Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

Einkaufscenter Titan Dome, Bogotá, Kolumbien

B. Stimpfle

Zusammenfassung In großen Einkaufszentren entstehen platzartige Aufenthaltsräume. Transparente oder transluzente Hüllen erzeugen eine angenehme Atmosphäre für Besucher. Dieser Artikel beschreibt eine Anwendung mit ETFE-Folie und PTFE-Glas Membrane, um solch eine Hülle zu erzeugen.

Shopping Mall Titan Dome, Bogotá, Columbia

Abstract Shopping malls create plaza like spaces. Transparent or translucent covers provide an ideal ambience to attract customers. This paper describes an application with ETFE-foil and PTFE-glass membrane to form such an envelope.

Bild 1. Luftbild Titan Plaza, Calle 80, Bogotá
Fig. 1. Aerial View Titan Plaza, Calle 80, Bogotá
Foto: Juan Manuel Crane
Source: Juan Manuel Crane

1 Einleitung

Im Zentrum der kolumbianischen Hauptstadt Bogotá wurde im Juli 2012 das Einkaufszentrum Titan Plaza eröffnet (**Bild 1**). Ausgehend von den Entwürfen des Architekten entstand ein Konzept bestehend aus Folienkissen und Membranflächen im Wechsel. Insgesamt gibt es fünf Membran-Folien-Konstruktionen sowie vier ETFE gedeckte Oberlichter.
Die Membran- und Foliendächer überdecken insgesamt eine Fläche von etwa 4.100 m². Die Membrane ist PTFE beschichtetes Membrangewebe. Die Folien haben eine Stärke von 250 µm.

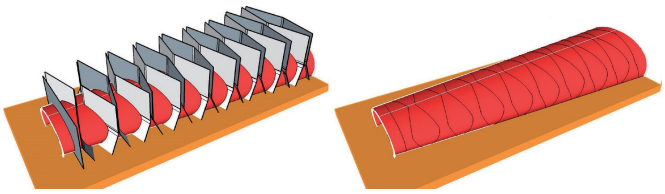

Bild 2. Geometrieentwicklung der Bögen am Grundkörper mit Schnittebenen
Grafik: fromTL; Modell von Tamayo + Montilla
Fig. 2. Geometry development of the arches based with body and cutting planes
Source: fromTL; Modell von Tamayo + Montilla

2 Projektbeschreibung

Das Projekt besteht aus einem Hauptdach, dem sogenannten Main Dome, mit einer Länge von 109 m und einer Breite zwischen 25 m und 37 m. Die Höhe dieses Main Domes variiert zwischen 9 m und 15 m. Auf beiden Seiten des Main Domes sind zwei runde Kuppeldächer und zwei halbmondförmige Dächer. Die runden Dächer haben einen Durchmesser von 15 m und eine Höhe von 10 m. Die halbmondförmigen Dächer sind 24 m lang, 9 m breit und haben eine Höhe von 2 m. Das Dach über den Tiefgaragen hat vier elliptische Oberlichter mit je einer Länge von 9 m, einer Breite von 5 m und einem Kissenstich von 1,5 m.
Die Grundgeometrie des Main Domes ist ein elliptischer Schnitt, der entlang Strahlen gestreckt ist, die durch einen Punkt gehen. Durch diesen Körper wurden vertikale und geneigte Ebenen geschnitten, die die Geometrie des Haupttragwerks, der Stahlbögen, erzeugen (**Bild 2**).

Die komplexe Geometrie der Stahlkonstruktion wurde mit geschweißten Kastenträgern erzeugt. Durch einen entsprechenden Zuschnitt der oberen, unteren und seitlichen Bleche lässt sich die zweiachsig gebogene und tordierte Geometrie erzeugen (**Bild 3**).
Im hinteren, breiteren Bereich des Gebäudes enden die Bögen auf einer 5,7 m höher liegenden Ebene, im vorderen

Bild 3. Umsetzung der Stahlgeometrie als Kastenträger
Foto: Ospinas and Cusezar
Fig. 3. Realisation of the steel geometry with box section
Source: Ospinas and Cusezar

Dipl.-Ing. Bernd Stimpfle
Beratender Ingenieur
formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh
Kesselhaus, Güttinger Straße 37, 78315 Radolfzell

 Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

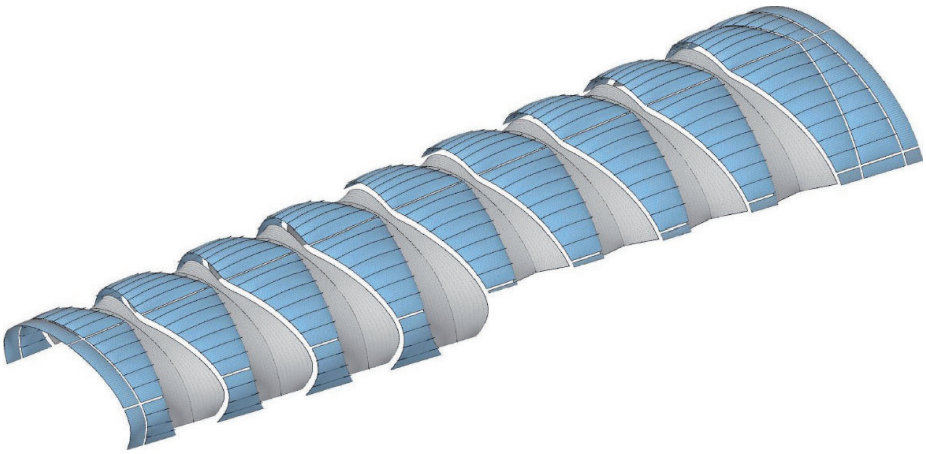

Bild 4. Main Dome; Rechenmodell
Fig. 4. Main Dome, numerical model

Grafik: formTL
Source: formTL

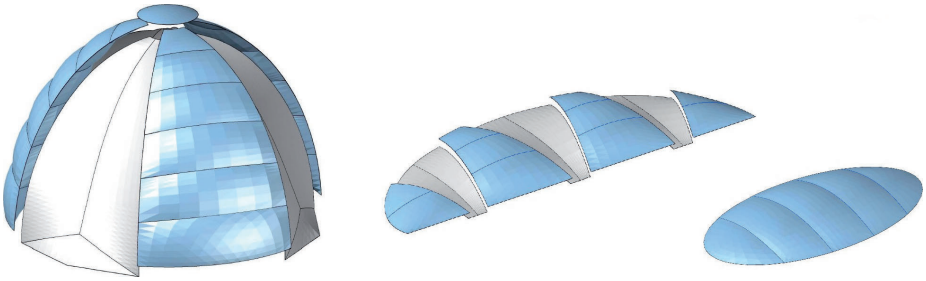

Bild 5. Nebendächer, Rechenmodelle
Fig. 5. Neighbour roofs, numerical models

Grafik: formTL
Source: formTL

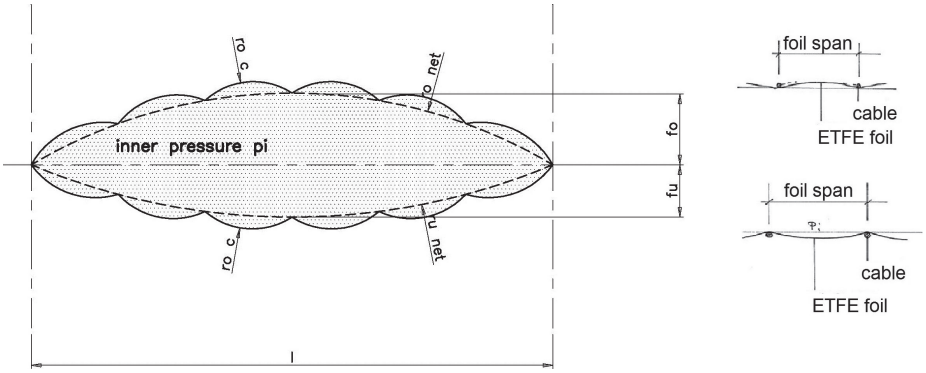

Bild 6. Prinzip Skizze eines seilverstärkten Kissens; Beispiel des ETFE Sekundärsystems (Projekt Tropical Islands)
Grafik: formTL
Fig. 6. Principle sketch for a cable reinforced cushion; example ETFE subsystem (project Tropical Islands)
Source: formTL

Bereich sind sie in der elliptischen Geometrie hinterschnittig nach unten geführt.
Das Konzept der Eindeckung der Dächer ist der Wechsel zwischen Folienkissen und mechanisch gespannten Membranen. Die Membranfelder sind sattelförmig. Die Ausbildung erfolgte mit Kehlseilen zur Aufnahme des Windsogs. Die Kissen sind umspannt von parallelen Seilscharen, um die Folienspannung innerhalb der zulässigen Grenzen zu halten.
Die sattelförmigen Membranfelder des Main Domes sind in der Mittelachse des Daches schmal und weiten sich zum Rand auf. Sie spannen über die volle Breite des Daches. Die Kissen sind in der Mittelachse breit und werden zum Rand hin schmaler (**Bild 4**). An den Längsriegeln des Haupttragwerks sind die Kissen geteilt, so dass jedes Kissenfeld aus insgesamt vier Einzelkissen besteht.

Die kreisförmigen Kuppeln sind in sechs Sektoren unterteilt. Davon sind je drei mit Membrane bzw. mit ETFE Kissen gefüllt (**Bild 5**). Die Membranen sind über Kehlseile geformt, die am unteren Rand zu den Eckpunkten geführt werden. Mittig sitzt ein kleines rundes Kissen.
Das halbmondförmige Dach besteht aus vier Kissen und drei Membranfeldern. Da die Kissen recht klein sind, waren nur wenige Seile für die Umspannung der Kissen erforderlich.
Die insgesamt vier Oberlichter sind elliptische Kissen mit Seilumspannung.
Verglichen mit üblichen Membranmaterialien ist die ETFE-Folie eher schwach. Daher ist die Spannweite begrenzt. Im günstigen Fall bei zweiachsigem Lastabtrag kann man bis zu 5 m Spannweite erreichen, aber in den meisten Fällen trägt die Folie fast einachsig, und es können Spannweiten bis etwa 3 m erreicht werden.
Für größere Spannweiten müssen Kissen oder auch einlagige ETFE-Konstruktionen mit Seilen verstärkt werden (**Bild 6**), oder sie liegen auf einer kleinteiligeren Tragkonstruktion.
Bei langen flachen Sattelflächen aus Membranen erzeugt Windsog recht hohe Spannungen. Üblicherweise liegen diese Spannungen deutlich höher als die Spannungen in der kurzen Richtung infolge von Schnee, und in diesem Fall infolge Hagel. Durch Kehlseile zum Abtrag des Windsogs können die Spannungen in beiden Richtungen in einer ähnlichen Größenordnung liegen, und so deutlich wirtschaftlicher dimensioniert werden.

3 Berechnung

Zur Berechnung wurden die Programme TLform für die Formfindung und TLload für die statische Berechnung von Professor Mike Barnes verwendet. Die Programme rechnen nach der Methode der dynamischen Relaxation und berücksichtigen die Besonderheiten von Membran-, Folien und Seilkonstruktionen. Dies sind, um einige Beispiele zu nennen, die Formfindung, orthotropes Materialverhalten (Kett- und Schußrichtung) sowie große Verformungen.
Die Rechenmodelle werden durch Seilelemente, sowie dreieckige Membranelemente diskretisiert. Es wird geometrisch exakt gerechnet unter Berücksichtigung der Längenänderung der Elemente, sowie der Verformung des Gesamtsystems. Das Gleichgewicht wird am verformten System ermittelt.

 Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

Entsprechend der kolumbianischen Norm NSR-10, muss in den flachen Bereichen eine Hagellast von 100 kg/m² berücksichtigt werden. Ab einer 15-Grad-Neigung kann die Hagellast halbiert werden. Hagelereignisse wiederholen sich mindestens einmal pro Jahr, daher gibt es für Hagel keine Abminderungen oder Vereinfachungen. Hagel ist für die Membranen und Folien von Titan Plaza der maßgebende Lastfall.

4 Luftversorgung

Das Gesamtvolumen aller Kissen beträgt etwa 3.700 m³. Die gesamte Anlage wird von zwei Gebläsestationen auf beiden Seiten des Main Domes versorgt (**Bild 7**).
Um die Druckverluste zu minimieren, erfolgt die Hauptversorgung durch relativ große Luftleitungen mit 500 mm x 200 mm. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Doppelboden war es nicht möglich, runde Kanäle zu verwenden.
Die einzelnen Kissenfelder werden mit Luftleitungen von 120 mm Durchmesser versorgt, und der Anschluss der Kissen auf den letzten Metern erfolgt mit flexiblen Schläuchen (**Bild 8**). Die beiden Seiten arbeiten als unabhängige Kreisläufe, aber im Falle des Ausfalls einer Gebläseeinheit kann im First ein Bypass geöffnet werden, sodass ein Gebläse das ganze System versorgen kann.
Der Innendruck kann für die Hagellast auf 1.100 Pa erhöht werden. Der Standarddruck beträgt 300 Pa.
Justierbare Auslassventile an allen Kissen dienen zum Einstellen der Luftwechselrate.

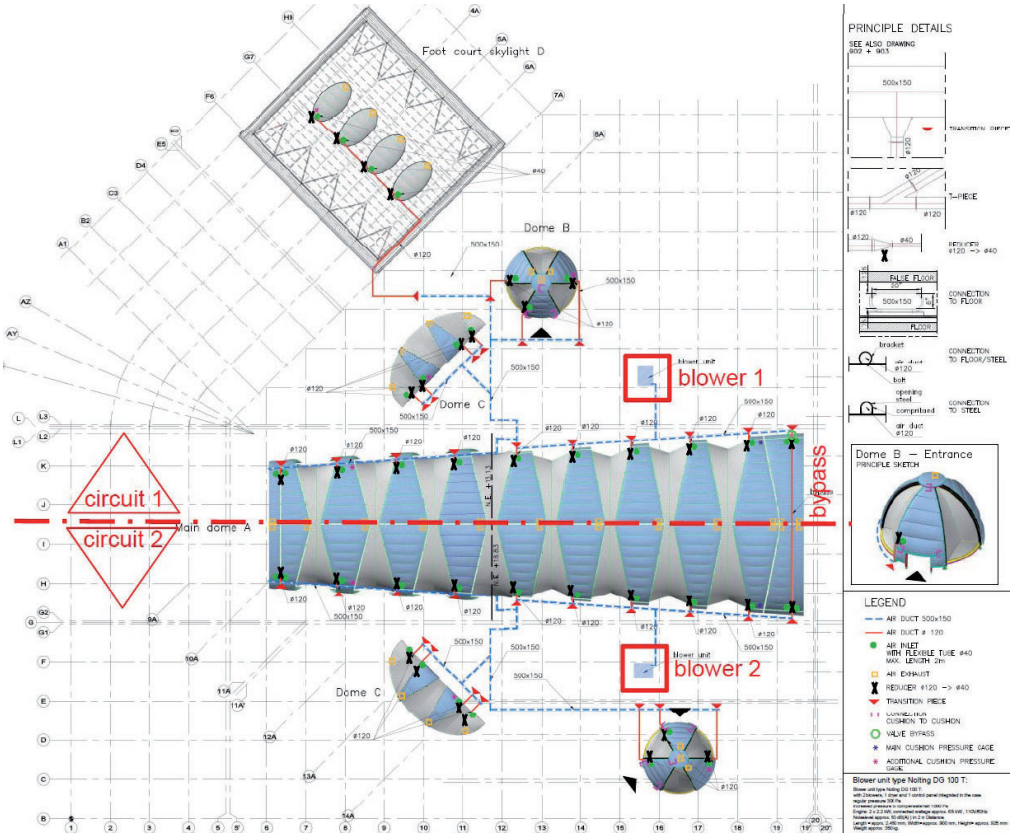

Bild 7. Grundriss Gesamtprojekt mit Luftversorgungskreisläufen
Fig. 7. Plan View complete project with air supply circuits

Grafik: formTL
Source: formTL

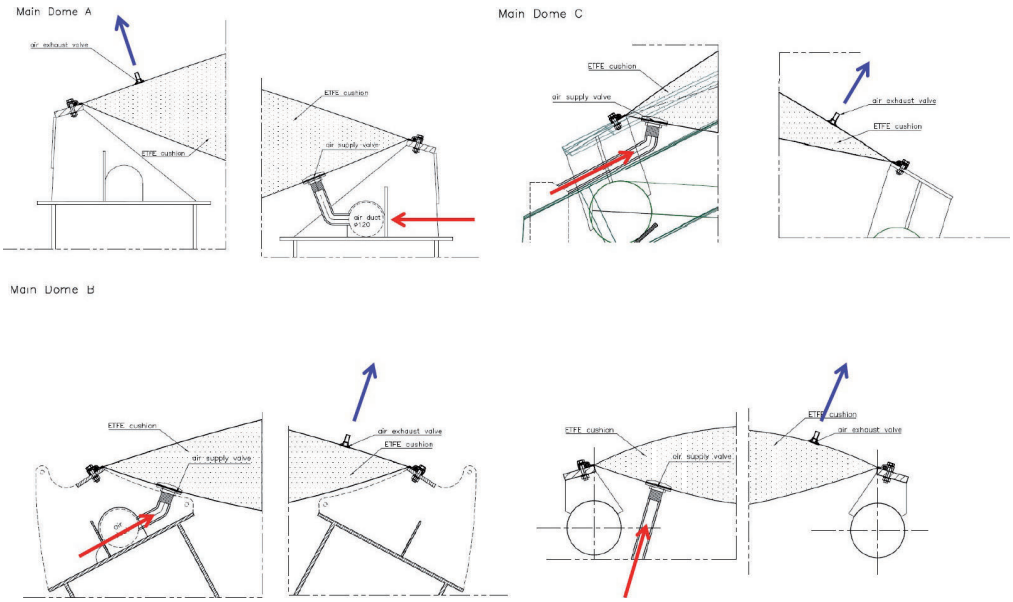

Bild 8. Luftein- und Luftauslässe
Fig. 8. Air infill and air exhaust

Grafik: formTL
Source: formTL

5 Details

Die Kissen sitzen aufgeständert über den Hauptträgern. Zwischen der Anschlusslinie der Kissen und der Trägeroberkante ist ein Spalt für eine natürliche Entlüftung. Durch vertikal angeordnete Stahlbleche wird Regenwasser außen gehalten. Über und unter dem Kissenanschluss sitzen Anschlussbleche für die Edelstahlseile. Der Anschluss der Kissen erfolgt mit einem für das Projekt entwickelten Strangpressprofil (**Bild 9**).
Die Membranfelder sind an einer Stahlreeling angeschlossen und folgen der Form der Hauptbögen (**Bild 14**). Die Doppelklemme ist an den Rundstäben mit U-Bügeln aus Aluminium angeschlossen. Ein Membranstreifen dichtet den Spalt von außen.
Die kreisrunden Kuppeln erlauben eine natürliche Entlüftung entlang der radialen Anschlusslinien und entlang dem

 Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

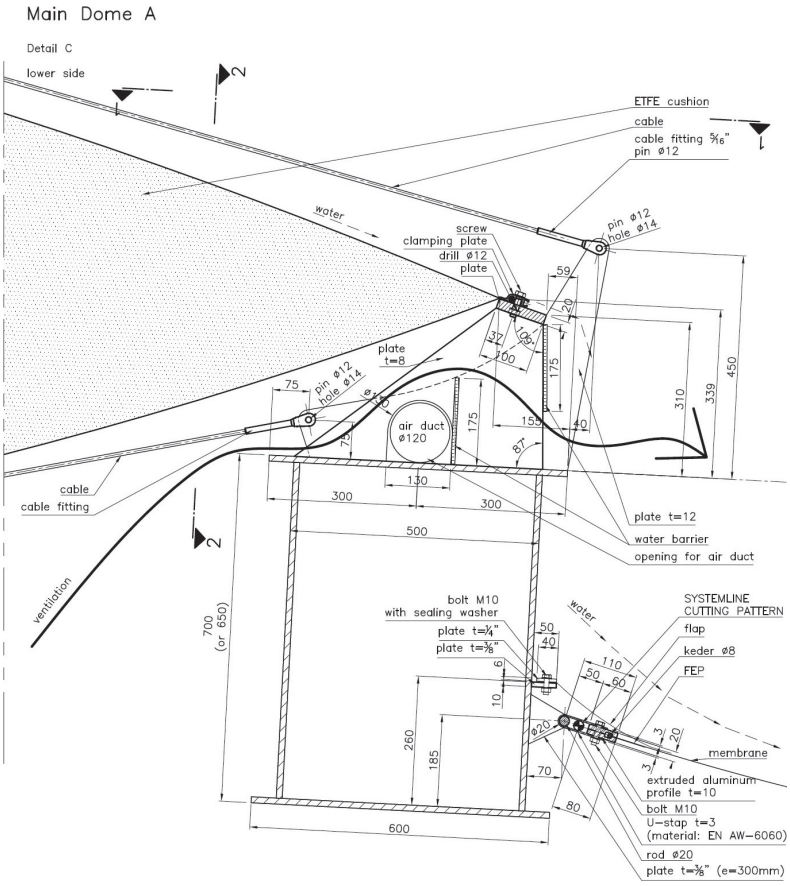

Bild 9. Anschlussdetail Kissen und Membrane entlang der Hauptbögen Grafik: formTL
Fig. 9. Attachment detail membrane and cushion to the main arches Source: formTL

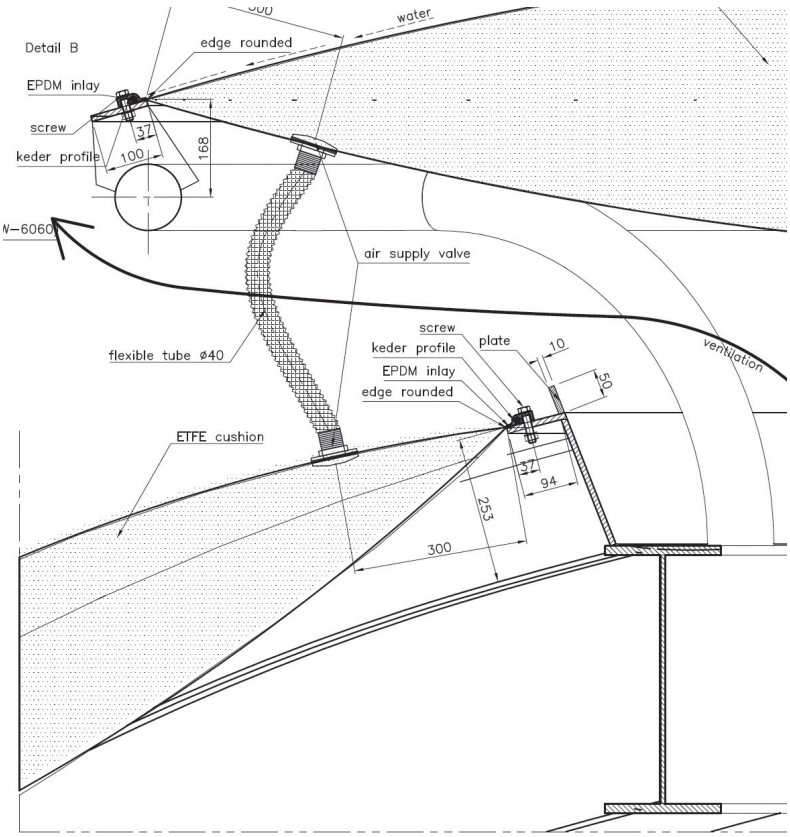

Bild 10. Anschlussdetail Zenitkissen der kreisrunden Kuppeln Grafik: formTL
Fig. 10. Attachment detail top cushion spherical dome Source: formTL

Zenitkissen (**Bild 10**). Die Luftversorgung des Zenitkissens erfolgt mit einem Verbindungsschlauch aus einem Hauptkissen.
Die Oberlichter werden durch einen elliptischen Ring gebildet. An diesem Ring sitzen die Anschlusslaschen für die Edelstahlseile (**Bild 11**). Diese Anschlusslaschen sind gleichzeitig Auflager für das umlaufende Anschlussblech der Kissenbefestigung.

6 Zuschnitt

Um der Krümmung der Kissen zu folgen und den Verschnitt zu minimieren, sind für den Folienzuschnitt zwischen den Seilen jeweils drei Folienstreifen. Am Auslauf aus dem Strangpressprofil wird die Randschweißnaht geklemmt, um ein Aufschälen zu verhindern.
Die Schweißnähte der Ober- und der Unterlage sitzen jeweils rechts und links der theoretischen Systemlinie, um die Materialanhäufung am Randkeder zu minimieren (**Bild 12**).
Das PTFE-Glas Material kam in unterschiedlichen Chargen mit unterschiedlichem Dehnverhalten. Für jede Charge wurden Biaxial Tests zur Ermittlung der passenden Kompensationsfaktoren gemacht.
Im mittleren Bereich mit geringer Krümmung wurde die volle Materialbreite verwendet, dies erlaubt bei Sheerfill V circa 3,7 m Zuschnittsbreite. Entlang dem stark gekrümmten Rand wurde die Bahnbreite halbiert, um die Verzerrung im Membranmaterial zu minimieren (**Bild 13**).

7 Montage

Die Stahlbögen wurden eingehoben und mit den Nachbarbögen durch Längsträger verbunden. Die Anschlussbleche für die Kissen und für die Kissenseile wurden vor Ort angeschweißt. Die komplexe Geometrie der Stahlkonstruktion führte zu großen Toleranzen, die im Zuge der Kissen- und Membranmontage ausgeglichen werden mussten.
Mit dem gewählten Membrandetail war es möglich, die Toleranzen auszugleichen. Hierzu wurden U-Bügel in unterschiedlicher Länge verwendet.
Die Kissen konnten durch eine Änderung des Kissenstiches Toleranzen bis zu einem gewissen Maß ausgleichen. Wo dies nicht mehr ausreichend war, wurde der Stahl angepasst.
Da die Toleranzen meist zwischen 10 cm und 20 cm lagen, war es nicht in allen Bereichen möglich, die Kissen überall faltenfrei zu montieren.
Parallel zur Stahlmontage wurde mit der Membran- und der Kissenmontage begonnen. Unter den Membranfeldern wurden hierzu Hilfsnetze gespannt. Auf diesen Netzen wurden die Membranfelder ausgelegt und dann zu den Randlinien gespannt.
Der Rand zu den Bogenbindern wurde mit Membranstreifen geschlossen.

 Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

Die Kissen wurden entlang der Randlinie angeschlossen. Nachdem die Seile angeschlossen waren wurden die Kissen aufgeblasen (**Bild 15**).

8 Zusammenfassung

Die Mischung von transluzenten und transparenten Materialien erzeugt einen angenehmen hellen Raum (**Bild 16**). Die Eindeckung spendet Schatten, gibt aber zur gleichen Zeit auch den Blick in den Himmel frei.
Die Wahl von Großkissen anstelle der oft verwendeten schmalen Kissenstreifen erzeugt transparente Bereiche, die nur von sehr dünnen fast unsichtbaren Seilen unterbrochen sind (**Bild 17**).
Durch die Verwendung von großen Luftkanälen sind die beiden zentral angeordneten Gebläseeinheiten in der Lage, das gesamte Projekt mit ausreichend Stützluft zu versorgen.
Durch die gewählte Detaillierung konnten die sehr großen Toleranzen des Projektes weitgehend ausgeglichen werden.

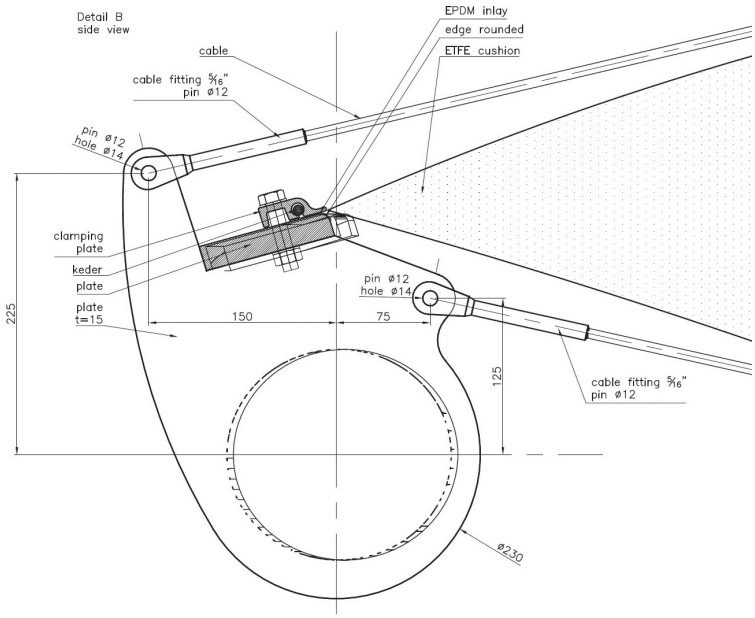

Bild 11. Anschlussdetail der Oberlichter
Fig. 11. Attachment detail skylights

Grafik: formTL
Source: formTL

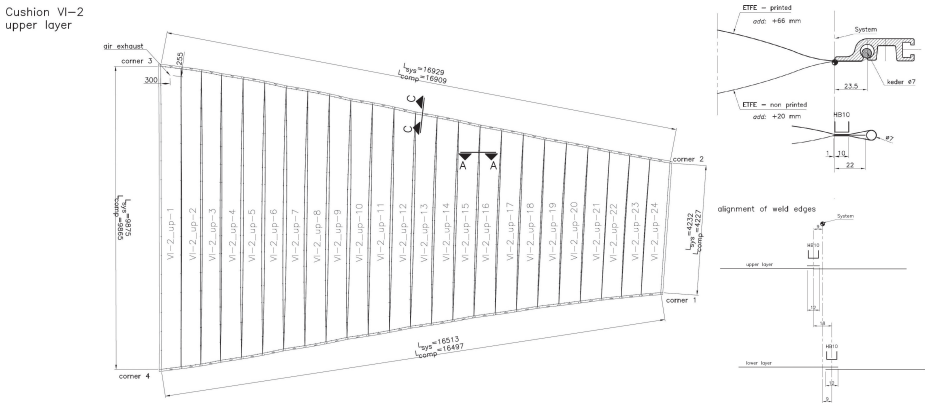

Bild 12. Nahtlayout und Details eines Main Dome Kissens
Fig. 12. Seam layout and details of one main roof cushion

Grafik: formTL
Source: formTL

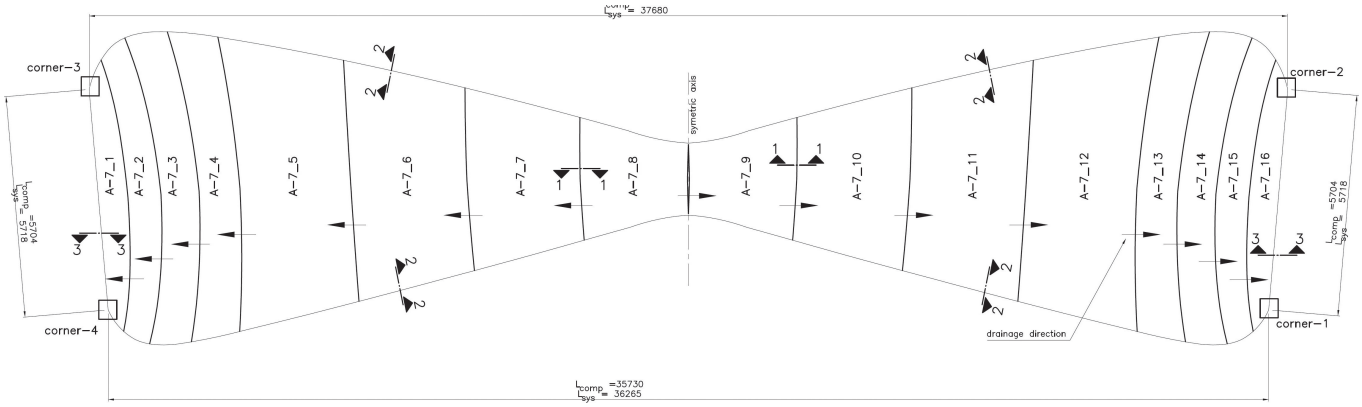

Bild 13. Nahtlayout eines Main Dome Membranfeldes
Fig. 13. Seam layout of one main roof panel

Grafik: formTL
Source: formTL

 Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

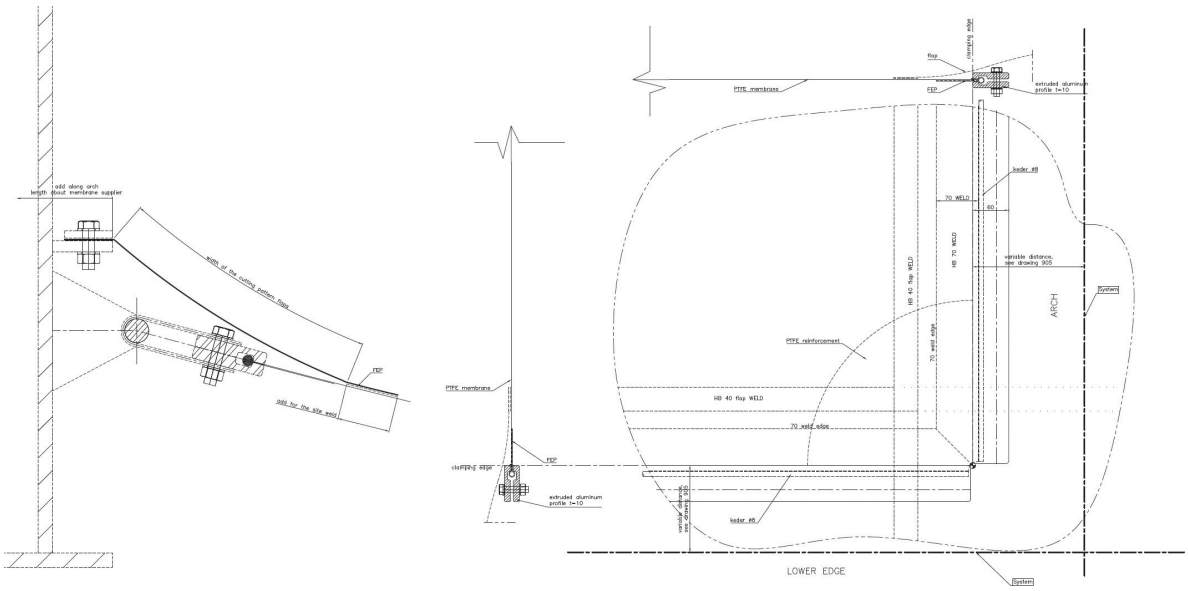

Bild 14. Rand- und Eckdetail
Fig. 14. Border and corner detail

Grafik: formTL
Source: formTL

Bild 15. Kissenmontage am Main Dome
Fig. 15. Cushion installation at the Main Dome

Foto: Castro Rojas
Source: Castro Rojas

Bild 16. Der zentrale Main Dome von innen bei Nacht
Fig. 16. The central main dome during the night

Foto: Rodrigo Dávila
Source: Rodrigo Dávila

Projektdaten

Dachfläche	4.100 m²
Kissenvolumen	3.600 m³
Langes Dach	109 m lang; 25 m bis 37 m breit, 9 m bis 15 m hoch
Kuppeln	15 m im Durchmesser und 10 m hoch
Halbmondförmige Dächer	24 m lang, 9 m breit und 2 m hoch
Ellipsen Oberlichter	9 m lang, 5 m breit und 1,5 m Kissenhöhe
Membranmaterial	PTFE-Glasgewebe Sheerfill V von Saint-Gobain Performance Plastics
Folienmaterial	bedruckte ETFE Folie Nowofol ET6235 250 µ
Seile	Edelstahllitzenseile

Projektbeteiligte

Projektentwickler	Ospinas S.A. and Cusezar
Architekt	Tamayo + Montilla Arquitectos, Bogotá
Membran- und Folienunternehmer	Castro Rojas Ingenieros y Arquitectos S.A.S., Bogotá
Membrankonfektion	Castro Rojas, Bogotá
Folienkonfektion	IASO, Lleida
Gebläse	Nolting, Detmold
Folien- und Membranplanung	formTL, Radolfzell

Bild 17. Der Blick zum Himmel
Fig. 17. A view to the sky

Foto: Tamayo + Montilla
Source: Tamayo + Montilla

 Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf