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

DOI 10.37544/0005–6650–2021–10–29

ETFE-Überdachung des Rynek Łazarski in Posen, Polen

B. Stimpfle, D. Emmer

ZUSAMMENFASSUNG Der neugestaltete Rynek Łazarski in Posen wird von einem großen kreisrunden Kissendach überdeckt. Dank der transparenten Eindeckung entsteht ein helles und vor Witterung geschütztes Areal, das zum Einkaufen in den darunterliegenden Marktständen, oder auch nur zum Verweilen einlädt.

STICHWÖRTER

Überdachung, Stahlträgerrost, ETFE, Großkissen

ETFE roof Rynek Łazarski in Poznań, Poland

ABSTRACT The rearranged Rynek Łazarski in Poznań is covered by a circular cushion roof. Thanks to the transparent cladding a bright space is created, protected from the weather conditions, inviting to shop at the market stalls underneath, or just to stay.

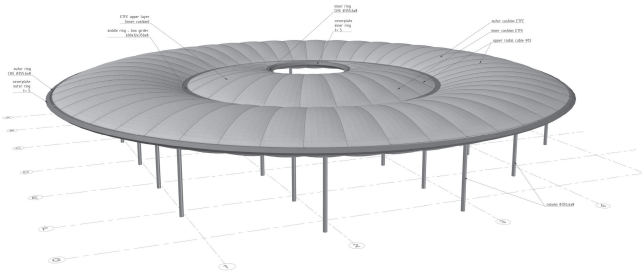

Bild 1. Perspektive von oben *Grafik: formTL*
Fig. 1. Perspective view from above *Source: formTL*

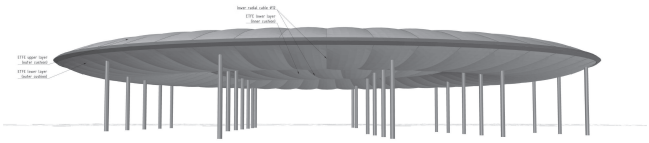

Bild 2. Perspektivansicht *Grafik: formTL*
Fig. 2. Perspective view *Source: formTL*

1 Einleitung

Für die Neugestaltung des Rynek Łazarski (Lazarusmarkt) in Posen wurde ein Architekturwettbewerb durchgeführt. Der Siegerentwurf des Architekten Jacek Bułat hat die Marktstände unter einem kreisförmigen lichtdurchlässigen Dach angeordnet. Der Platz ist überdacht mit einer großen Tischkonstruktion mit transparenter ETFE-Kisseneindeckung. (**Bild 1** und **Bild 2**)

2 Projektbeschreibung

Das Kissendach überdeckt eine Fläche von etwa 2 400 m². Die Tischkonstruktion bildet ein Stahl-Trägerrost mit einem äußeren, einem mittleren sowie einem inneren Ring. Den Rost bilden orthogonal verlaufende Kastenprofile mit biegesteifen Anschlüssen an die Stützen. An den drei Ringen angeschlossene Großkissen formen das pneumatische Dach. Die Spannweite des äußeren Kissens ist umlaufend konstant etwa 13,5 m, das innere Kissen hat eine maximale Spannweite von etwa 17 m, und verjüngt sich auf weniger als 1 m an den beiden Enden. (**Bild 3** und **Bild 4**)

Mit ETFE-Folien lassen sich aufgrund der Materialeigenschaften nur begrenzte Spannweiten realisieren. Bei Großkissen lässt sich diese Einschränkung mithilfe Seilscharen auf beiden Kissenseiten umgehen. Der Innendruck spannt die Seile über die innenliegenden ETFE-Folien vor, die die äußeren Lasten sicher in die Randträger leiten. (**Bild 5**) [1], [2]

Seilscharen aus 12 mm Edelstahlseilen bilden die Großkissen. Die Seile haben einen maximalen Abstand von circa 3,5 m. Beim äußeren Kissen verjüngt sich dieser Abstand auf circa 1,8 m, beim inneren Kissen auf circa 77 cm. Die Kissenunterseite wird von den Stützen des Trägerrostes durchdrungen. An diesen Stellen sind die Folienkissen entsprechenden ausgeschnitten. Die Kissenhälften sind getrennt oberhalb und unterhalb der Ringe angeschlossen.

3 Berechnung

Zur Berechnung wurden die Programme von Professor Mike Barnes verwendet. TLform für die Formfindung und TLload für die statische Berechnung. 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 (Längs- und Querrichtung) sowie große Verformungen.

Die Rechenmodelle werden durch Seilelemente, sowie dreieckige Membranelemente diskretisiert. Es wird unter Berücksichtigung der Längenänderung der Elemente, sowie der Verformung

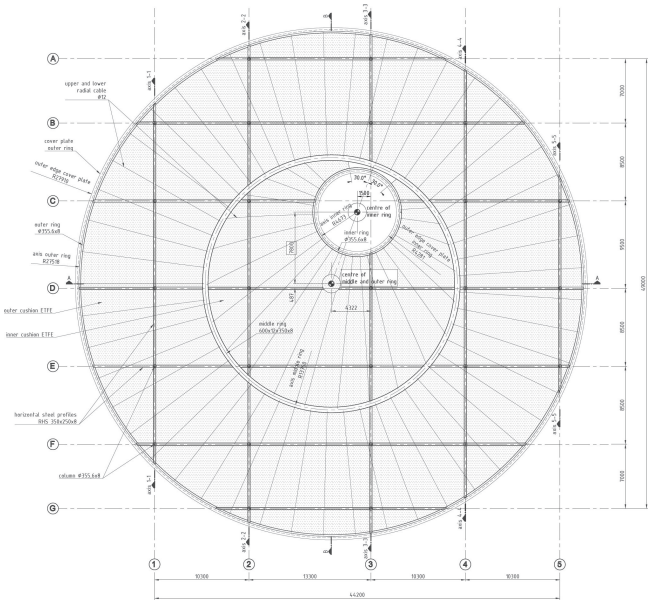

Bild 3. Grundriss *Grafik: formTL*
Fig. 3. Plan view *Source: formTL*

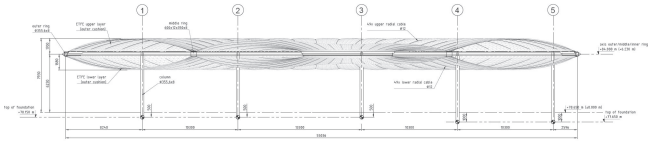

Bild 4. Schnitt *Grafik: formTL*
Fig. 4. Section *Source: formTL*

des Gesamtsystems, geometrisch exakt gerechnet. Das Gleichgewicht wird am verformten System ermittelt. (**Bild 7**, **Bild 10** und **Bild 11**)

Kissenkonstruktionen reagieren auf äußere Kurzzeitlasten mit einer Änderung des Innendrucks. Windsog auf der Kissenoberseite will das Kissenvolumen vergrößern, dadurch reduziert sich der Innendruck. Abhängig vom Lastniveau kann der Druck auch 0 werden. Winddruck auf die Kissenoberseite stützt sich auf dem Luftvolumen ab, und erhöht den Innendruck. Bei zunehmendem Lastniveau wird die obere Folie schlaff und der Winddruck stützt sich über das Luftpolster komplett auf der unteren Folie ab. Somit trägt dann die untere Folie den Winddruck. Bei Schnee erfolgt die Laständerung langsam, sodass die Stützluft immer nachgeregelt wird. Um eine Schneelast abzutragen muss deshalb der Innendruck auf einen Wert erhöht werden, der größer als die Schneelast ist, da sonst das Kissen kollabiert. (**Bild 6**)

Im Bereich des mittleren Rings kann sich eine leichte Schneeanhäufung ergeben, die bei der Berechnung berücksichtigt wurde.

Für den Fall eines Ausfalls der Stützluftversorgung wurden zwei weitere Szenarien genauer betrachtet: Zum einen wurde untersucht welche Schneemengen in den einzelnen Teilfeldern des havarierten Kissens sicher abgetragen werden können. Wenn das

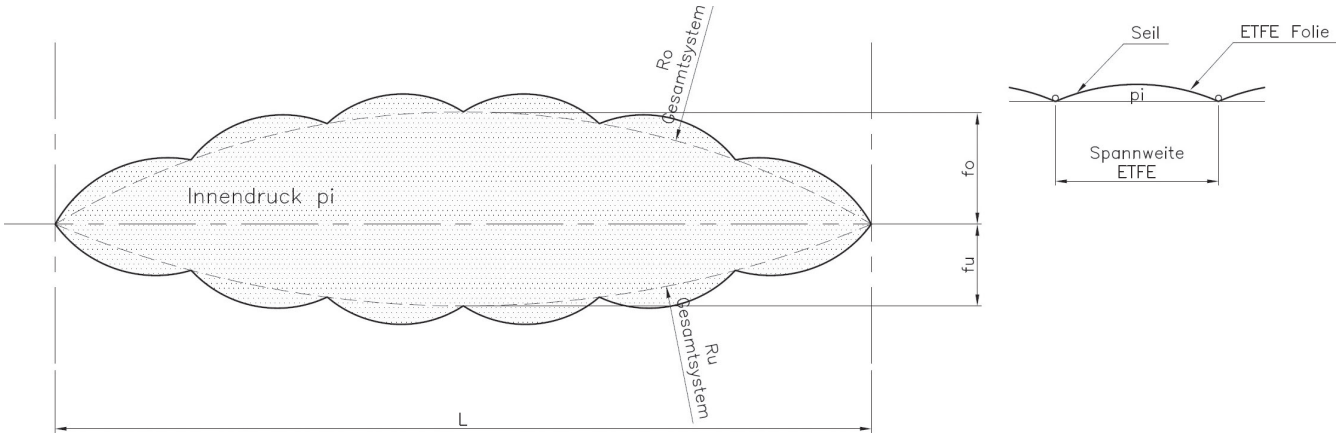

Bild 5. Prinzip Skizze eines seilverstärkten Kissens *Grafik: formTL*
Fig. 5. Principle sketch for a cable reinforced cushion *Source: formTL*

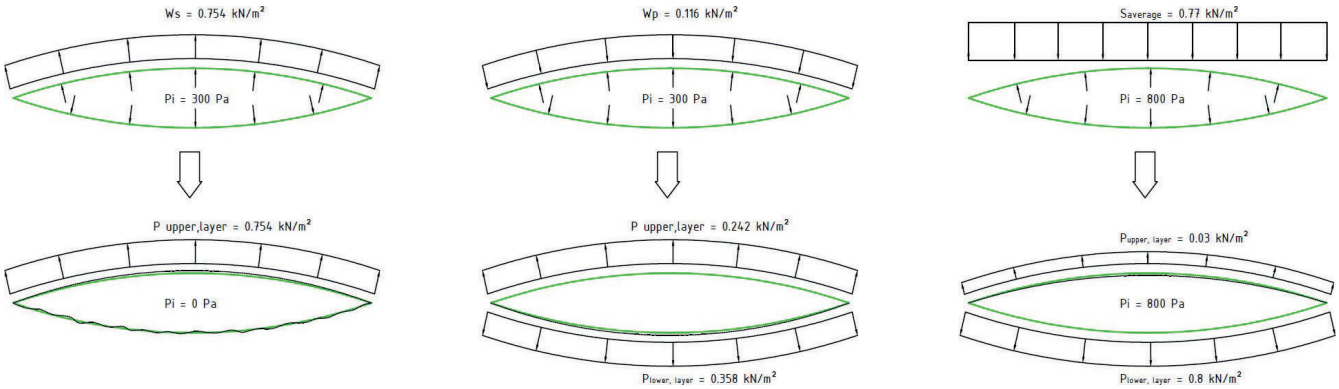

Bild 6. Lastabtrag der Kissen *Grafik: formTL*
Fig. 6. Load transmission cushion *Source: formTL*

Risiko besteht, dass die Schneemenge diese Werte übersteigt, muss rechtzeitig geräumt werden.

Als zweiter Fall wurde die maximale zulässige Wasseransammlung im Kissen ermittelt. Kleine Felder lassen sich auch vollständig gefüllt oder bis zur maximalen Regenmenge in drei Tagen nachweisen. Alle anderen Felder sind mit Notüberläufen versehen, durch die das Wasser im Havariefall ablaufen kann. (**Bild 8, Bild 9**)

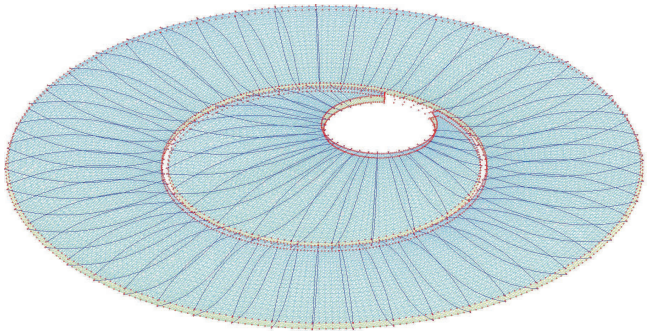

Bild 7. Rechenmodell *Grafik: formTL*
Fig.7. Analysis model *Source: formTL*

4 Luftversorgung

Das Gesamtvolumen der beiden Kissen beträgt etwa 5 150 m³. Drei Gebläsestationen versorgen die beiden Kissen mit Stützluft. Die Gebläse sitzen auf zwei Pavillons unter der Dachkonstruktion. Auf Pavillon A und B sitzt je ein Gebläse für den äußeren Ring. Auf Pavillon A sitzt zudem noch das Gebläse für das kleinere innere Kissen.

Bild 8. Havarie Verformung *Grafik: formTL*
Fig. 8. Collapse deformation *Source: formTL*

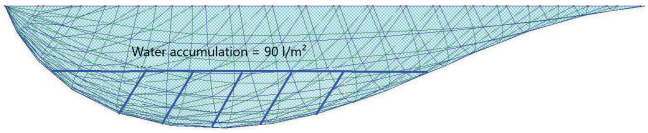

Bild 9. Ermittlung der zulässigen Wassermenge *Grafik: formTL*
Fig. 9. Determination admissible water accumulation *Source: formTL*

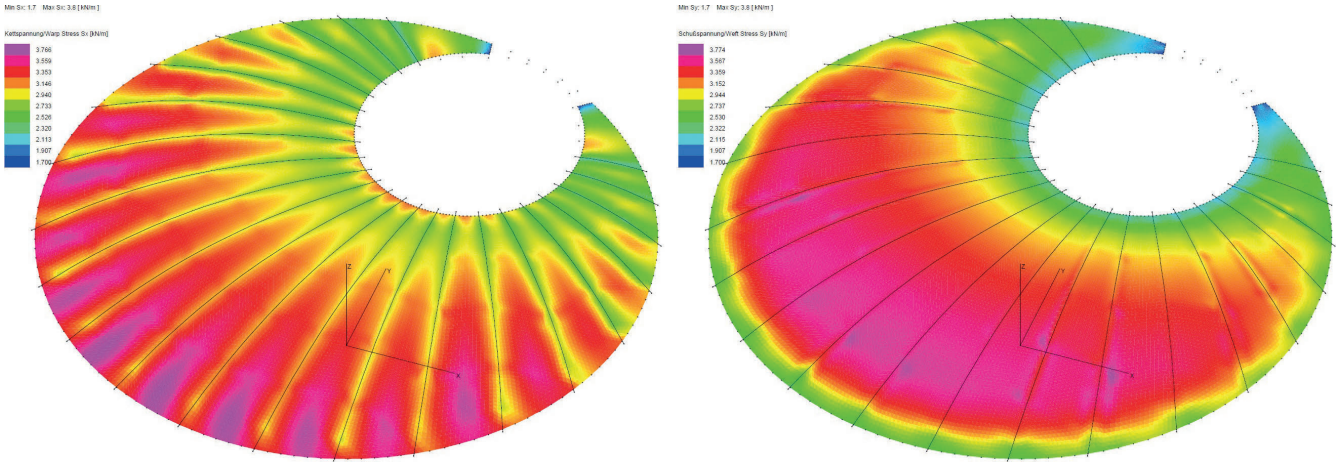

Bild 10. Maximale Folienspannungen des inneren Kissens in der oberen Lage *Grafik: formTL*
Fig. 10. Maximum foil stress inner cushion upper layer *Source: formTL*

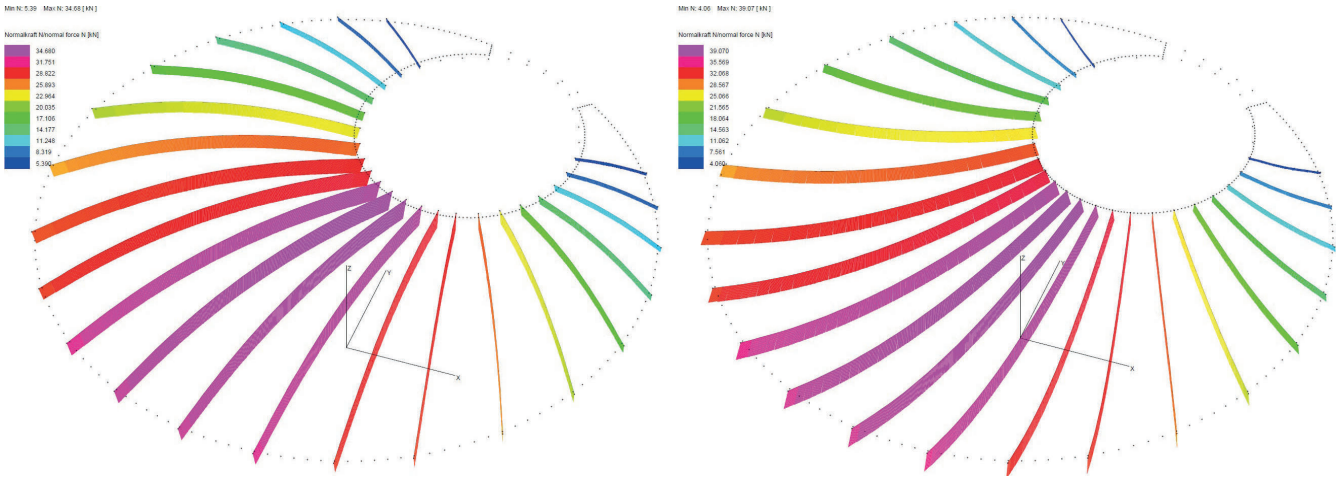

Bild 11. Maximale Seilkräfte des inneren Kissens bei Windsog und Winddruck *Grafik: formTL*
Fig. 11. Maximum cable tension inner cushion wind suction and pressure *Source: formTL*

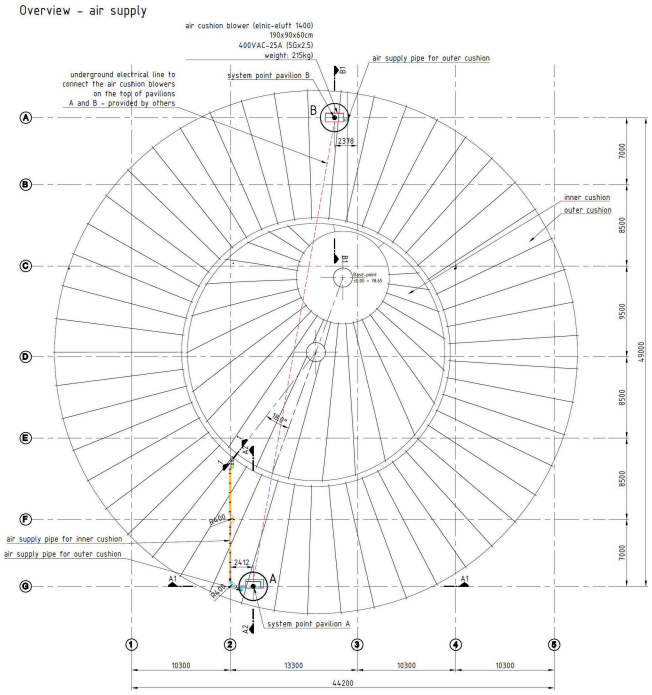

Bild 12. Luftversorgung *Grafik: formTL*
Fig. 12. *Supporting-air supply Source: formTL*

Die Luftleitung für das innere Kissen läuft entlang einer Trägerachse durch das äußere Kissen, und bläst dann die Stützluft durch die Stege des mittleren Rings ein (**Bild 12** und **Bild 13**). Der Regelinnendruck beträgt 300 Pa. Bei aufkommendem Schneefall wird der Innendruck auf maximal 800 Pa erhöht. Ein Schneesensor überwacht die Schneelast.

5 Details

Die ETFE-Folie ist getrennt in obere und untere Lage. Die obere Lage schließt mit flachen Extrusionsprofilen an der umlaufenden Rinne an. In der Rinne sitzen Anschlusskonsolen zur Aufnahme der Folienseile. Die untere Folie schließt mit stehenden Aluminium Profilen an ein umlaufendes Blech an, das senkrecht zur Folienfläche ausgerichtet ist.

Das äußere Kissen ist in vier Einzelfelder geteilt, die mit einem Klemmprofil gestoßen sind. Die Anschlussdetails wurden so gewählt, dass keine Schrauben oder Löcher von außen nach innen in das Kissenvolumen gehen, um den hierdurch entstehenden Luftverlust gering zu halten.

Die untere Folie ist durch die Stützen durchdrungen. Hier ist die Folie mit kreisförmigen Klemmprofilen ausgewechselt und mit einer trichterförmigen PVC-PES Membrane dicht an die Stützen angeschlossen. Für die Montierbarkeit gibt es jeweils Klemmstöße die zu diesen fliegenden Ringen laufen.

An der Mittelrinne erfolgt der Anschluss von beiden Seiten nach demselben Prinzip. Für den Havariefall gibt es Notentwässerungspunkte. Hierbei werden die obere und untere Folie mit einem transparenten flexiblen Schlauch verbunden. Dadurch kann das anfallende Regenwasser auch ohne Innendruck sicher nach unten abgeleitet werden. (**Bild 14, Bild 15**, **Bild 16** und **Bild 17**)

6 Zuschnitt

Die Folien sind radial zugeschnitten, parallel zu den Folienseilen. Beim äußeren Kissen haben die Folien umlaufend dieselbe Form und denselben Zuschnitt. Nur neben den Stößen gibt es abhängig von der exakten Lage der Stöße Sonderfelder. Ebenso wie im Bereich der Stützendurchdringungen auf der Unterseite mit den zugehörigen Stößen.

Das Innenkissen hat eine Symmetrieachse und einen Stoß in Kissenmitte. Auch hier gibt es auf der Unterseite Sonderfelder bei den Stützen und deren Klemmstößen. (**Bild 18**)

7 Fertigung

Um ein solches Projekt zu fertigen, bedarf es der sorgfältigen Auswahl der Fertigungsstätte. Da die einzelnen Segmente des Daches jeweils knapp über 400 m² groß sind, musste ein Ort gefunden werden, der die Konfektion mit möglichst wenig Bewegung des jeweils zu fertigenden Foliensegments ermöglichte. Dieser wurde dann in Polen gefunden, mit der richtigen Maschinerie an der Hand und den Abstimmungs- und Anpassungsmöglichkeiten in der Fertigungstechnologie. Ein Dach, das so in dieser Größe als ein Ein-Kammer-System noch nie gebaut wurde, erforderte ein-

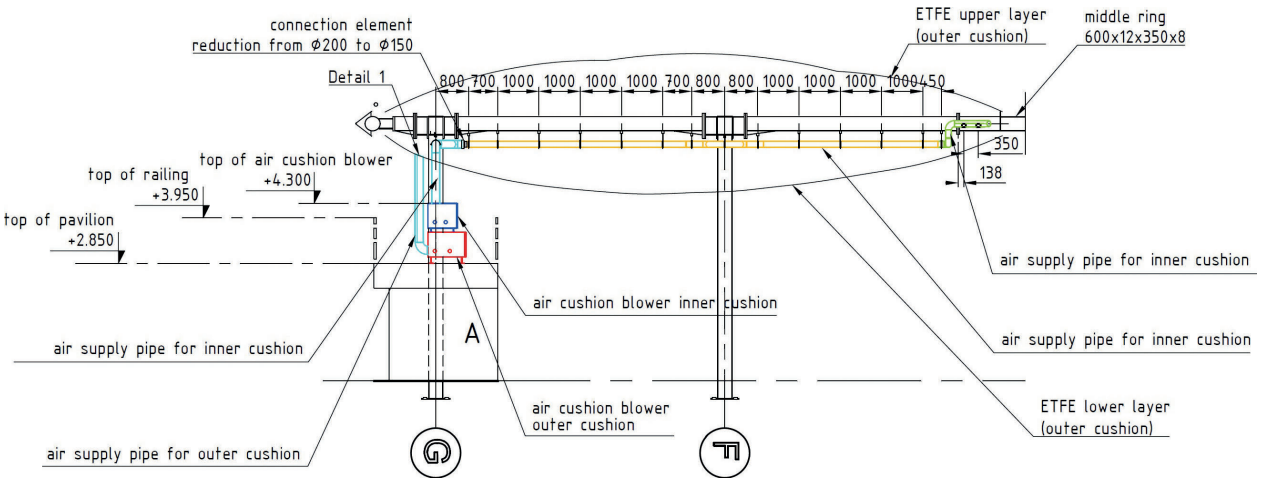

Bild 13. Luftversorgung von Pavillon A *Grafik: formTL*
Fig. 13. Supporting-air supply coming from pavilion A *Source: formTL*

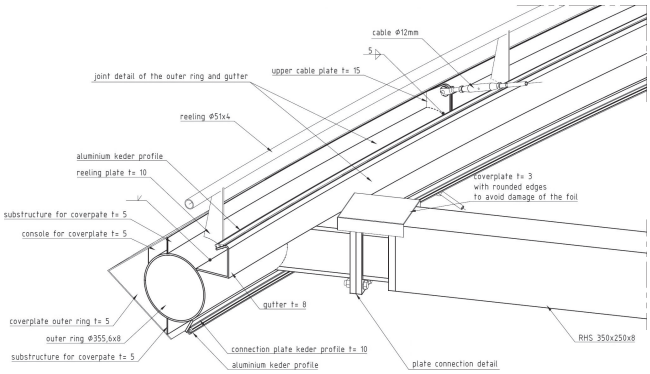

Bild 14. Anschlussdetail am äußeren Ring *Grafik: formTL*
Fig. 14. Connection detail outer ring *Source: formTL*

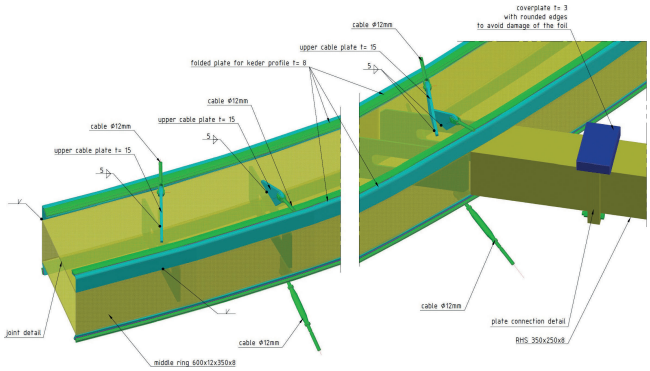

Bild 15. Anschlussdetail am mittleren Ring *Grafik: formTL*
Fig. 15. *Connection detail middle ring Source: formTL*

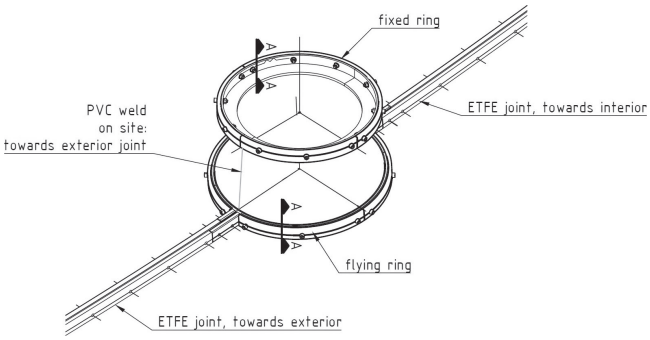

Bild 16. Fliegender Ring bei den Stützendurchdringungen *Grafik: formTL*
Fig. 16. Flying ring at the column penetrations *Source: formTL*

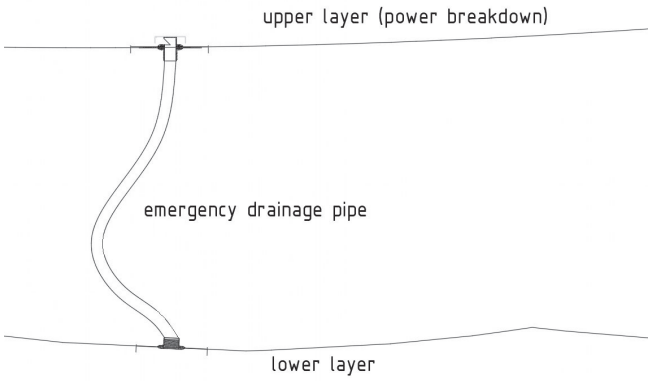

Bild 17. Prinzip der Notentwässerungen *Grafik: formTL*
Fig. 17. Principle of the emergency drainage *Source: formTL*

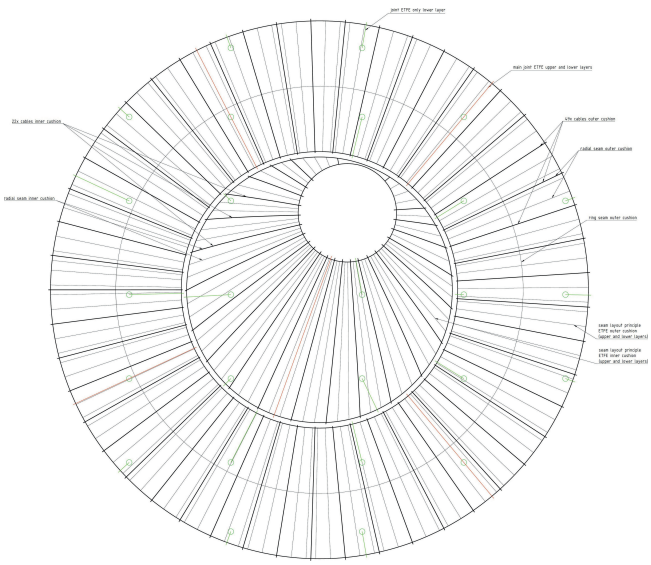

Bild 18. Zuschnittslayout und Lage der Folienstöße *Grafik: formTL*
Fig. 18. Cutting pattern layout and location of the joints *Source: formTL*

wandfreie Kommunikation zu Vermeidung jeglicher Missverständnisse und Schäden.

Vorab wurde zunächst ein Mockup aufgebaut, mit verschiedenen Bedruckungsgraden, die später für die Verschattung sorgen sollten. Hier gab es dann bei der Besichtigung eine besondere Entscheidung: Die Bedruckung der Folie wurde für die untere Lage festgelegt. Damit erreichte man, dass man den doch eher geradlinigen Stahlbau des Tragwerks nicht so kontrastiert von unten wahrnimmt. (**Bild 19**)

Wie man am fertigen Projekt und den Bildern sehen, kann war das eine sehr gute Entscheidung. Auch wenn sich die Perspektive aus der Luft kaum jemandem bietet, so zeigen die Drohnenbilder doch sehr eindrucksvoll das wundervolle Design (**Bild 20**). Vor allem für die Stützendurchdringungen wurden vorab zunächst etliche Probestücke angefertigt. Dies erfolgte in enger Abstimmung zwischen dem Planungs- und dem Fertigungs-Team. Auf dem „Papier“ ist das Eine, in der Fertigung ist das Andere. Zur Realisierung der komplexen Details wurden die entsprechenden Spezial-Schweiß-Werkzeuge gefertigt, denn solche engen Radien, wie bei den Stützen, können nur noch von Hand gefertigt werden.

Parallel dazu wurden auch die Möglichkeiten der Fertigung und damit zusammenhängend die endgültige Aufteilung der oberen und unteren Folienlagen berechnet und geprüft. Neben dem Fertigungs-Layout wurden maßstabsgetreu die einzelnen Zuschnitte und die Felder dargestellt, um ein Gefühl für die Dimensionen im Fertigungsablauf der doch sehr großen Felder zu bekommen. „Nesting at its best“, nicht nur für die Zuschnitte auf den Folien-Rollen sondern auch für die Felder in der Fertigung.

Bild 19. Mockup mit drei Bedruckungsgraden
Foto: Temme // Obermeier GmbH
Fig. 19. Mockup with three print grades *Source: Temme // Obermeier GmbH*

Bild 20. Luftbild kurz nach Fertigstellung der Montage
Foto: Temme // Obermeier GmbH
Fig. 20. Aerial view, shortly after finalising the installation
Source: Temme // Obermeier GmbH

Bild 21. Gurtgerüst für das innere Kissen *Foto: Temme // Obermeier GmbH*
Fig. 21. Belt scaffolding for the inner cushion
Source: Temme // Obermeier GmbH

Beim Zuschnitts-Layout wurde in hohem Maß auf die Übereinstimmung mit den Folienseilen geachtet, um hier keine störenden Effekte zu erzeugen. So wurden auch hier im speziellen die Nähte gelegt, da diese durch die Material-Doppelung weniger anfällig für Abrieb sind.

Die Nähte der bedruckten Lage wurden im sogenannten Back-Strip-Verfahren hergestellt. Das heißt, die Bedruckung der Folie wird für die Schweißnaht nicht entfernt, sondern man verbindet die Zuschnitte Stoß auf Stoß mit einen dahinter gelegten Schweiß-Streifen. Damit ist ein gleichmäßigeres Bild möglich, da es keine Unterbrechung in der Bedruckung gibt.

Es wurden zunächst die oberen und unteren Folien des inneren Kissens hergestellt. So war die Fertigstellung des inneren Kissens und damit auch gleich ein Probelauf der Luftversorgung vorab möglich. In der Folge wurden dann die vier Felder der oberen Lage des äußeren Kissens und danach die Felder der unteren Lage fertig gestellt. Diese sollten dann zusammen das bisher größte Ein-Kammer-Folienkissen-System der Welt ergeben. Die Montage erfolgte in der gleichen Reihenfolge wie die Fertigung.

8 Montage

Groß-Kissen sind immer eine besondere Herausforderung für die Montage. Aufgrund der enormen Größe der Folienkissen – das innere mit circa 500 m² und das äußere mit circa 1 780 m² – sind diese anfällig gegen alle Arten von Niederschlägen und Windereignissen.

Die Vorbereitung der Montage erfolgte daher sehr genau und penibel. Alle vorbereitenden Arbeiten, wie die Vormontage der gesamten Luftversorgung, der Aluminium-Befestigungsprofile und der Seil-Anschläge wurden vor der Folienmontage abgeschlossen. Außerdem erfolgte das Vorsortieren der Seile, aller Beschläge und der notwendigen Werkzeuge und Sicherungseinrichtungen. Des Weiteren wurden das Tragwerk und der Boden abgedeckt, um die ETFE-Folie bestmöglich zu schützen. Im Stahlbau zwischen den Trägern wurden Gurtnetze eingebaut um der, während des Einbaus noch lockeren Folie, eine möglichst ebene Auflage zu geben (**Bild 21**).

Dann musste es schnell gehen. Zunächst wurde das innere Kissen eingebaut – mit knapp 500 m² allein schon grösser als das Großkissen am Lilienthalhaus in Braunschweig. [3], [4]

Nach eingehendem Studium der Wettervorhersage wurden die beiden Felder der oberen Lage des inneren Kissens ausgebreitet, am Stahlbau angeschlossen und die Felder am Stoß miteinander verbunden. In der Folge wurden zur Sicherung die späteren Windsog Stahlseile aufgelegt, damit diese schon mal die noch lockeren Folienelemente durch ihr Eigengewicht sichern. Dann wurden die beiden unteren Felder montiert, was aufgrund der Durchdringungen für die Stützen des Tragwerkes etwas mehr Zeit in Anspruch nahm. Am Ende dauerte es knapp vier Tage vom Einheben des ersten Feldes des inneren Kissens bis es mit der vormontierten Luftversorgung aufgeblasen werden konnte. Danach wurden, bei noch nicht vorhandenem Regeldruck, die unteren Folienseile eingebaut (**Bild 22**).

Dieselben Arbeitsvorbereitungen wurden für den Einbau des wesentlich größeren äußeren ETFE-Folienkissen-Elementes vorgenommen. Mit einer über dreimal so großen Fläche wie das innere Folienkissen musste auf eine möglichst lange Schönwetterperiode gewartet werden.

Bild 22. Das innere Kissen nach Fertigstellung *Foto: Temme // Obermeier GmbH*
Fig. 22. Inner cushion after completion *Source: Temme // Obermeier GmbH*

Bild 23. Transparenz und Schatten gleichzeitig, das fast fertige Dach *Foto: Temme // Obermeier GmbH*
Fig. 23. Transparency and shadow at the same time, the almost finalised roof *Source: Temme // Obermeier GmbH*

Bis zum dritten von vier Feldern war die Vorhersage auch noch richtig, die kommenden zwei Wochen zeigten dasselbe Bild wie man es dann vom restlichen Jahr 2021 auch schon kannte. Die Monteure verbrachten mehr Zeit mit der weitergehenden Sicherung der bereits eingebauten oberen Lage als mit der Montage an sich. Vor Allem der Wind gepaart mit zum Teil sintflutartigen Regenfällen in nicht mehr vorhersagbaren Abständen stellten eine große Herausforderung dar. Dank gut vorbereiteter Sicherungsmaßnahmen durch die Windsogseile, Niederhaltegurte und Gewichte konnte die obere Lage fertig montiert werden.

Nach der erfolgreichen Montage und Sicherung der oberen Lage, wurde die untere Lage mit ihren vier Feldern innerhalb von acht Tagen montiert. Aufgrund des enorm großen Volumens konnten dieses sogar schon vor Fertigstellung aller Abdichtungen der Stützendurchdringungen leicht aufgeblasen und stabilisiert werden. Zuletzt erfolgte wieder die Montage der unteren Folienseile. Im sogenannten „Final Snagging Prozess" erfolgte nochmals die Überprüfung aller Anschlüsse, das Nachziehen mit dem Drehmomentschüssel, die Dichtigkeitsprüfungen und einige kleinere Justierarbeiten (**Bild 23**).

9 Zusammenfassung

Durch die Realisierung der Überdachung als Großkissen ist ein sehr leichtes und sehr transparentes Kissendach entstanden. Anders als bei Einzelkissen ist die Sicht nur durch sehr unscheinbare, dünne, Stahlseile unterbrochen. Die Bedruckung verschattet den Platz, ist aber immer noch so transparent, dass der Blick in den Himmel frei ist.

Die Luftversorgung konnte in die Platzarchitektur integriert werden und versorgt die Kissen auf kürzestem Wege mit ausreichend Stützluft. Der (mit den umgebenden Häusern) denkmalgeschützte Marktplatz wird nun in einen hellen angenehmen Raum verwandelt, der die Besucher zum Verweilen und zum Einkaufen einlädt.

PROJEKTDATEN

Folienoberfläche: 4 600 m²
Kissenvolumen: 5 150 m³
Abmessungen: 55 m Durchmesser, 7 m über Grund
Folienmaterial: bedruckte ETFE-Folie Nowofol ET6235 300 µ.
Untere Lage bedruckt.
Seile: Edelstahllitzenseile

PROJEKTBETEILIGTE

Architekt: Jacek Bułat, Posen
Entwurfsplanung Folie: Andrzej Kowal, Breslau
Gesamt-Ausführung Folienkissen: Temme//Obermeier, Rosenheim
Folienplanung: formTL, Radolfzell

Literatur

[1] *Blümel, S.; Stimpfle, B.; Rudorf-Witrin, W. ; Pasternak, H.:* Von der CargoLifter-Werfthalle zu Tropical Islands – Entwurf. In: Bauingenieur 80 (2005), Heft 10.

[2] *Rudorf-Witrin, W.; Stimpfle, B.; Blümel, S.; Pasternak, H.:* Von der CargoLifter–Werfthalle zu Tropical Islands – Konstruktion, Herstellung und Montage der neuen ETFE-Folienkissen-Eindeckung. *In:* Bauingenieur 81 (2006), Heft 1.

[3] *Schäffer, M.; Stimpfle, B.:* ETFE Großkissendach über dem Lilienthalhaus in Braunschweig. *In:* Stahlbau 87 (2018), Heft 7.

[4] *Schäffer, M.; Stimpfle, B.:* Federleichtes Atriumdach – Das Lilienthalhaus in Braunschweig. *In:* Ingenieurbaukunst, 2020.

Bernd Stimpfle

bernd.stimpfle@form-tl.de
Beratender Ingenieur
formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh
Kesselhaus, Güttinger Straße 37, 78315 Radolfzell

Foto: Andreas Kochlöffel

Dirk P. Emmer

d.emmer@to-experts.com
Temme // Obermeier GmbH
EXPERTS FOR MEMBRANE BUILDINGS
Dr.-Steinbeißer-Straße 7, 83026 Rosenheim

Foto: Foto Strauß, Altötting

© VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2021