Jürgen Bellmann
Johann Köppl

Die Überdachung des Rundmischbettes für ein Zementwerk in Harburg bei Donauwörth

Zur Überdachung eines Rundmischbettes für ein Zementwerk wurde eine Stahlskelettkonstruktion mit angehängter Membranhaut ausgeführt. Der Beitrag erläutert die Besonderheiten bei den Lastannahmen, der statischen Berechung und der konstruktiven Ausbildung dieser außergewöhnlichen Konstruktion.

Roof structure for the new mixing plant of a cement mill at Harburg near Donauwörth. *In a cement plant a circular area for mixing the ingredients was roofed with a textile membrane, fixed on a spider stell structure. The paper describes the special actions for the load assumption, the static analysis and the structural solution for critical parts of this extraordinary building.*

1 Beschreibung der Bauaufgabe

Die Fa. Märker Zementwerke GmbH in Harburg bei Donauwörth plante seit mehreren Jahren die Errichtung eines Rundmischbettes, welches durch die Vermischung des in unterschiedlichen Qualitäten anstehenden Rohmaterials aus dem Steinbruch eine deutliche Verbesserung der Produktqualität des Zementes erwarten läßt.

Die Vermischung und weitere Verarbeitung des Rohmaterials muß im trockenen Zustand erfolgen. Aus diesem Grund war es erforderlich, die Anlage zu überdachen. Die Zufuhr des Rohmaterials erfolgt über Förderbrücken, deren letzter Teil mit einer freien Spannweite von ca. 50 m im Zentrum der Dachkonstruktion des Rundmischbettes aufgehängt ist.

Die maschinentechnische Anlage des Rundmischbettes besteht zum einen aus einem zentralen Turm mit einem auskragenden Förderband, über welches das über die Förderbrücke angelieferte Rohmaterial kreisförmig abgelagert wird, und zum anderen aus einem sogenannten Kratzer, welcher das aufgeschüttete Material vermischt und zu einem unterirdischen Förderkanal transportiert, welcher zur Zementmühle führt.

Die Anlage hat einen kreisförmigen Querschnitt mit einem Durchmesser von ca. 115 m. Infolge der oben geschilderten Maschinentechnik ist es erforderlich, diese Fläche stützenfrei und unter Einhaltung des geforderten Lichtraumprofiles der Anlage mit einer Höhe von ca. 35 m im Zentrum zu überdachen.

In mehreren Schritten wurden unterschiedlichste Varianten für die Tragstruktur der Überdachung vorbemessen und kostenmäßig miteinander verglichen. Es konnte schließlich nachgewiesen werden, daß der von den Architekten favorisierte Entwurf einer sechzehnfüßigen Stahlspinne mit untergespannter Membran (Bild 1) kostenmäßig mit anderen Lösungen mit festen Dachstrukturen durchaus konkurrieren konnte. Aus diesem Grund entschied man sich, diese für ein Zementwerk ungewöhnliche Lösung zu verwirklichen.

Bild 1. Fotomontage der fertigen Membrankuppel
Fig. 1. Photomontage of the final membrane dome

2 Statisches System und Umsetzung für die Berechnung

Wie bereits erwähnt, besteht das Tragsystem der Überdachung aus einem räumlichen Stahltragwerk aus Rohrfachwerkträgern, der unter diese Konstruktion gespannten Membran und einer aus konventionellen Stahlwalzprofilen hergestellten Förderbrücke.

Das Haupttragwerk der Kuppel besteht aus einem spinnenartigen Tragwerk mit 16 kreisbogenförmigen Füßen, welche am Tiefpunkt in Stahlbetonfundamente eingespannt und am Kopf über einen zentralen Ringträger miteinander verbunden sind (Bild 2). Die Radialträger bestehen aus dreigurtigen Rohrfachwerken mit einer statischen Höhe von ca. 1,30 m, die Gurtprofile sind hierbei aus Rohren mit Durchmesser 244,5 mm in Wanddicken

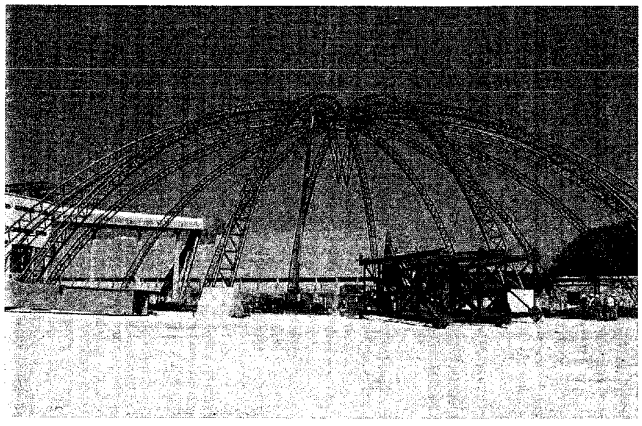

Bild 2. Stahlkonstruktion im Bauzustand
Fig. 2. Steel skeleton during construction

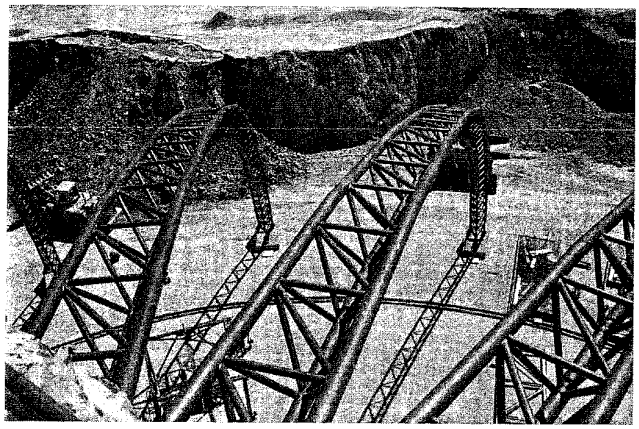

Bild 3. Dreigurt-Bogenträger
Fig. 3. Arch girder with three chord members

von 12 bis 25 mm hergestellt, während die Diagonalen aus Rohren mit 101,6 mm bestehen (Bild 3).

Der obere Ringträger ist als Viergurtträger mit quadratischen Abmessungen von ca. 1,30 m × 1,30 m ausgebildet (Bild 4). Um die Bogenträger-Gurte sauber anschließen zu können, wurden für die Gurte des Ringträgers Rohre mit 323,9 mm Durchmesser gewählt. Die Diagonalen des Ringträgers bestehen aus Rohren mit 139,7 mm Durchmesser. Die komplette Stahlkonstruktion der Kuppel besteht aus St 52-3.

Die eigentliche Dachhaut wird schließlich von der Membrane gebildet, welche aus einer PVC-beschichteten textilen Membran Typ III mit einer Dicke von ca. 0,8 mm besteht. Das Material hat anisotrope Eigenschaften mit unterschiedlichem E-Modul in Kett- und Schußrichtung.

Die Membranhaut ist örtlich im Abstand von ca. 5 m über diskrete Aufhängepunkte mit der Stahlkonstruktion verbunden. Die Vorspannung erhält die Membran durch Kehlseile, welche jeweils zwischen zwei Rohrbindern vom oberen Ringträger zu den Fundamenten laufen, und durch Randseile, die den unteren Rand der Membran einfassen.

Einen Sonderfall stellt das Membranfeld dar, in dem die Förderbrücke die Dachhaut durchstößt. Hier mußte die Membran beidseits des Brückenquerschnittes mit zwei Kehlseilen gespannt werden.

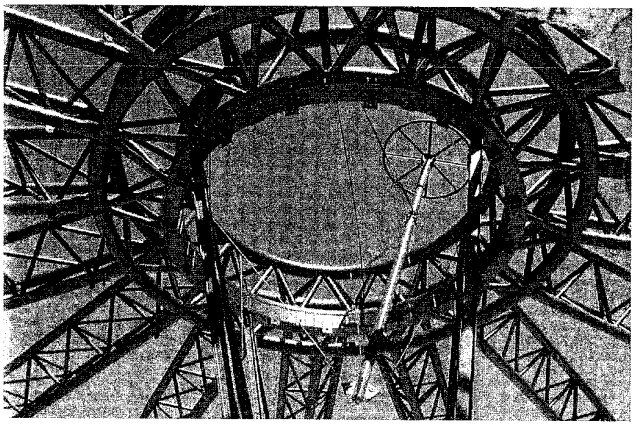

Bild 4. Zentraler Viergurt-Ringträger
Fig. 4. Central ring girder with three chords

Die Aufhängung der Förderbrücke im Zentrum des Kuppeldaches mußte so erfolgen, daß die relativ großen Horizontalverformungen des Daches unter Wind möglichst zwängungsfrei aufgenommen werden konnten (Bild 5). Die Konstruktion des Förderbandes und der Anschluß dieses Förderbrückenteiles an das restliche Transportsystem mußte so ausgebildet werden, daß Verformungen bis zu 100 mm aufgenommen werden können.

Da sich sehr bald zeigte, daß die ursprünglich geplante getrennte Berechnung der statischen Teilsysteme Brücke und Membrankuppel die gegenseitige Beeinflussung und Lastabtragung von Brücke zur Kuppel nur unzureichend wiedergeben konnte, wurde entschieden, die Aufgabe mit einer Berechnung am Gesamtsystem zu lösen.

Bild 6 zeigt das visualisierte Gesamtsystem von Brücke Membrandach und Stahlgerüst, wie es schließlich für die statische Berechnung generiert wurde.

3 Lastannahmen für die Berechnung

Neben den Eigengewichts-, Schnee-, und Verkehrslasten aus der Förderbrücke stellt die Windbelastung eine wesentliche Lastgröße dar. Es war klar, daß verläßliche Angaben zur Winddruckverteilung am Bauwerk nur aus einem Windkanalversuch oder alternativ einer Anströmungsberechnung zu erhalten waren. Aus diesem Grund

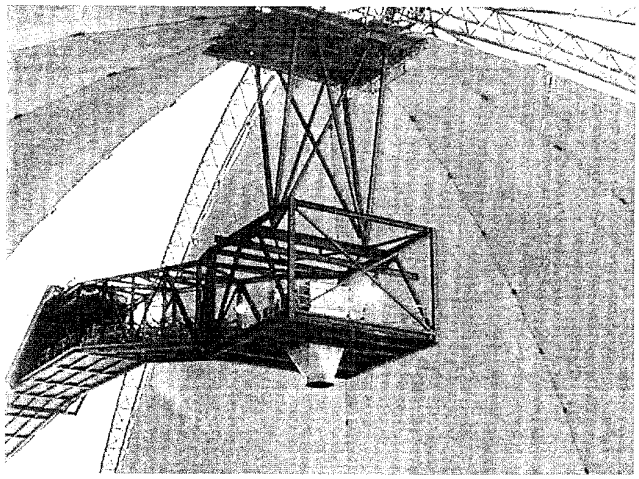

Bild 5. Aufhängung der Förderbrücke im Zentrum der Kuppel
Fig. 5. Suspension of the conveyor bridge

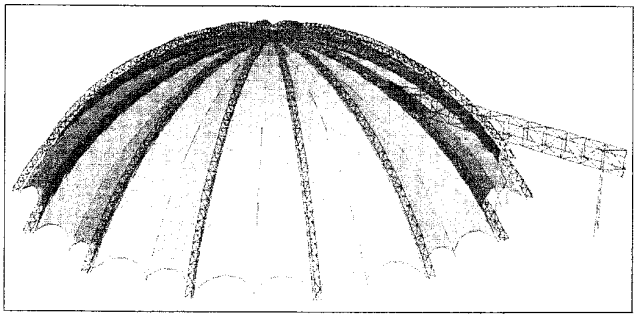

Bild 6. Visualisierung des Tragwerkes – Ansicht von oben
Fig. 6. Visualisation of the structure from top

wurden Windkanalversuche durchgeführt. Insbesondere sollten die Versuche Anhaltswerte für die Staudruckverteilung bei unterschiedlich großen Öffnungen am Boden und am Scheitel der Kuppel liefern.

Die Ergebnisse sind auszugsweise im Bild 7 dargestellt. Sie zeigen eine schmale Druckzone auf der, dem Wind zugewandten Seite sowie Sogspitzen senkrecht zur Windrichtung und auf der dem Wind abgewandten Seite. Zusätzlich zu dem Außendruck ergibt sich in Abhängigkeit vom Anteil der Öffnungsfläche im Fußbereich im Inneren ein zusätzlicher Unterdruck von 0,00 bis 0,10 kN/m^2.

4 Berechnung der Schnittgrößen und Spannungen für den Endzustand

Mit diesen Grundlagen wurde die nichtlineare Berechnung der Tragstruktur mit dem Programm ASE der SOFISTIK AG durchgeführt. Insgesamt wurden für den Endzustand neben dem Grundlastfall, bestehend aus Eigenlasten und Vorspannung der Seile und der Membran, sieben weitere Kombinationen aus Schnee-, Verkehrs- und Windlasten untersucht.

4.1 Vorspannung Membran und Seile

Die Form der Struktur wird im wesentlichen vom Vorspannungszustand der Membran in Kett- und Schußrichtung sowie von der Vorspannung der First-, Rand- und Kehlseile definiert. Diese beiden Einflußgrößen bestimmen den Durchhang der Membran und den Einzug der Ränder und damit das optische Erscheinungsbild des Tragwerkes.

Die in erster Linie dem Regenschutz dienende Membran soll möglichst glatt gespannt ohne ausgeprägte Knicklinien ausgeführt werden. Die Höhe der Vorspannung soll so gewählt werden, daß auch unter maximalem Wind immer noch eine geringe Zugkraft verbleibt. Damit soll gewährleistet werden, daß kein Verrutschen der Kehlseile erfolgt und diese nicht auf der Membran scheuern.

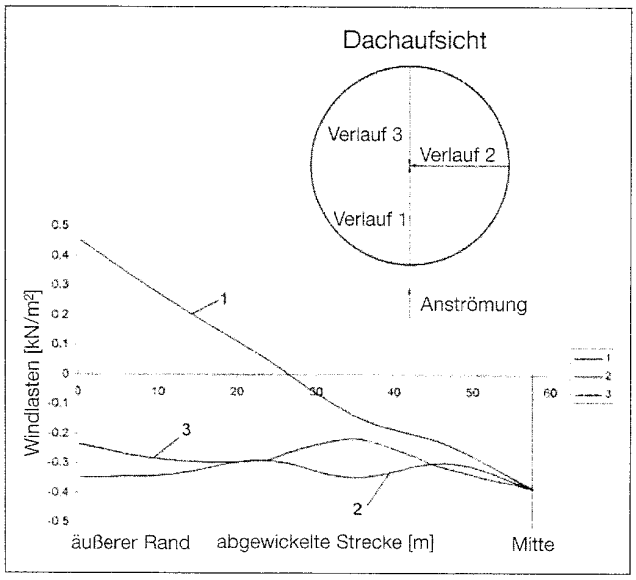

Bild 7. Externe Windlasten für die Tragstruktur des Rundmischbettes
Fig. 7. Windloading for the dome structure

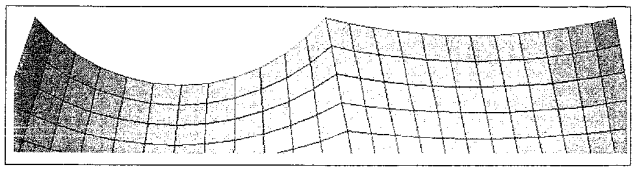

Bild 8. Links ein Randseil mit geringer, rechts mit hoher Vorspannung
Fig. 8. On the left a boundary cable with low prestress, on the right with high prestress

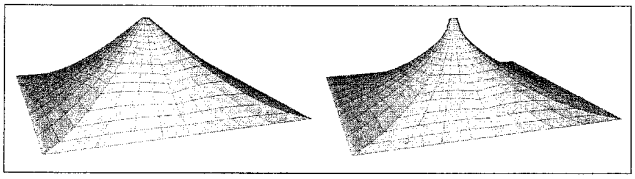

Bild 9. Links eine geringe, rechts eine hohe tangentiale (Ring)-Vorspannung
Fig. 9. On the left a low tangential prestress, on the right a high prestress

Nach Vorberechnungen wurde die Membranvorspannung auf 6 kN/m in Ringrichtung und 3 kN/m in Meridianrichtung eingestellt. Die erforderlichen Seilvorspannungen ergeben sich dann direkt aus den gewünschten Rand- und Kehlseilradien nach der Formel N = n · r mit n Membranspannung, N Seilkraft. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Bild 8 mit konstanter Membranvorspannung (Seifenhaut): Auf der linken Seite ist ein Randseil schwach gespannt und ergibt einen großen Stich, auf der rechten Seite wurde das Randseil stärker gespannt und damit gleichzeitig ein kleinerer Stich (größerer Radius) erzwungen.

Bemerkung: Auch im Inneren von Membranen lassen sich durch verschiedene Vorspannungszustände unterschiedliche Membranformen erzielen. An Hochpunkten führt ein zu hohes Verhältnis von tangentialer zu radialer Vorspannung zu einem Einschnüren am Hochpunkt (Flaschenhals) wie in Bild 9 dargestellt ist.

Für die Rundmischanlage ergibt sich aus einem gewünschten Randradius (unten) von 10 m eine Randseilvorspannung von N = n · r = 3 kN/m · 10 m = 30 kN. Die Kehlseile haben einen Radius von ca. 55 m und wurden mit N = 60 kN angespannt, woraus sich eine nach unten wirkende Umlenklast von p = N/r = 1,10 kN/m ergibt. Diese Umlenklast zieht die Membran kehlförmig nach innen und liefert zusammen mit den oberen Firstseilen (Vorspannung = 30 kN) die in Ringrichtung gefaltete Form.

4.2 Formfindung

Mit den o. g. Vorspannwerten wurden die Seile in die Berechnung der Formfindung eingebracht. Da die Seile schon in der Eingabe mit der endgültigen Länge definiert wurden, konnten sie mit voller Steifigkeit aktiviert werden. Die Membran hingegen wurde mit stark abgeminderter Steifigkeit aktiviert. Damit behält sie in der Form-

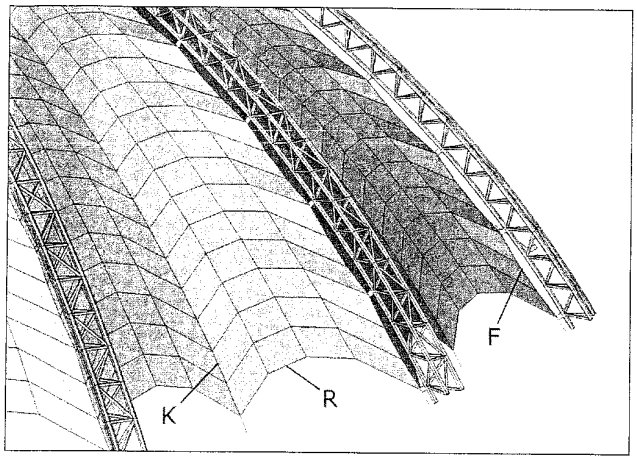

Bild 10. Ergebnis der Formfindung K, R, F = Kehl-, Rand- und Firstseil
Fig. 10. Result of formfinding

findung ihre Spannung bei, auch wenn die Elemente durch die erforderliche Anpassung an die Membranform eine zum Teil deutliche Dehnung erleiden. Ein Verschwimmen der Membranpunkte auf der Oberfläche, wie dies bei einer Seifenhaut zu beobachten ist, wird vom Programm verhindert.

Bei der Berechung der Formfindung werden im Programm ASE auch alle anderen statischen Elemente wie die Gitterträger und andere Abspannseile berücksichtigt (Bild 10). Die Formfindung liefert daher – unter gleichzeitigem Ansatz des Eigengewichtes – einen Spannungs- und Verformungszustand, bei dem alle Kräfte am verformten Gesamtsystem im Gleichgewicht stehen.

4.3 Schnittgrößen unter äußeren Lasten

Für die Berechnung der statischen Lastfälle aus Ausbaulasten, Verkehrslasten, Wind und Schnee wird nun auch in der Membran die 1,0fache Steifigkeit aktiviert. Damit erzeugen Dehnungen, welche aus Verformung entstehen, auch Spannungsänderungen in der Membran. Die Materialeigenschaften der Membran werden linear elastisch, aber orthotrop angenommen:

Schußrichtung – in Ringrichtung verlaufend
$E_s \cdot t = 1000$ kN/m
Kettrichtung – tangential von oben nach unten
$E_k \cdot t = 720$ kN/m

Die bei finiten Elementen mögliche Schubsteifigkeit wird stark reduziert auf $G \cdot t = 32$ kN/m.

Da die auf die Membran wirkenden Lasten wie Wind große Verformungen bewirken, ist für alle Lastfälle eine geometrisch nichtlineare Berechnung erforderlich. Membran- und Seilelemente können äußere Lasten nur mit Normalkräften abtragen, dies erfordert gleichzeitig eine Änderung in der Geometrie – die Lasten werden nicht nur durch höhere Normalkräfte, sondern hauptsächlich durch einen größeren Durchhang abgetragen.

Da damit das Superpositionsgesetz nicht gilt, müssen Zustandslastfälle unter gleichzeitigem Ansatz aller Lasten berechnet werden. Für Nachweise im Bruchzustand sind dabei die Lasten mit den entsprechenden Lastsicherheitsbeiwerten anzusetzen. Alle Lastfälle setzen immer auf den Spannungs- und Verformungszustand der Formfindung auf, den sogenannten Primärlastfall. Aus den Schnittgrößen aller Zustandslastfälle werden anschließend die auftretenden maximalen Spannungen in den Querschnitten ermittelt und den zulässigen Spannungen gegenübergestellt.

Da das Gesamtsystem geometrisch nichtlinear berechnet wurde, ist damit automatisch eine globale Knicksicherheit nachgewiesen, wenn die Spannungen einen ausreichenden Sicherheitsabstand aufweisen. Eine spannungslose Vorverformung (z. B. aus einer Eigenform) könnte auch angesetzt werden, wurde aber im vorliegenden Fall vernachlässigt, da die Windlast bei weitem den zentrischen Normalkraftanteil übersteigt. Ein Knicken von Einzelstäben wurde gegebenenfalls getrennt untersucht.

5 Berechnung der Schnittgrößen und Spannungen im Montagezustand

Bei Tragwerken dieser Dimension und insbesondere bei Membranstrukturen, welche ihre endgültige Stabilität erst im Endzustand durch die Vorspannung der Seile und der Membran erhalten, ist den Montagezwischenzuständen besondere Bedeutung beizumessen. In Abstimmung mit der ausführenden Firma wurde der in Bild 11 dargestellte Montageablauf festgelegt.

Es wurde besonders darauf geachtet, daß für die kritischen Windrichtungen nicht die Situation einer offenen Schale ohne Durchlaßöffnungen entstand, sondern daß durch seitlich noch offene Membranfelder ausreichend Ausgleichsfläche zum Abbau extremer Staudrücke vorhanden war (Bild 12).

Die Berechnungen der Montagezustände berücksichtigten insbesondere die Abhängigkeit der Windbelastung von der Windrichtung, der Jahreszeit und der Dauer der Bauzustände (Bild 13). Der Entwurf der europäischen Windlastnorm ENV 1991-2-4 enthält Angaben zur Umrechnung der 50-Jahres-Bemessungswerte für eine beliebige Auftretenswahrscheinlichkeit.

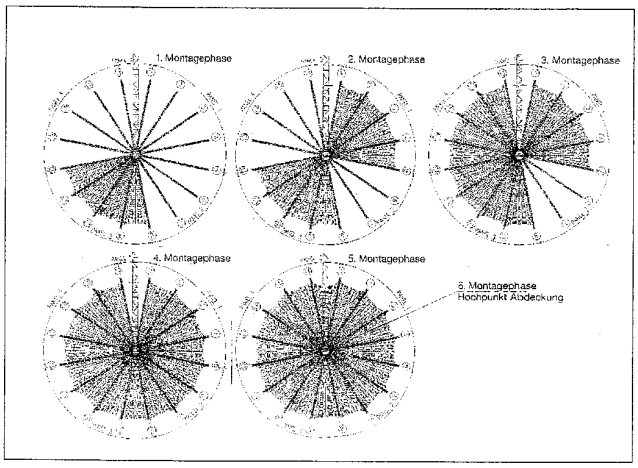

Bild 11. Montagefolge der Membransegmente
Fig. 11. Sequence of erection for the membrane segments

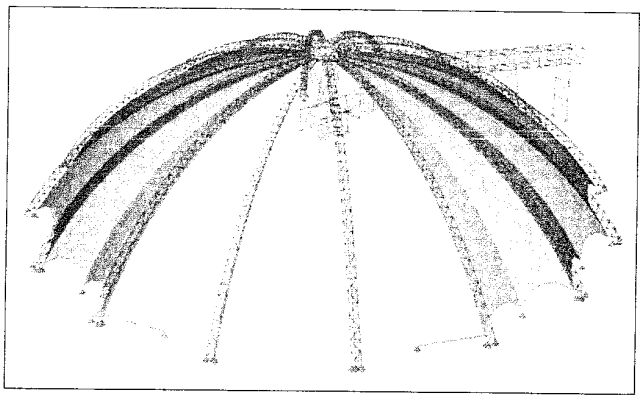

Bild 12. Teilsystem Montagezustand Panel 1 + 2
Fig. 12. Panel 1 + 2 in the erection state

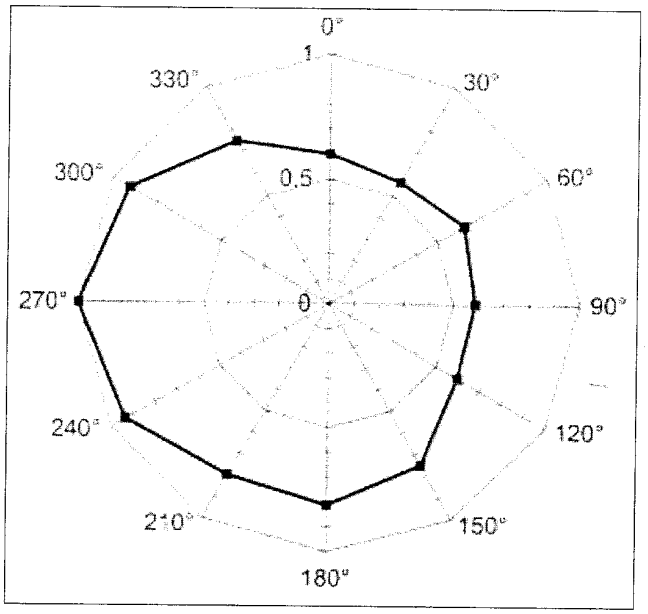

Bild 13. Beispielhafte Darstellung Abminderungsfaktor c_{dir} der extremalen Windgeschwindigkeiten
Fig. 13. Sample representation of reduction factor c_{dir} for extreme wind speed

6 Konstruktions- und Ausführungsdetails

Wesentlicher Detailpunkt für die Konstruktion des Daches war die Auslegung der Seilknoten in Verbindung mit der Membran und der Stahlkonstruktion.

Die Randseile der Membran sind in Seiltaschen eingefädelt und werden in den Binderachsen mit dem sog. Firstseil und in der Mittelachse zwischen den Bindern mit dem Kehlseil verbunden. Um die richtigen Seil- und Membranspannungen einstellen zu können, wurden diese Punkte mittels einer Klemmplattenverbindung konstruiert (Bild 14).

Der Anschluß der Membran am Untergurt des Rohrbinders erfolgte im Abstand von ca. 5 m. Es mußte neben einer Gelenkwirkung in Längsrichtung eine einwandfreie Klemmung des unter dem Binder laufenden Firstseiles erreicht werden.

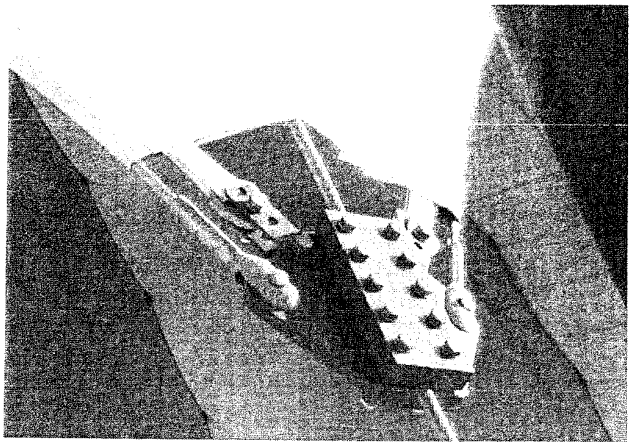

Bild 14. Verbindungsknoten Randseil–Kehlseil und Randseil–Firstseil am Fußpunkt
Fig. 14. Connection joint boundary–fillet cable and boundary–ridge cable

Am oberen Ende wurde die Membran mittels eines Kederprofiles an einem Flachstahlring kontinuierlich geklemmt (Bild 15). Die First- und Kehlseile wurden hier mit verstellbaren Gewindefittings angeschlossen (Bild 16).

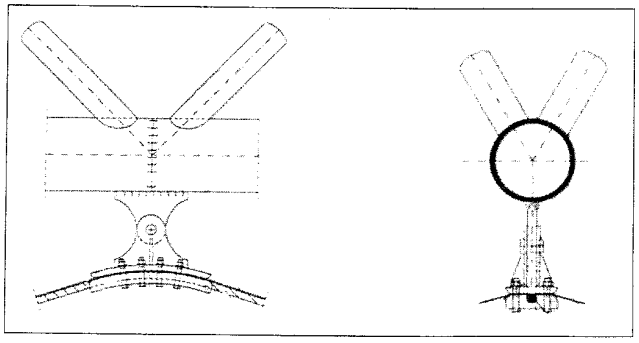

Bild 15. Detailknoten Anschluß Firstseil und Membran an Binderuntergurt
Fig. 15. Detail of connection ridge cable and membrane at the bottom chord

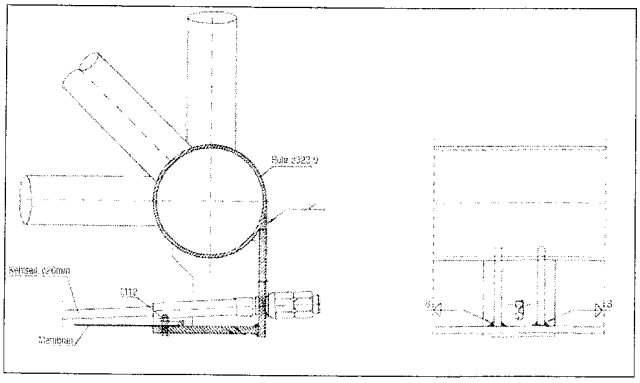

Bild 16. Anschlußknoten Membran und Kehlseil am oberen Ringträger
Fig. 16. Connection joint membrane – fillet at the upper ring girder

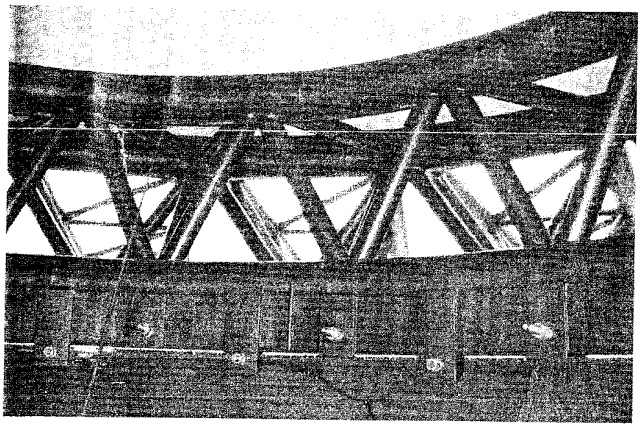

Bild 17. Ringträger
Fig. 17. Ring girder

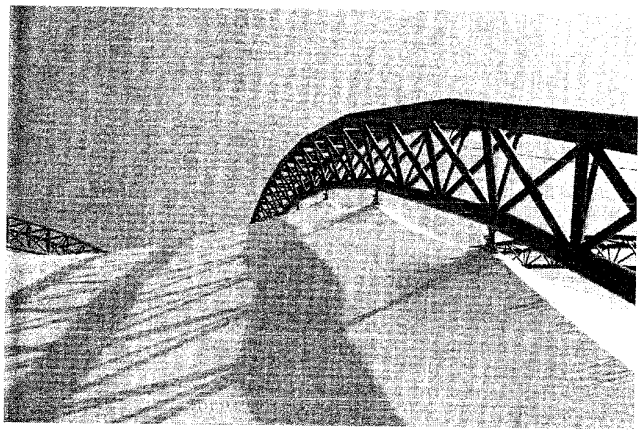

Bild 18. Membranknoten
Fig. 18. Membrane joint

Bild 19. Membrandach und Brücke nach Abschluß der Montage
Fig. 19. Membrane dome and bridge after construction

So konnten zum einen die Seilspannungen genau eingestellt, und zum anderen Toleranzen aufgefangen werden.

Die Bilder 17 bis 19 zeigen eindrucksvoll, daß mit diesem Bauwerk etwas geschaffen wurde, das den allgemein üblichen Industriebaustandard verläßt und belegt, daß Industriebau-Architektur trotz eines straffen Kostenrahmens nicht langweilig sein muß. Die Bauarbeiten wurden im Januar 2000 begonnen und konnten im Dezember 2000 nach nur 11 Monaten Bauzeit inclusive der Anlagenmontage erfolgreich abgeschlossen und an den Bauherren und Nutzer übergeben werden.

Am Bau Beteiligte:

Architekt:	Prof. Kurt Ackermann und Partner, München
Tragwerksplanung:	Fichtner + Köppl Planung und Beratung im Bauwesen GmbH, Rosenheim
Prüfingenieur:	Landesgewerbeanstalt, Zweigstelle Augsburg
Ausführende Firma:	Arge Birdair Europe – Maurer Söhne

Literatur

[1] *Bellmann, J.:* Membrantragwerke und Seifenhaut – Unterschiede in der Formfindung. Bauingenieur 73 (1998), S. 118–123.

[2] *Bergermann, R., Göppert, K., Schlaich, J.:* Die Membranüberdachung für das Gottlieb-Daimler-Stadion, Stuttgart, und den Gerry Weber Centre Court, Halle (Westfalen). Bauingenieur 70 (1995), S. 251–260.

[3] *Bletzinger, K.-U., Ziegler, R.:* Theoretische Grundlagen der numerischen Formfindung von Membrantragwerken und Minimalflächen. Betonkalender 2000, Band 2, S. 441–456.

[4] *Münsch, R., Reinhardt, H. W.:* Zur Berechnung von Membrantragwerken aus beschichteten Geweben mit Hilfe genäherter elastischer Materialparameter. Bauingenieur 70 (1995), S. 271–275.

[5] I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik an der Fachhochschule Aachen: Wind- und Schneelastannahmen für das Bauvorhaben Rundmischbett Märker Zementwerke vom 20. 10. 1999.

[6] I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik an der Fachhochschule Aachen: Windlastannahmen für den Bauzustand vom 11. 02. 2000.

Autoren dieses Beitrages:
Dr.-Ing. Jürgen Bellmann, Sofistik AG, Bruckmannring 38, 85764 Oberschleißheim, Dr.-Ing. Johann Köppl, Fichtner + Köppl, Planung und Beratung im Bauwesen GmbH, Äußere Münchener Straße 130, 83026 Rosenheim