

Rundhallen in Stahl

Autor(en): **Haueter, Otto**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 40

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75200>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

In den Phasen 3–6, d.h. in insgesamt 24 Arbeitstagen, mussten *folgende Arbeiten* ausgeführt werden: innere Verkleidung in vorgefertigten, isolierten Paneelen, äussere Verkleidung inkl. sämtlicher Befestigungsprofile und Spenglerarbeiten, Abisolieren gewisser Elemente, Montage der Kabelkanäle, Einziehen aller elektrischen Verkabelungen, Montage von Stossdämpfern, Kupplungen, inkl. Spannvorrichtungen (zum Zusammenspannen von je drei Torflügeln zu einer autonomen Toreinheit), Hubtorantriebe, Hubtormechanismen, Annäherungsschalter sowie Hydraulikaggregate und elektrischen Verteil- und Schaltkästen.

Die Fülle der Arbeiten erforderte den gleichzeitigen Einsatz von bis zu 40 Spezialisten. In der 7. Phase wurden die Flügel aus dem Bereich der Gerüstungen geschoben. Im folgenden mussten noch diverse Arbeiten auf Bodenhöhe ausgeführt werden, so etwa Montage der Sockelverkleidungen, Einhängen sämtlicher Revisions- und Servicetüren (total 51 Stück), Versetzen aller Fenster und Fensterbänke sowie Montage und Justieren von 96 durch die SUVA verlangten Endschalter. Dank dem grossen Einsatz aller Beteiligten und auch Dank des guten Wetters konnte der *vorgegebene Rhythmus bis auf den Tag genau eingehalten werden*.

Am Bau Beteiligte

Bauherr:

Flughafen-Immobilien-gesellschaft (FIG),
8050 Zürich-Flughafen

Projekt und Bauleitung:

F. Weinmann, Zürich, und Huber-Winiger-Kränzlin, Zürich

Tore:

Arbeitsgemeinschaft Geilinger AG, Bülach,
und Tuchschnid AG, Frauenfeld.
Diverse Lieferanten und Unterakkordanten.

Adressen der Verfasser: F. Weinmann, dipl. Arch. ETH/SIA, Bellariastr. 72, 8038 Zürich; P. Huber, dipl. Ing. ETH/SIA c/o Huber-Winiger-Kränzlin, Löwenstr. 1, 8001 Zürich; W. Altenburger, dipl. Ing. ETH/SIA, c/o ARGE Geilinger-Tuchschnid, Schützenmattstrasse, 8180 Bülach

Rundhallen in Stahl

Von Otto Haueter, Würenlingen

Aufgrund der Kriterien der Schalentheorie wird ein für den Stahlbau besonders geeignetes Tragsystem für Rundhallen mit Kugel- bzw. Kegeldach entwickelt. Für ein Zementwerk im Nahen Osten wurden erstmals entsprechend diesem Tragsystem zwei Klinkerhallen (Kegeldach mit 100 m Randedurchmesser) und zwei Mischbetthallen (Kugeldach mit 105 m Randedurchmesser) gebaut.

Einleitung

Beim Neubau und bei Erweiterungsbauten von Zementwerken sind oft Rundhallen von 50 m bis über 100 m

Durchmesser gefragt. Es handelt sich dabei meistens um Mischbett-Hallen oder um Lagerhallen für Klinker oder Kohle.

Als *preisgünstigste Tragkonstruktion* für eine solche Halle hat sich die *Stahl-*

konstruktion erwiesen. Die Eindeckung erfolgt vorteilhaft mit Trapezblechen, welche sich einwandfrei dichten lassen.

Als Hallenform findet man den auf einer kreiszylindrischen Wand aufgelagerten *Kegel* oder die auf einer kreiszylindrischen Wand aufgelagerte *Kugelkalotte*, wobei aus konstruktiven Gründen die Kreise durch Polygone angenähert werden.

Die *Beschickung der Hallen* erfolgt via ein Transportband über einen im Zentrum angeordneten Beschickungsturm. Dabei kann die Bandbrücke entweder seitlich das Hallendach durchdringen, oder der Turm wird durch den Scheitel der Halle geführt, und die Bandbrücke erreicht den Turm, ohne die Dachhaut zu durchdringen (Bilder 1, 2).

Bild 1. Kugelhallen

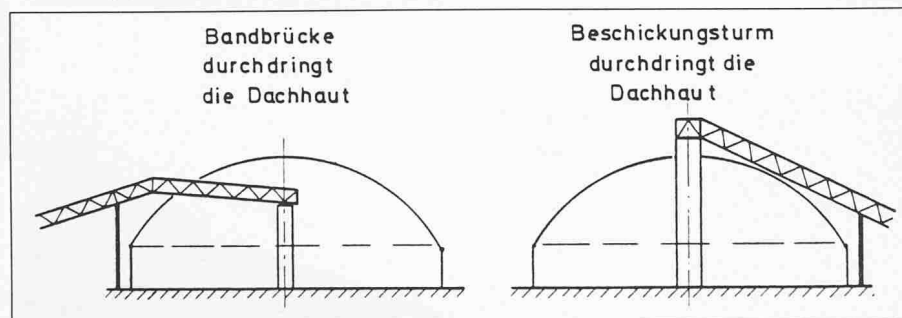
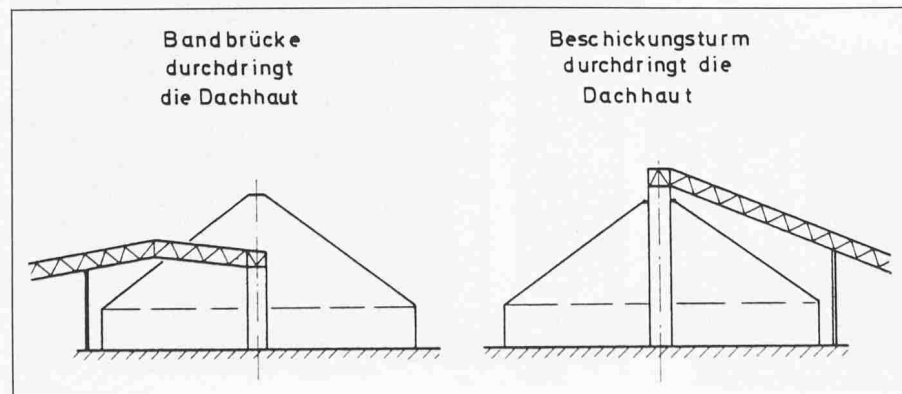


Bild 2. Kegelhallen



Traditionelle Tragsysteme

Im traditionellen Kuppelbau wurden bis heute vorwiegend folgende statische Systeme angewendet:

Radiale Haupttraglelemente

Sie werden meistens ausgebildet als:

- einfache Balken mit einem festen Lager auf einem Zentrumsturm und einem beweglichen Lager (bzw. Pendelstütze) aussen.
- Zweigelenk-Rahmen
- Zweigelenk-Bogen
- Zweigelenk-Bogen mit Zugband, das durch den Trauftring dargestellt wird (Bild 3).

Radiale Sekundärtraglelemente

Sie werden meistens ausgebildet als einfache oder durchlaufende Balken, die auf polygonalen Querträgern zwischen

den Haupttragelementen gelagert werden (Bild 4).

Dachpfetten

Sie sind als durchlaufende Balken über die radialen Tragelemente ausgebildet.

Kritik an traditionellen statischen Systemen

Ein für die Dimensionierung gewähltes statisches System sollte *möglichst wirklichkeitsnah* die Übertragung der äusseren Lasten in die Fundamente darstellen.

Beim Bau von Hallen mit *rechteckigem Grundriss* entsprechen die vorstehend aufgeführten Haupttragelemente (einfache Balken, Zweigelenk-Rahmen, Zweigelenk-Bogen, Bogen mit Zugband usw.) weitgehend der Wirklichkeit. Es handelt sich dabei um *ebene Systeme* der Stabstatik, die sich in der Praxis bewährt haben und deren Wirkung nicht durch die Verbindung mit benachbarten Systemen verändert wird. Ein Hallenbinder wird durch die Pfetten nicht an seiner Deformation – und damit an der Lastaufnahme – gehindert.

Bei einer *Rundhalle* ist die wirklichkeitsnahe Beschreibung der Lastaufnahme mit den aus der ebenen Stabstatik bekannten Tragsystemen (einfache Balken, Zweigelenk-Rahmen, Zweigelenk-Bogen, Zweigelenk-Bogen mit Zugband) nicht möglich. Der Grund dafür liegt darin, dass polygonale Ringe für die Stabilitätssicherung und polygonale Pfetten für die Lastübertragung vorgesehen werden müssen. Diese polygonalen Ringelemente nehmen an der Lastaufnahme teil und *verändern* damit das statische System grundlegend.

Diese Feststellung wird sofort aus Bild 5 deutlich. Bei der Lastaufnahme erhält der Hauptträger eine Durchbiegung. Dabei verschiebt sich ein Punkt auf der Achse des Hauptträgers *senkrecht* zur Hauptträgerachse. Das ist aber nur möglich unter gleichzeitiger Verkürzung (Radiusverkleinerung) des Polygonringes. Der Ring nimmt damit an der Lastaufnahme teil. Die radialen Hauptträger wirken *nicht als Einzelelemente*, die sich ungehindert deformieren können, sondern zusammen mit den Polygonringen und den Verbänden als Stäbe in einem räumlichen System.

Die *Beurteilung der Tragsicherheit* einer Rundhalle mit den Kriterien der Statik ebener Tragsysteme ist nicht zutreffend und kann zu verhängnisvollen Fehleinschätzungen führen. Die Diskrepanz zwischen den Resultaten der Berechnung der radialen Haupttragglieder

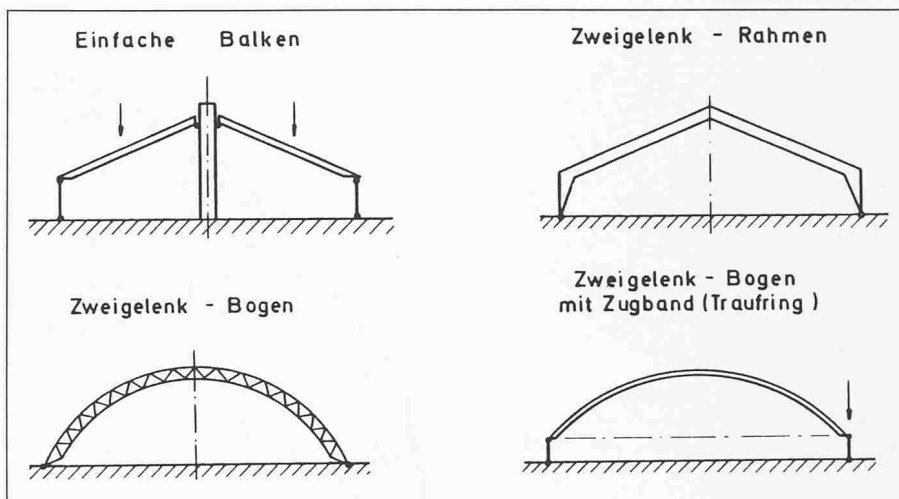


Bild 3. Radiale Haupttragelemente bei traditionellen Tragsystemen

einer Rundhalle als Zweigelenk-Bogen und den Resultaten einer Berechnung als räumliches System wurden bei der Durchführung von Parameter-Studien deutlich.

Für die im Plot (Bild 7) dargestellte Halle von 105 m Durchmesser wurden bei einer exzentrischen (etwa in der Mitte zwischen Wand und Zentrum) Einzellast von 100 kN an einem radialen Haupttragglied folgende vertikale Durchbiegungen erhalten:

- Räumliches System inkl. Polygonringe und Verbände: $f_1 = 1,1 \text{ cm}$
- Räumliches System ohne Polygonringe und ohne Verbände, d.h. lediglich im Scheitel gekoppelte Zweigelenkrahmen: $f_2 = 27,5 \text{ cm} = 25 \cdot f_1$
- Ebenes System. Einzelner Zweigelenkrahmen ohne irgendwelche räumliche Beeinflussung: $f_3 = 93,6 \text{ cm} = 85 \cdot f_1$

Diese Resultate zeigen, dass als statisches Berechnungsmodell nur ein *räumliches System* die Wirkungsweise der Konstruktion zutreffend zu beschreiben vermag. Eine Berechnung der Haupttragglieder als ebenes System, z.B. als Zweigelenkbogen oder Zweigelenkrahmen kann zu gefährlichen Fehlbeurteilungen führen, es sei denn, alle Ringelemente (inkl. Pfetten) würden konsequent mit Langloch ausgebildet.

Kriterien der Schalentheorie

Dem unvoreingenommenen Betrachter präsentiert sich eine Rundhalle als sogenanntes *Flächentragwerk*, als eine auf einer Zylinderschale (Wand) aufgelagerte Kugel- bzw. Kegelschale (Dach).

Folgerichtig wurde in den letzten Jahrzehnten mehrfach versucht, Rundhallen als sog. «*Fachwerkschalen*» zu

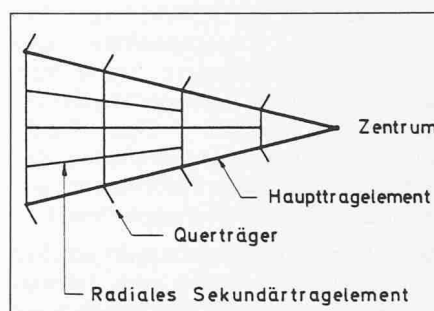


Bild 4. Sekundärtragelemente bei traditionellen Tragsystemen

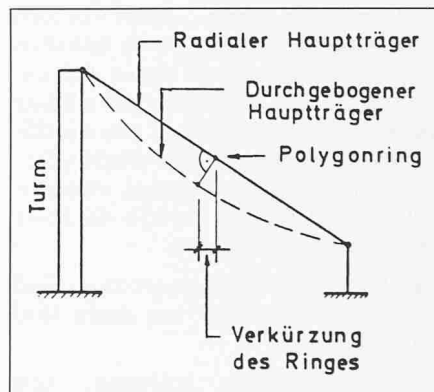


Bild 5. Einfluss der Ringelemente

bauen. Dabei wird die Schalenfläche mit einem Dreiecksnetz überzogen, an dem nur die seinen Seiten entsprechenden Stäbe als tragende Elemente ausgebildet sind. Die Schalenhaut wird dabei nicht in die Lastübernahme einbezogen. Besteht das Fachwerknetz aus gleichseitigen Dreiecken und haben die in den Knotenpunkten biegesteif miteinander verbundenen Stäbe gleichen Querschnitt, dann lässt sich die Fachwerkschale durch eine isotope, homogene Schale konstanter Dicke ersetzen [1].

Auch über die hier auftauchende Frage, bei welcher Netzdichte die homogene Ersatzschale noch hinreichend exakte Resultate liefert, bestehen Untersuchungen [2].

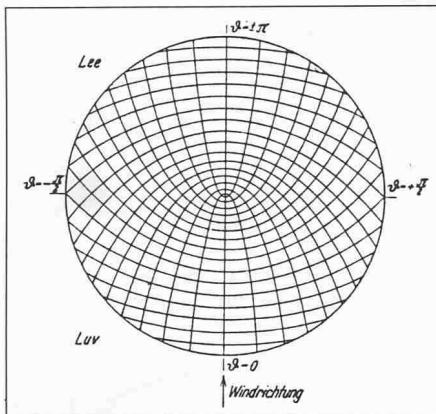


Bild 6. Längskrafttrajektorien. Stereographische Projektion. Nach [4]

Nun ist aber die *Fertigung* der Stahlkonstruktion für solche Fachwerkschalen (Dreiecksnetze von Stäben) wegen den komplizierten Knotenpunkten *sehr teuer*. Das Dreiecksnetz eignet sich auch nicht für die Auflagerung der im Industriebau üblichen (billigen) Dach-eindeckungen (z.B. Trapezbleche). Zudem erfordern solche Hallen einen ungewöhnlich hohen Montageaufwand.

Das relativ enge Dreiecksnetz solcher Fachwerkschalen ergibt auch Schwierigkeiten für Fälle, wo eine Bandbrücke seitlich durch das Dach eingeführt werden muss (Bilder 1, 2 und 9).

So wenig sich dieses System für den wirtschaftlichen Bau von Rundhallen eignet, so ausgezeichnet eignet sich das System für die einfache Entwicklung von Kriterien für die Wahl von modifizierten Systemen, die eine wirtschaftliche Fertigung und Montage erlauben und die zugleich die *Vorteile der Schalenwirkung* gewährleisten.

Die *Vorteile der Schalenwirkung* sind evident. Es seien hier nur deren fünf kurz aufgezählt:

- Rotationsschalen zeichnen sich durch sehr kleine Deformationen aus, und zwar auch bei ungleichmäs-

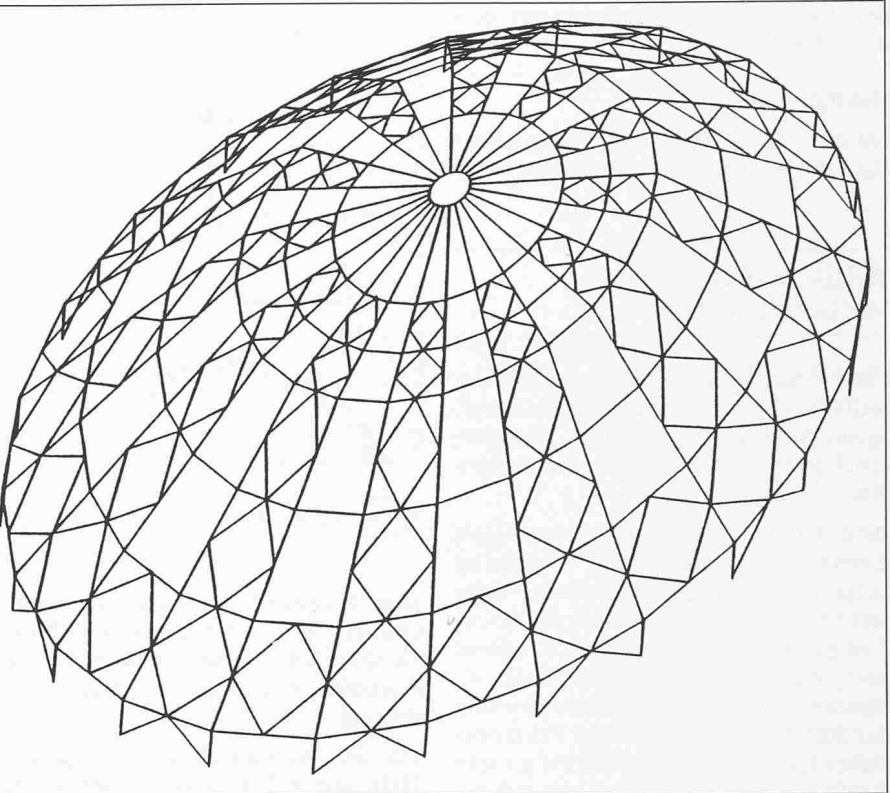


Bild 7. Mischbett-Halle. System-Skizze (Plot)

siger Lastverteilung. (Siehe die im vorhergehenden Abschnitt erwähnten Durchbiegungsberechnungen.)

- Rotationsschalen zeigen in bezug auf die Stabilität eine grosse Unempfindlichkeit gegen ungleichmässig verteilte Lasten. Bei der Kugelschale z.B. ist die Intensität der Beullast für halbseitige Belastung sehr nahe bei der kritischen Beullast für die voll belastete Schale [3].
- Rotationsschalen sind stabil für sehr grosse Schlankheiten (Radius/Schalenstärke). Aus Gründen der Durchschlagsicherheit könnte das Netzwerk einer Fachwerkschale von 100 m Rand-Durchmesser mit Walzprofilen von nur 30 cm Höhe gebaut werden. Um einen vernünftigen Monta-

geaufwand zu erhalten, wählen wir für diesen Durchmesser eine Walzprofilhöhe von etwa 60 cm. Eine Berechnung des räumlichen Systems nach der Theorie II. Ordnung bestätigt, dass der Formänderungseinfluss bei dieser Stabhöhe schon sehr gering ist.

- Bei der Kegel- und der Kugelschale werden bei Windbelastung die Kräfte durch die Schale von den stark belasteten Meridianen $\vartheta = 0$ und $\vartheta = \pi$ nach den Seiten $\vartheta = \pi/2$ abgeführt. W. Flüge hat diesen Effekt schon 1934 durch das Aufzeichnen der Längskrafttrajektorien einer Kugelschale unter Windlast sehr instruktiv aufgezeigt (Bild 6 und [4]).
- Bei versteiften Schalen sind Ringstei-

Bild 8. Mischbett-Halle, Durchmesser 105 m

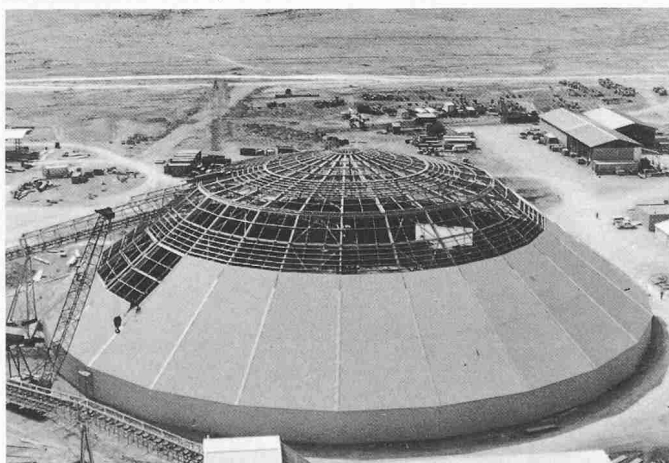
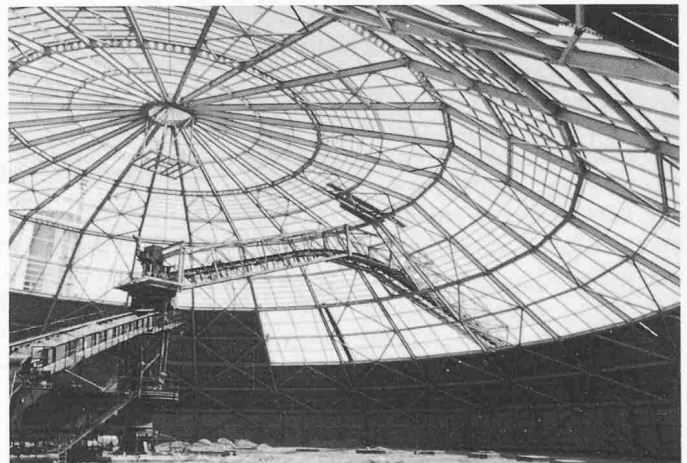


Bild 9. Mischbett-Halle. Einführung der Bandbrücke



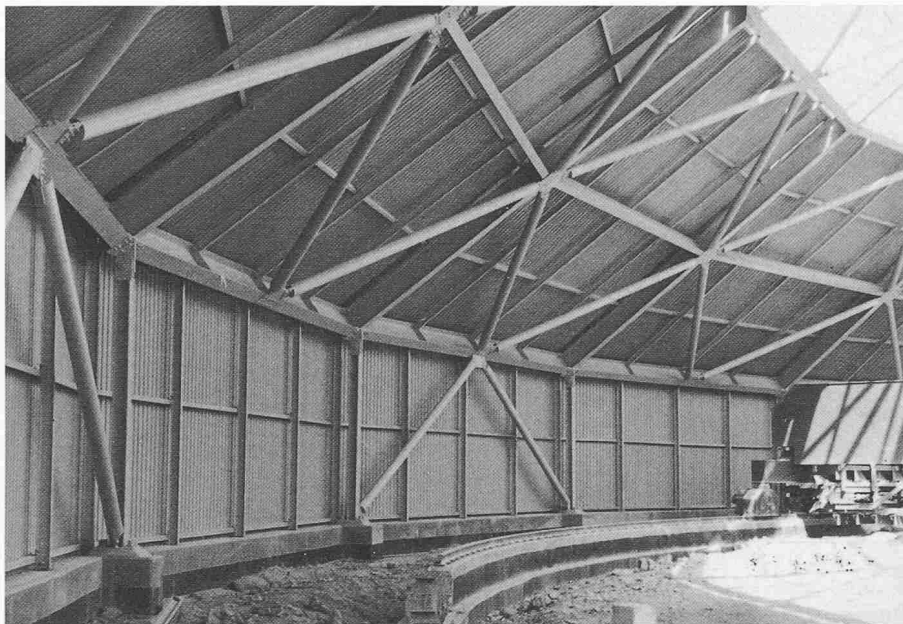


Bild 10. Mischbett-Halle. Wandausbildung

fen für die Beulsicherung wirksamer als Meridiansteifen. Das ist ein wichtiger Hinweis für die Wahl von Anzahl und Stärke der Polygonringe (Parameter-Studien).

Neues Rundhallensystem

Aus Gründen der Fertigung und der Montage wurde das System des Dreiecksnetzes ersetzt durch ein System von Meridianstäben (Radialträger) und Ringpolygonen. Bei diesem System von «Meridian- und Ringsteifen» musste zur Erzielung der Schalenwirkung die «Schalenhaut» durch geeignete Verbände ersetzt werden. Es hat sich gezeigt, dass die volle Wirksamkeit der Kriterien der Schalentheorie erreicht werden kann, wenn man die «Membranschubkräfte» durch Radialverbände in jedem zweiten Meridian-Sektor und durch einen Ringverband am Kuppelrand aufnimmt. Die Radialverbände in jedem zweiten Meridian-Feld sind auch für die Montage erforderlich. Der Ringverband am Rand ist auch notwendig für die Aufnahme der horizontalen Wandlasten.

Konsequenterweise wird die Wand als «Zylinderschale» ausgebildet. Auf diese «Zylinderschale» wirken nur Vertikallasten und *tangentiale* Horizontallasten. Da keine radialen Bogen-Schübe entstehen, ergeben sich im Vergleich zu Lösungen mit radialen Bogen- oder Rahmenbindern relativ kleine Fundamente.

Mit der System-Skizze (Plot, Bild 7) und drei Fotos (Bilder 8 bis 10) wird eine der eingangs erwähnten Mischbett-Hallen von 105 m Durchmesser beschrieben. Bei dieser Halle wird die Kugelform durch nur zwei Kegelzonen angenähert, um wegen der Dacheindeckung nur zwei Neigungen (Gefällsbruch, Gratabdeckung usw.) zu erhalten.

In Bild 9 wird die *Schlankheit der Tragglieder* deutlich. Die Trägerhöhe von etwa 60 cm für beide Hallentypen entspricht etwa $\frac{1}{180}$ der freien Stützweite (Durchmesser). Zum Vergleich sei auf die Klinkerlagerhalle der Bündner Cementwerke AG, Untervaz, hingewiesen [5]. Es handelt sich dort um ein Kegeldach mit 97 m Durchmesser, das jedoch nicht stützenfrei, sondern mit einer Zentrum-Stütze aus Beton ausgebildet wurde. Aus dem Aufriss kann

eine Trägerhöhe von etwa 1,80 m herausgemessen werden.

Bild 9 zeigt auch die problemlose Einführung der *Bandbrücke* durch das Dach. Der relativ grosse Abstand der Polygonringe und die Anordnung der Radialverbände in nur jedem zweiten Feld ermöglichen die Einführung einer Brücke ohne Störung des Gesamtsystems.

In Bild 10 erkennt man die ausserordentlich geringe Dimension der *Wandstützen*. Die Anordnung der Wandverbände in jedem zweiten Feld erlaubt den Einbau von Toren ebenfalls ohne Störung des Gesamtsystems.

Die Bilder zeigen auch, dass die Meridian- und Ringstäbe durch *Walzprofile* (keine Fachwerke) ausgebildet werden. Das ergibt einen relativ geringen Tonnen-Preis für die Konstruktion und ist in bezug auf den Korrosionsschutz (Unterhalt) sehr vorteilhaft.

Um die «Schalenwirkung» sicher zu stellen, müssen alle Verbindungen der Haupttragelemente (Meridianstäbe, Ringstäbe und Verbände) schlupffrei ausgeführt werden. Das ist nur erreichbar mit gleitfesten HV-Verbindungen oder durch Schweissung.

Literatur

- [1] Wright, D.T.: «Membrane Forces and Buckling in Reticulated Shells». Journ. Struct. Divis. Proc. ASCE, 1965, ST 1, p. 173-201, 1965
- [2] Forman, S.E., Hutchinson, J.W.: «Buckling of Reticulated Shell Structures». Int. Journ. Solids Struct. 6, p. 909-932, 1970
- [3] Klöppel, K., Ross, E.: «Beitrag zum Durchschlagproblem dünnwandiger versteifter und unverteifter Kugelschalen für Voll- und halbseitige Belastung». Der Stahlbau, S. 49-60, 1956
- [4] Flüge, W.: Statik und Dynamik der Schalen, 1934
- [5] Schweiz. Zentralstelle für Stahlbau: «Toiture d'un entrepot de clinker». Bauen in Stahl, Nr. 10, 1969

Adresse des Verfassers: O. Haueter, dipl. Bauing. ETH, Direktor, Meto-Bau AG, 5303 Würenlingen.