

Johann Kollegger

**Verfahren zur Herstellung von Schalen
aus Beton und Eis**o.Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger, M.Eng.
Institut für Tragkonstruktionen-Betonbau, TU Wien

Bild 1: Zweifach gekrümmte Schalen in der Natur

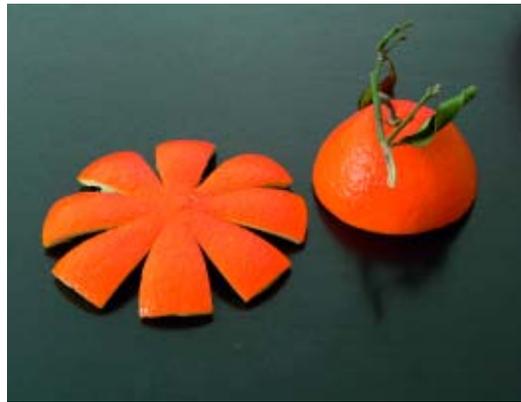


Bild 2: Halbkugelförmige Hälfte einer Orange und in eine Ebene ausgebreitete Oberfläche der anderen Hälfte

1 Schalen in der Natur

In der Natur finden sich zahlreiche Beispiele für dünnwandige und zweifach räumlich gekrümmte Tragkonstruktionen. Als Beispiele können Eierschalen, Muschelschalen, Nusschalen oder Orangenschalen genannt werden (Bild 1). In diesen Beispielen ist die Schale gleichzeitig schützende Hülle gegenüber schädlichen Umwelteinflüssen und statisch wirksame Tragstruktur. Zweifach räumlich gekrümmte Schalen weisen ein vorzügliches Tragvermögen auf. Verschiedenartige Belastungszustände können über Membranspannungen abgetragen werden. Lediglich punktförmige Lasten, die zu Biegespannungen führen, sind schädlich für Schalenträgerwerke.

Ein Charakteristikum von zweifach gekrümmten Schalen ist, dass ihre Oberfläche nicht in eine ebene Fläche abgewickelt werden kann. Beim Versuch die halbkugelförmige Hälfte einer Orangenschale auf eine ebene Unterlage zu pressen, öffnen sich segmentförmige Aussparungen (Bild 2). Umgekehrt ist es auch nicht möglich, aus einer ebenen Ausgangsfläche eine zweifach gekrümmte Schale herzustellen.

2 Schalenträgerwerke aus Beton

Beton ist ein gießfähiger Werkstoff und ist deshalb besonders zur Herstellung von räumlich gekrümmten Flächentragwerken geeignet. Eines der eindrucksvollsten Beispiele für eine Betonschale ist das von 115 bis 126 n. Chr. gebaute Pantheon in Rom. Das Dachtragwerk des Pantheons besteht aus einer halbkugelförmigen Kuppel mit einem Durchmesser von 43,3 m (Bild 3). Die Kuppel ist im oberen Bereich etwa 1,6 m dick und besteht aus „opus caementitium“, dem römischen Beton [1]. Das Eigengewicht des römischen Betons wurde von den Erbauern mit fortschreitender Bauhöhe reduziert, um den Horizontalschub auf den Unterbau zu verringern.

Das Verhältnis von Radius r zur Schalendicke t kann als Maß für den Materialeinsatz in einer Schalenträgerkonstruktion verwendet werden. Dieses Verhältnis ist in der Tabelle 1 für einige in der Natur vorkommende Schalen, die Kuppel des Pantheons und die weiter unten beschriebenen Versuchsschalen aus Stahlbeton und bewehrtem Eis zusammengestellt. Damit gelingt der Vergleich der unterschiedlich großen Schalenträgerkonstruktionen in Bezug auf das eingesetzte Material.

Weit gespannte Dachtragwerke haben seit jeher auf Baumeister und Bauingenieure eine besondere Faszination ausgeübt. Eine schöne Auswahl dieser großartigen Bauwerke wird von Schmidt [2], Heinle und Schlaich [3] beschrieben. Mit geringem Materialeinsatz gelingt die Überdachung großer Flächen. Zum Bau einer Stahlbetonschale ist in der Regel die Herstellung einer räumlich gekrümmten Schalung auf einem Lehrgerüst erforderlich. Das Bild 4 vermittelt einen Eindruck vom Aufwand, der entsteht, wenn eine zweifach räumlich gekrümmte Fläche einzuschalen ist. Zur Herstellung von Stahlbetonschalen wäre deshalb ein Verfahren wünschenswert, bei dem das Einschalen der räumlich gekrümmten Fläche und die Aufstellung eines Lehrgerüsts nicht erforderlich sind.

3 Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalen aus ebenen Ausgangsformen

Am Beispiel der kugelförmigen Orangenschale wurde demonstriert, dass eine zweifach räumlich gekrümmte Fläche nicht in einer Ebene abwickelbar ist (Bild 2).

Geometrische Abmessungen und Verhältnis r/t von ausgewählten Schalen

Struktur	Radius r	Dicke t	Verhältnis r/t
Eierschale	24 mm	0,4 mm	60
Muschelschale	26 mm	2 mm	13
Orangenschale	40 mm	4 mm	10
Kuppel Pantheon	21,65 m	1,60 m	14
Versuchsschale Eis (Bild 6)	3,75 m	40 mm	94
Versuchsschale Stahlbeton (Bild 9)	7,50 m	40 mm	188

Die Oberfläche der halbkugelförmigen Orangenhälfte ist gleich $2 \pi R^2$. Die Fläche der in einer Ebene ausgebreiteten Orangenschale einschließlich der segmentförmigen Aussparungen ergibt sich zu $0,25 R^2 \pi^3$, weil der Durchmesser der ausgebreiteten Form mit $R \pi$ gleich groß ist wie die Bogenlänge der Halbkugel. Die Flächendifferenz zwischen der Fläche der ausgebreiteten Form und der Halbkugel beträgt 19 %, wenn die Flächendifferenz auf die Fläche der ausgebreiteten Form bezogen wird.

Ausgehend vom Bild der ausgebreiteten Orangenschale wird ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem die segmentförmigen Aussparungen mit einem weichen Material

ausgefüllt werden. Eine Stahlbetonplatte mit 32 Segmenten aus extrudiertem Polystyrol ist in Bild 5 dargestellt. Am Umfang der Platte sind zwei Spannglieder ohne Verbund (VSL-Monolitzen) verlegt, die an zwei gegenüberliegenden Spannstellen angespannt werden können. Beim Anspannen der Spannglieder bewirken die Umlenkkräfte in der ebenen Ausgangsform einen hydrostatischen Spannungszustand in der Scheibenebene. Die Spannungen in Ringrichtung und Meridianrichtung sind gleich groß, wie in Bild 5 d für das Detail D gezeigt wird. Wenn die Spannung in Ringrichtung einen Wert von ca. $0,5 \text{ N/mm}^2$ erreicht, werden die Polystyrolsegmente plastisch verformt und der Umfang der Platte verkleinert sich.

Diese Umfangverkleinerung geht mit einer Aufwölbung der Platte einher und führt schließlich zu einer Umformung der Platte in eine zweifach räumlich gekrümmte Schale, beispielsweise den in Bild 5 c im Schnitt dargestellten Kugelabschnitt.

4 Versuche an Schalen mit 5 m Durchmesser im Labor

An Schalen aus Beton und Eis mit Durchmessern von 5 m wurde dieses Verfahren im Labor des Institutes für Tragkonstruktionen an der TU Wien erfolgreich erprobt. Harrer [4] baute eine Schale, die in ihren Abmessungen genau halb so groß war wie die in Bild 5 dargestellte Form.

Bild 3: Kuppel des Pantheons in Rom

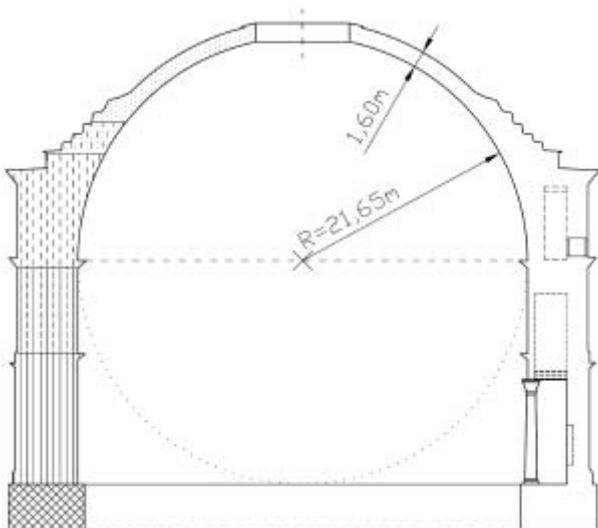


Bild 4: Schalung und Lehrgerüst zur konventionellen Herstellung einer zweifach räumlich gekrümmten Stahlbetonschale



ZEMENT BETO 20

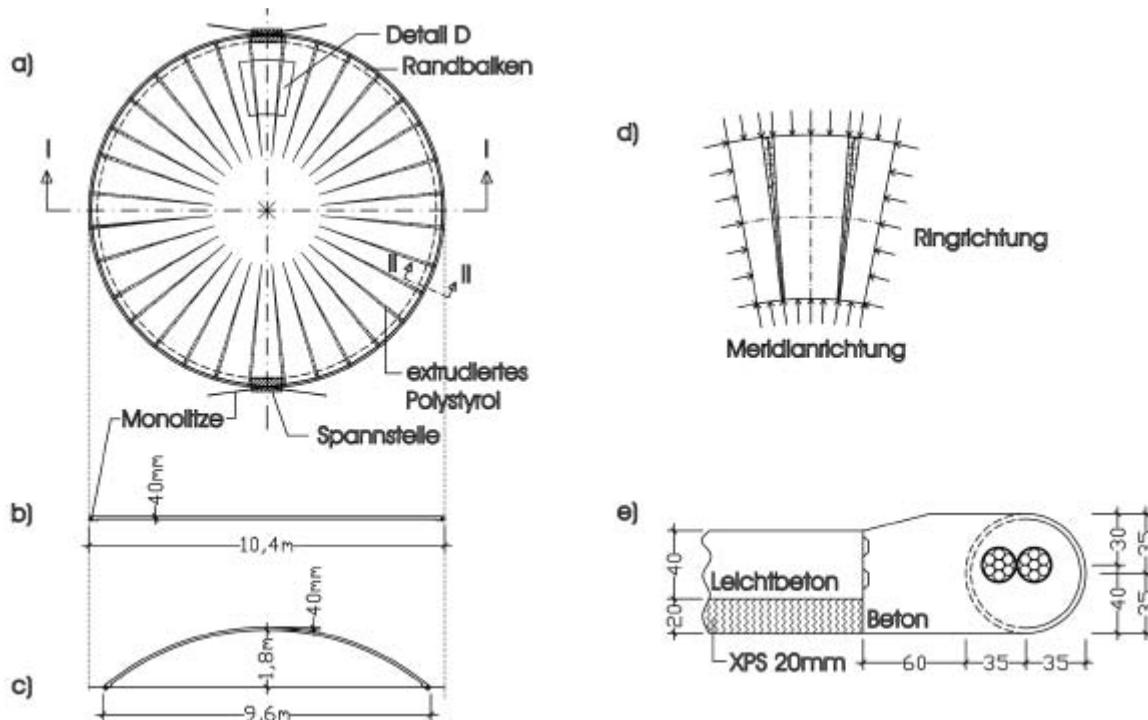


Bild 5: Herstellungsverfahren: a) Stahlbetonplatte im Grundriss, b) Schnitt durch die Platte, c) Schnitt durch die Schale nach dem Anspannen der Spannglieder, d) Spannungen im Ausschnitt D der Platte beim Anspannen der Spannglieder, e) Schnitt durch den Randbalken

Aus einer 20 mm dicken Stahlbetonplatte mit einem Durchmesser von 5,2 m wurde durch das Anspannen einer Monolitze eine Schale mit einem Stich von 0,9 m erzeugt. Nach der erfolgreichen Erstanwendung des neuen Herstellungsverfahrens an der Stahlbetonschale wurde im Rahmen der Diplomarbeiten von Kaufus [5] und Schwarz und Drexler [6] das Verfahren auf bewehrte Eisschalen übertragen.

Beton und Eis sind gießfähige Baustoffe mit Druckfestigkeiten, die größer sind als die jeweiligen Zugfestigkeiten. Deshalb ist bei der Anwendung des vorgestellten Verfahrens für beide Werkstoffe das Einlegen einer Bewehrung zur Aufnahme der in den Rissen frei werdenden Zugkräfte während des Formgebungsprozesses erforderlich. Bei der Eisschale bestand die Bewehrung aus einem Glasfasergewebe mit einer Maschenweite von 5 mm. Die einaxiale Druckfestigkeit von Eis ist mit 1,0 bis 2,0 N/mm² wesentlich geringer als die Druckfestigkeit des Betons, die für die Stahlbetonschale von Harrer einen Wert von ca. 50 N/mm² aufwies. Aus diesem Grund wurde bei den Eisschalen auch ein weiches Material für die Keileinlagen verwendet.

Die bewehrten Eisschalen entsprachen in ihren geometrischen Abmessungen der

Stahlbetonschale. Lediglich die Schalendicke wurde von 20 mm auf 40 mm vergrößert. An einigen kritischen Punkten, wie der Verankerung des Spannglieds in einer Spannstelle aus Beton und der Einbettung der Spannglieder im Eis, mussten konstruktive Änderungen vorgenommen werden, um der geringeren Druckfestigkeit von Eis Rechnung zu tragen. Wie bei der Stahlbetonschale konnte durch das Anspannen des Spannglieds die Eisplatte in eine Eisschale umgeformt werden. Bild 6 zeigt eine Eisschale mit einem Stich von 90 cm nach

dem Formgebungsprozess. Die Styroporkeile, die am Plattenrand eine Breite von 57 mm aufgewiesen hatten, waren nach dem Umformen der Platte in die Eisschale auf durchschnittlich 17 mm gestaucht, weil das Umformen eine Verkürzung des Umfangs der Platte um 1,28 m erforderte. Schwarz und Drexler haben in ihren Experimenten gezeigt, dass durch das Herausschneiden von Teilen der Kuppel und durch das Einlegen von lichtleitenden Glasfaserkabeln faszinierende Formen und Effekte erzeugt werden können [7].

Bild 6: Schale aus Eis im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen an der TU Wien
Foto: © Pez Hejduk

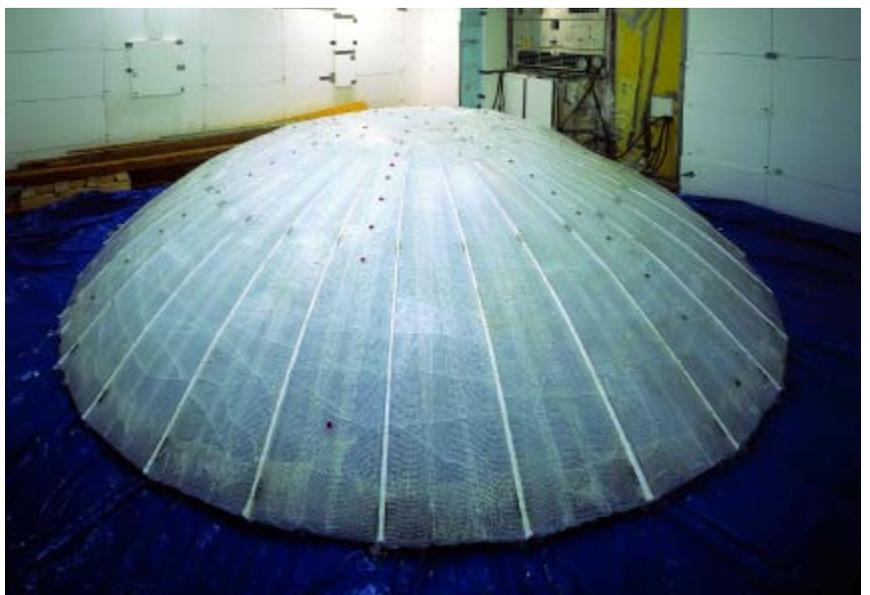




Bild 7: Betonieren der Stahlbetonplatte mit 10 m Durchmesser



Bild 8: Erhärtete Stahlbetonplatte mit angesetzten Spannpressen für den Formprozess

5 Versuche an Schalen mit 10 m und 15 m Durchmesser

Mit Hilfe von Sponsoren und unterstützenden Spezialfirmen war es möglich, im Herbst 2004 Versuche an größeren Schalen durchzuführen, um das Herstellungsverfahren weiterzuentwickeln. Der Eislaufplatz in Klosterneuburg wies eine für die Anwendung des Verfahrens geeignete Oberfläche auf und bot zudem die Möglichkeit mit der Kältemaschine des Eislaufplatzes Eisplatten herzustellen, auch wenn die Umgebungstemperaturen über 0 °C lagen.

Zur Herstellung der in Bild 5 dargestellten Stahlbetonplatte mit 10,4 m Durchmesser und 40 mm Dicke wurde zunächst eine Baufolie ausgebreitet, um die Betonplatte des Eislaufplatzes vor Verunreinigungen zu schützen. Zur Unterstützung des Formgebungsprozesses für die im Abschnitt 4 beschriebenen Laborschalen mit 5 m Durchmesser hatte die Anhebung des Mittelpunktes mit einem geeigneten Hebegerät ausgereicht. Berechnungen hatten ergeben, dass zur Herstellung der größeren Schalen die Unterstützung des Formgebungsprozesses durch einen Pneu von Vorteil wäre. Deswegen wurde im nächsten Schritt ein Pneu mit 7,5 m Durchmesser auf der Baufolie ausgebreitet. Der Pneu bestand aus

zwei Lagen bewehrtem Gewebe mit PVC-Beschichtung, die entlang des Umfangs miteinander vernäht waren. Die konstruktive Durchbildung des Plattenrandes ist in Bild 5 e zu sehen. Die Verkürzung des Plattenrandes beim Formgebungsprozess bewirkte eine gleichzeitig auftretende planmäßige Verkleinerung des Durchmessers von 10,4 m auf 9,6 m, wie aus einem Vergleich der Bilder 5 b und 5 c hervorgeht. Aus diesem Grund war eine Randausbildung erforderlich, die ein Gleiten der Schale auf der Arbeitsfläche zuließ, ohne Beschädigungen – wie Schleifspuren – auf der Arbeitsfläche zu hinterlassen. Der Randbalken bestand deshalb aus 32 PVC-Rohrabschnitten von 0,91 m Länge, in denen die Spannglieder verlegt waren. Nach dem Einmessen und Verlegen der PVC-Rohre, der Spannglieder und der Polystyrolkeile wurde der Randbalken betoniert. Bild 7 zeigt die Bewehrung der Platte, die aus Stäben mit einem Durchmesser von 5 mm in einem Raster von ca. 10 cm gebildet wurde, und das Betonieren der Platte. Leichtbeton mit ungarischem Blähglaszuschlag wurde für den Plattenbeton verwendet, da eine Doktorandin der TU Budapest an diesen Versuchen mitarbeitete und so der Konnex zu ihrer wissenschaftlichen Arbeit über diesen speziellen Leichtbeton hergestellt werden konnte.

Einen Ausschnitt der Stahlbetonplatte mit einer Spannstelle zeigt Bild 8. Mit Hilfe der zwei Spannpressen konnte das entlang des Plattenrandes rings um die Platte verlaufende Spannglied abwechselnd von links und von rechts angespannt werden, um Reibungsverluste möglichst klein zu halten. Eine zweite derartige Spannstelle war, wie dem Bild 5 a zu entnehmen ist, auf der gegenüberliegenden Plattenseite angeordnet und ebenfalls mit zwei Spannpressen ausgerüstet. Mittels der vier Spannpressen und mit Unterstützung durch den mit Druckluft beaufschlagten Pneu gelang es, aus der Stahlbetonplatte eine Schale zu formen (Bild 9).

Die Herstellung der beiden Eisplatten erfolgte nach der zuvor beschriebenen Methode, ähnlich wie für die Stahlbetonplatte. Der Randbalken der Eisschalen bestand aus Beton in PVC-Rohren, in denen die zwei (10-m-Schale) bzw. drei Monolitzen (15-m-Schale) verlegt waren. Bild 10 zeigt das Aufrichten der Eisschale mit einer planmäßigen Dicke von 10 cm. Aufgrund der außerordentlich hohen Lufttemperaturen im Herbst 2004, und da der Endtermin der Versuche wegen des Beginns der Eislaufsaison genau festgelegt worden war, wurde die planmäßige Eisdicke nicht in allen Bereichen der Schale erreicht.

ZEMENT BETO

22



Bild 11: Demonstrationsversuche am 3. November 2004 in Klosterneuburg
Foto: © Peter Kugler

6 Ausblick

Mit den Versuchen an 10 m und 15 m weit gespannten Schalen aus Eis und Beton konnte die Funktionsfähigkeit des Verfahrens nachgewiesen werden. Das Bild 11 zeigt die Stahlbetonplatte und einen Abschnitt einer Eisplatte sowie Journalisten und Besucher, die nach Klosterneuburg gekommen waren, um sich die Herstellung von Schalen aus Beton und Eis anzusehen. Das große Interesse der Besucher und die positive und motivierende Berichterstattung in den Medien lassen hoffen, dass mit dieser Methode noch weitere Schalen aus Stahlbeton für Ausstellungshallen, Lagerhallen oder andere Überdachungen gebaut werden. Schalen aus bewehrtem Eis können in hoch gelegenen Wintersportgebieten als temporäre Überdachungen für saisonale Events eingesetzt werden.

7 Dank

Die großmaßstäblichen Versuche an Schalen aus Beton und Eis haben wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des Herstellungsverfahrens gebracht. Aus diesem Grund ist der Verfasser den Sponsoren dieser Versuche, der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ), dem Güteverband Transportbeton und dem Verband Österreichischer Beton- und Fertigteilwerke zu großem Dank verpflichtet.

Der Firma Grund- Pfahl- und Sonderbau GmbH, Himberg, sei für die Bereitstellung von Vorspannmaterial, Geräten und für die Ausführung der Vorspannarbeiten gedankt.

Literatur

- [1] Lamprecht H.-O.: Opus Caementitium – Bautechnik der Römer. Düsseldorf, 1996
- [2] Schmidt H.: Von der Steinkuppel zur Zeiss-Dywidag-Schalenbauweise. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 1, Berlin, 2005
- [3] Heinle E., Schlaich J.: Kuppeln aller Zeiten – aller Kulturen. Stuttgart, 1996
- [4] Harrer J.: Herstellung einer zweifach räumlich gekrümmten Stahlbetonschale ohne Verwendung von Lehrgerüst und Schalung. Diplomarbeit, TU-Wien, Wien, 2004
- [5] Kaulfus M.: Verfahren zur Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalen aus Eis. Diplomarbeit, TU-Wien, Wien, 2004
- [6] Drexler T., Schwarz C.: Temporäre Eventarchitektur mit vorgespannten Schalen aus Eis-Glasfaser-Gewebeverbund. Diplomarbeit, TU-Wien, Wien, 2004
- [7] Schwarz C., Drexler T., Preisinger C., Kollegger J.: Kuppeln aus Eis. Architektur & Bau Forum, Okt. 2004

Bild 9: Aufrichten der Stahlbetonschale

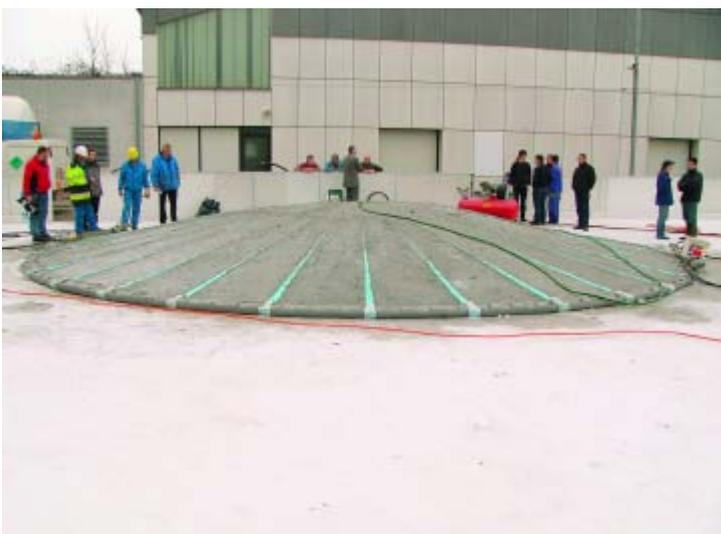


Bild 10: Aufrichten der Eisschale

