon häufig pneumatisch gebildete Formen zur Formfindung von Betonschalen verwendet. Man hat dadurch eine der Kernfragen bei der Verwendung pneumatisch gestützter Schalungen umgangen: Die Frage nach der pneumatischen Bildbarkeit der Form der Betonschale. Wie am Beispiel der flachsten pneumatisch bildbaren Form gezeigt, ist die Herstellbarkeit einer Fläche mit einem Pneu nicht immer gewährleistet. Erfolgte demnach die Formfindung der Betonschale nicht auf der Basis pneumatisch gebildeter Formen, so ist dieser Nachweis stets zusätzlich zu führen. Bei rotationssymmetrischen Strukturen ist der Nachweis vergleichsweise einfach, bei unregelmäßigen, freien Schalenformen erfolgt er am besten durch das in [2] beschriebene, computergestützte Verfahren (Bild 9).

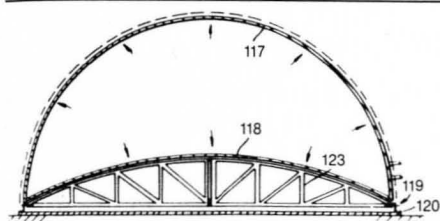
Auf einer pneumatisch gestützten Schalung hergestellte Betonschalen

Aufgrund ihrer beschriebenen spezifischen Eigenschaften sind pneumatisch vorgespannte Membranen vergleichsweise »weiche« Schalungen. Dies bedeutet bautechnisch keinen prinzipiellen Nachteil, es erfordert jedoch bezüglich Betonieretechnik und Betontechnologie einige zusätzliche Überlegungen und Maßnahmen. Hauptursache hierfür sind die Eigenschaften des Betons im Verlauf

seiner Erstarrung und Erhärtung: Dem unmittelbar nach dem Einbringen auf die Schalung noch sehr großen Deformationsvermögen des Betons stehen kleine Festigkeiten gegenüber, die im weiteren zeitlichen Verlauf kontinuierlich ansteigen. Der Anstieg der Festigkeit wird von einer Abnahme der Bruchdehnungen begleitet. Die Bruchdehnungen erreichen ein Minimum zu einem Zeitpunkt, in dem die Festigkeit des Betons immer noch relativ gering ist. Insbesondere in dieser »kritischen Phase des jungen Betons« können große Deformationen der Schalung zu einer Schädigung des Betongefüges und damit zu einer bleibenden Schädigung des Betons führen.

8 Aus der Formenwelt der rotations-symmetrischen Pneus: Die sogenannte »Shallowest Possible Pneumatic Form« beschreibt die flachste bildbare Form eines Pneus. Der Stich der Struktur kann, bei vertikaler Tangente am Auflager, das 0,299-fache des Schalendurchmessers nicht unterschreiten

9 Ein Einblick in die Formenwelt der mit pneumatisch gestützten Schalungen herstellbaren Betonschalen. Es ist von besonderer Wichtigkeit, daß das Formenspektrum nicht durch eine Beschränkung der Flächenkrümmung definiert ist. Es können also sowohl Schalen mit verschwindender Gauß'scher Krümmung also z. B. Kegel-, Tonnen- und Konoidschalen, wie auch Schalen mit negativer Gauß'scher Krümmung, wie z. B. die hyperbolischen Paraboloiden, hergestellt werden

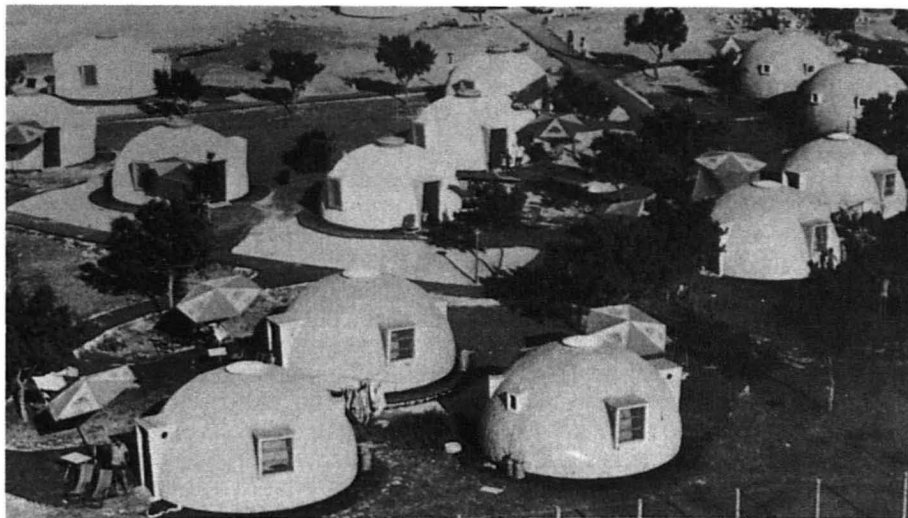


10

Seit den ersten Anwendungen pneumatisch gestützter Schalungen wurde eine Reihe von Varianten der Bauweise entwickelt, die sich durch die Art und Weise unterscheiden lassen, in der sie das Problem der kritischen Phase des jungen Betons lösen oder umgehen. Im einzelnen werden dabei folgende Methoden angewandt [2,6]:

- Hochdrucksysteme
 - Abschluß der Deformationen der Schalung vor der kritischen Phase des Betons
 - Stabilisieren der Schalung durch die Bewehrung
 - Stabilisierung der Schalung durch schichtweises Aufspritzen des Betons
 - Aufbringen von Kunststoffschäumen auf die Schalungsmembrane
 - Auflegen von Fertigteilen auf die Schalungsmembrane.
- Die einzelnen Möglichkeiten werden sehr häufig kombiniert.

Als Füllmedium wurde bei allen Methoden bisher eine Luftfüllung verwendet. Der Innendruck muß dabei sehr sorgfältig gesteuert werden. Üblicherweise verwendet man hierzu drehzahlgesteuerte Gebläseanlagen. Beim Aufblasen der Schalung wird das Reservegebläse zugeschaltet, so daß durchschnittliche Gebläseleistungen von etwa 30 000 bis 50 000 m³/h zur Verfügung stehen. Damit können auch große Schalungen innerhalb weniger Stunden aufgeblasen werden. Auf keinen Fall darf mit einem hermetisch abgeschlossenen Schalungskörper gearbeitet werden, da ansonsten infolge der Hydratationswärme des Betons oder infolge Sonneneinstrahlung eine Druckerhöhung in der Schalung entsteht. In den Anfängen der Bauweise führte dies zu teilweise erheblichen Schäden.



11

Als Schalungsmembranen werden üblicherweise PVC-beschichtete Gewebe aus hochfesten Polyesterfasern verwendet. Diese Membranen wiegen etwa 1 kg/m², sie sind etwa 1,2 mm dick. Mit ihnen wurden bereits Schalungen mit einer lichten Spannweite von über 100 m gebaut. Die Bruchfestigkeiten der hierbei verwendeten, PVC-beschichteten Polyestergerewebe liegen in einem Bereich bis etwa 200 kN/m, wobei eine Reduktion dieser Werte infolge von Verarbeitungseinflüssen (Nähte usw.) noch zu berücksichtigen ist.

Für höhere Belastungen und insbesondere bei einer häufigen Wiederverwendung werden auch gummierte Gewebe benutzt. Hier können mit Hilfe von zweilagigen Geweben Festigkeiten erzielt werden, welche die der PVC-beschichteten Polyestergerewebe übertreffen. Die Membranen werden dann allerdings relativ schwer und dadurch auch, im Fall großer Flächen, schwierig zu handhaben.

Die PVC-beschichteten Polyestergerewebe wie auch die gummierten Gewebe werden von den hohen pH-Werten des Frischbetons nicht geschädigt. Sie lassen sich nach dem Erhärten des Betons ohne Probleme von der Betonoberfläche lösen. Aufgrund der glatten Oberfläche der Membranen entsteht stets eine vollkommen glatte Betonoberfläche.

Hochdrucksysteme

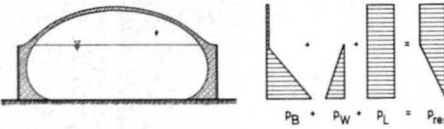
Diese Systeme sind generell dann sinnvoll anwendbar, wenn die Schalungsmembrane sehr kleine Krümmungsradien aufweist. Hochdrucksysteme erlauben das Einbringen des Betons in einer Lage. Sie werden für die Herstellung von Rohrleitungen und Kanälen sowie zur Herstellung von leichten Deckenplatten verwendet. In Israel wurde außerdem um 1970 eine Vielzahl kleiner Wohnzellen nach einer von H. Heifetz entwickelten und als Domecrete-Verfahren bezeichneten Methode hergestellt [14] (Bilder 10, 11).

10 Beim Domecrete-Verfahren wird eine unter vergleichsweise hohem inneren Überdruck stehende Schalungsmembrane an einen Rost aus Fachwerkträgern verankert

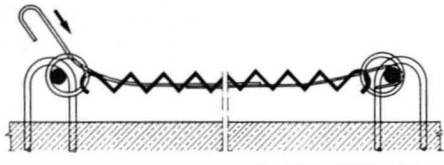
11 Eine nach dem Domecrete-Verfahren errichtete Siedlung. Das strikte Beharren auf der Halbkugelform bei Beibehaltung einer konventionellen Ausführung der Türen und Fenster zeigt, wie wenig man sich auch 1970 der Formenwelt der pneumatisch stabilisierten Strukturen bewußt war



12



13



14

12 Pneumatisch vorgespannte Schalung für ein erdüberdecktes Regenwasserüberlaufbecken. Nur eine pneumatisch gestützte Schalung erlaubt die wirtschaftliche Herstellung der durch Vorgaben zur Hydraulik bedingten, sehr komplizierten Geometrie

13 Methode zur Herstellung von Behältern »in einem Guß«. Durch die Kombination von Wasserfüllung und Luftüberdruck wird es möglich, derartige Behälter in einem Betonierabschnitt herzustellen. Als seitliche Abschaltung dient beispielsweise ein (zugbeanspruchter) Ring aus Rippenstreckmetall

14 Das Prinzip der für die Herstellung von Bini-Schalen erforderlichen Spezialbewehrung

Zur Herstellung eines erdüberschütteten Regenwasserüberlaufbeckens wurde 1985 von Jörg Schlaich, Fritz Bacher und Werner Sobek eine durch radial verlaufende Seile zusätzlich stabilisierte Schalung verwendet. Aufgrund der dadurch entstehenden großen lokalen Krümmungen der Schalungsmembrane konnte ein innerer Überdruck von 12 kN/m^2 eingestellt werden, der das Betonieren in einem Vorgang ohne zusätzliche besondere Maßnahmen erlaubte (Bild 12).

Eine Sonderform der Hochdrucksysteme stellen die flüssigkeitsgefüllten Schalungen dar, die insbesondere zur Herstellung von Behältern geeignet sind. Zwar müssen hier üblicherweise höherfeste Membranqualitäten verwendet werden, um dem Flüssigkeitsdruck der Füllung standzuhalten, die hierfür nötigen Investitionen amortisieren sich aber bei einer Mehrfachverwendung angesichts des Vorteils, daß die in der Außenzone der Betonchale entstehenden hohen Betonierdrücke durch die Flüssigkeitsfüllung reduziert werden (Bild 13).

Abschluß der Deformationen der Schalung vor der kritischen Phase des jungen Betons

Es handelt sich hierbei um zwei Verfahren [2], von denen nur die 1965 von D. Bini entwickelte Methode Bedeutung erlangt hat. Mit ihr wurden bisher etwa 500 Schalen und Behälter gebaut. Bei der Bini-Methode wird die Schalungsmembrane eben ausgelegt und entlang ihres Umfangs in einem speziell gestalteten Fundament verankert. Auf der Membrane wird anschließend eine Spezialbewehrung verlegt, die aus einem spiralförmig gewundenen Stab besteht, in den ein zweiter, gerader Stab eingeschoben wurde (Bild 14). Ein mit Abbindeverzögerern behandelter Beton wird auf die Membrane aufgetragen, eine zweite Membrane deckt den Beton ab. Diese zweite Membrane wird wiederum entlang ihres Umfangs am Fundament befestigt. Durch Einblasen von Luft wird danach das aus den beiden Membranen und dem dazwischen befindlichen Beton einschließlich der Bewehrung bestehende Paket hochgedrückt. Die einzelnen Bewehrungsstäbe müssen hierbei natürlich länger werden, was durch ein Ausziehen der geraden Stäbe aus den Spiralstäben bewirkt wird. Nachdem die Schale ihre endgültige Geometrie

erreicht hat, wird mit Außenrüttlern verdichtet. Der Beton erreicht seine kritische Phase nach Abschluß aller Arbeiten [15], (Bild 15).

Das Bini-Verfahren ist aufgrund der für die Spezialbewehrung erforderlichen Gleitmechanismen nur für ein sehr beschränktes Formenspektrum, also beispielsweise rotationssymmetrische Schalen mit Kugel- oder Ellipsoidform geeignet. Es kann damit das Spektrum von Schalenformen, das durch die Verwendung pneumatisch gestützter Schalungen erweitert wurde, nicht nutzen.

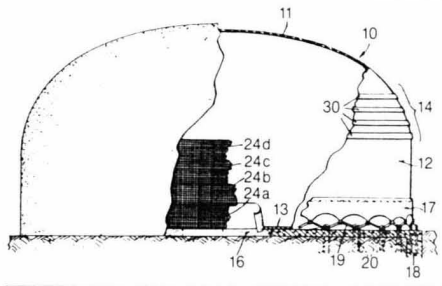
Stabilisierung der Schalung durch die Bewehrung und schichtweises Aufbringen des Betons

Dieses bereits 1948 von W. Neff [16] in Kalifornien entwickelte und patentierte Verfahren erlaubt erstmalig die Herstellung größerer Bauwerke (Bild 16). Bis heute wurden mehrere hundert Schalen und Behälter nach dieser Methode errichtet, darunter die von H. Harrington errichteten Schalen, die eine Spannweite von bis zu 65 m bei einer Höhe von 35 m und einer durchschnittlichen Schalendicke von 10 bis 12 cm haben (Bilder 17 und 18).

Die Bewehrung wird bei diesem Verfahren mit Abstandshaltern auf die bereits aufgeblasene Schalung verlegt. Dabei werden einzelne Elemente der Bewehrung, zum Beispiel mehrere zu einem Ring geschlossene Stäbe der Ringzugbewehrung, leicht gegen die Schalung vorgespannt. Dieses »Vorspannen« kann auch durch eine nachträgliche Druckerhöhung bewirkt werden. Die restliche Bewehrung wird an den vorgespannten Teilen der Bewehrung befestigt. Bewehrung und Schalungsmembrane stabilisieren sich bei dieser Methode also gegenseitig. Der Beton wird anschließend in einem kontinuierlichen Vorgang in einzelnen Lagen aufgespritzt. Durch die sehr hohen Festigkeiten des Betons zum Zeitpunkt des Auftrags und durch die weitere schnelle Festigkeitsentwicklung bedingt, tritt eine sukzessive Versteifung der Schalung durch den Betonvorgang ein (Bild 19).



15



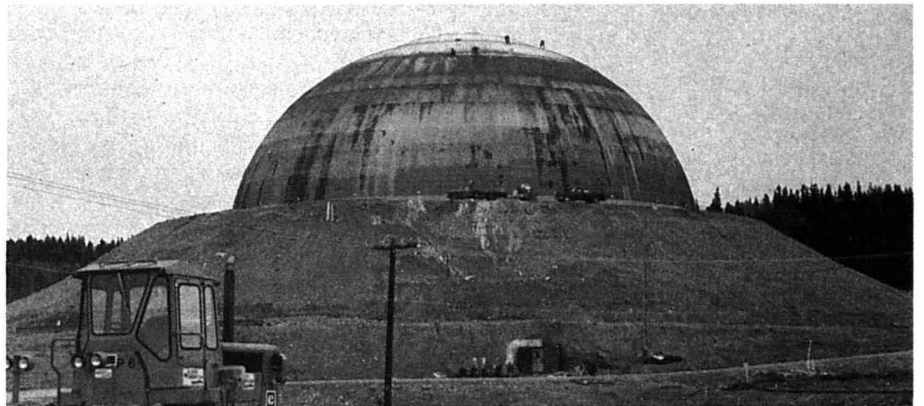
16

Aufbringen von Kunststoffschäumen auf die Schalungsmembrane

Durch das Auftragen aufschäumender und danach sofort verfestigender Kunststoffe kann eine Versteifung der Schalungsmembrane noch vor Beginn der Armierungsarbeiten erfolgen. Ein derartiges Vorgehen empfiehlt sich insbesondere dann, wenn die Betonschale eine Wärmedämmung benötigt. Üblicherweise wird der Kunststoffschaum in 1 bis 2 Lagen auf die Innenseite der Schalung aufgetragen. In diese Kunststoffschale werden spezielle Verankerungselemente eingearbeitet, die eine Befestigung der Bewehrung ermöglichen. Der Beton wird nach Abschluß der Armierungsarbeiten als Spritzbeton in 2 bis 3 Lagen aufgebracht. Da sich die Kunststoffschicht fest mit der Schalungsmembrane verbindet, wird diese üblicherweise als Wasserdichtung auf der Schale belassen (Bild 20).



17



18



19



20

15 Eine Bini-Schale während dem Aufpumpen der Schalung
16 Eine Zeichnung aus der deutschen Patentschrift von W. Neff zeigt die einzelnen Komponenten der Bauweise
17 Die pneumatisch gestützte Schalung von H. Harrington während dem Aufblasen

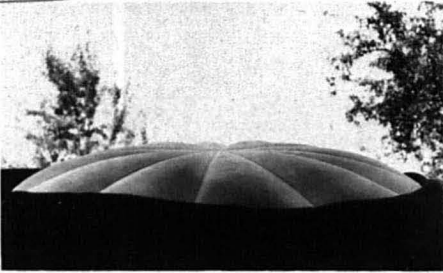
18 Das in Bild 17 gezeigte Bauwerk während der Betonierarbeiten. Die Schale mit einer Spannweite von 67 m dient zur Überdachung eines Kohlezwischenlagers
19 Eine Schale während der Torkretierarbeiten. Neben einer speziellen Betonzusammensetzung ist die Arbeitsweise des

»Nozzleman« von besonderer Wichtigkeit, da durch sie die Qualität des Betongefüges und die Materialverluste infolge zurückgefederter Betonteilchen bestimmt werden
20 Diese Schale wurde durch eine innenseitige Versteifung der Schalungsmembrane mit aufge-

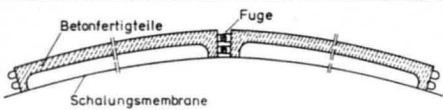
schäumtem Kunststoff und anschließend innenseitigen Torkretieren hergestellt. Die Schalungsmembrane verbleibt als äußere Dichthaut. Die als Schalungsmembranen verwendeten beschichteten Gewebe sind in einer Vielzahl unterschiedlicher Farbtöne erhältlich



21



22



23

21 Eine durch Kunststoffschäume stabilisierte Schalung während der Tortrierarbeiten
22 Projekt einer auf einer pneumatisch gestützten Schalung hergestellten Schale aus Betonfertigteilen mit 100 m Durchmesser

23 Verlegen von Betonfertigteilen auf einer pneumatisch gestützten Schalung: Detail

Das Verfahren wird in den USA seit langer Zeit erfolgreich angewandt. Bisher wurden mehrere hundert Schalen und Behälter mit Spannweiten bis zu 105 m nach dieser Methode hergestellt. Die Bauzeiten sind bei diesem Verfahren extrem kurz, da alle Arbeiten vor Ort im wettergeschützten Innenraum der Schalung stattfinden. Das Arbeiten unter einem Überdruck von etwa 4 bis 6 cm Wassersäule ist dabei physiologisch vollkommen unbedenklich (Bild 21).

Auflegen von Fertigteilen auf die Schalung

Diese Baumethode wurde bisher noch nicht angewandt, es liegt aber eine Studie für eine Überdachung mit einer Spannweite mit 100 m vor. Der Grundgedanke des von Jörg Schlaich vorgeschlagenen Verfahrens liegt darin, die Schale in Fertigteilen auf die pneumatisch vorgespannte Schalung zu legen und erst dann, nachdem die großen Deformationen der Schalung bereits aufgetreten sind, die einzelnen Fertigteile mit Beton zu vergießen. Die nachträglich aufgebraachte Betonmasse ist damit relativ gering, was einen schnellen Betonierfortschritt erlaubt und insgesamt nur zu kleinen zusätzlichen Deformationen der Schalung führt (Bild 22, 23).

Natürlich eignet sich das Verfahren nur für ein bestimmtes Formenspektrum, da das sinnvolle Arbeiten mit Fertigteilen einen hohen Wiederholungsfaktor der Einzelelemente bedingt. Andererseits bietet aber gerade das Arbeiten mit Fertigteilen auch die Möglichkeit einer differenzierten Gestaltung der Schalennenseite. Das Herausarbeiten einzelner Rippen kann dabei nicht nur zur Darstellung des Kraftflusses verwendet werden, sondern es wirkt auch maßstabbildend. Pier Luigi Nervi hat dieses sehr wichtige Gestaltungsmittel bei seinen Schalen stets eingesetzt. W.S.

Literatur

- [1] Schlaich, Jörg: Haben Betonschalen eine Zukunft?, in: Beton, 9/1982
- [2] Sobek, Werner: Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. Stuttgart, 1987
- [3] Menz, W.: A first long-span lightweight glass-fibre reinforced concrete shell. Proceedings IASS-Congress, Alma-Ata, UdSSR, Sept. 1977
- [4] Schlaich, Jörg, Sobek, Werner: Suitable Shell Shapes, in: Concrete International, 8, 1986, H. 1
- [5] Schlaich, Jörg, Bergemann, Rudolf, Sobek, Werner: Tensile Membrane Structures, in: Bulletin of the International Association for Shell and Membrane Structures, Madrid, 1990
- [6] Sobek, Werner: Concrete Shells Constructed on Pneumatic Formwork, in: Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka (Japan), Amsterdam, 1986
- [7] Joedicke, Jürgen: Schalenbau. Stuttgart, 1962
- [8] Otto, Frei: Zugbeanspruchte Konstruktionen. Berlin, 1966
- [9] Argyris, J.H., Angelopoulos, T., Bichat, B.: A general method for the shape finding of lightweight tension structures. ISD-Bericht Nr. 146, Universität Stuttgart
- [10] Brinkmann, G.: Statische Berechnung von gleichmaschigen Netzen und Membranen auf speziellen Flächen mit Hilfe der Vektoranalysis, in: Mitteilung 42 des SFB 64 der Universität Stuttgart, 1976
- [11] Schek, H.-J.: The force density method for formfinding and computation of general networks. Comp. math. appl. mech (cmame) 3, 1974
- [12] Hildebrandt, S., Tromba, A.: Mathematics and optimal form. Scientific American Books Inc., New York, 1985
- [13] Kawaguchi, M.: The shallowest possible pneumatic forms. IASS-Bulletin Nr. 63, 1977
- [14] Heifetz, H., Har'el, G.: Realisation of inflatable forms simplifies hastens and reduces cost of shell structures. Institute of Technology, Haifa, 1971, Publication No. 169
- [15] Morelli, G.: Cassaforme pneumatiche per la costruzione di cupole in cemento armato. L'Industria Italiana del Cemento, Juni 1978
- [16] Neff, W.: Verfahren zur Herstellung von schalenförmigen Betonkonstruktionen auf einer inneren, aufblasbaren Schalung. Auslegeschrift/052 103, Deutsches Patentamt