

Aktuelle wandelbare Membrandächer in Warschau und Vancouver

Modern Adjustable Membrane Roofs in Warsaw and Vancouver

Jan Cremers, Gregor Grunwald



Für den Stadionbau haben Membranmaterialien eine stark zunehmende Bedeutung. Bei einem Großteil neuer Dächer kommen diese biegeweichen Werkstoffe inzwischen zum Einsatz – und zwar sowohl bei Neubauten als auch bei Umbauten und Sanierungen. Und zum Teil erstreckt sich die Anwendung hier nicht nur auf Dächer, sondern auch auf Fassaden. Neben dem Witterungsschutz stehen vor allem die Lichtverhältnisse im Inneren im Mittelpunkt des Interesses – es geht um die Wachstumsbedingungen für den Rasen, um eine Reduktion des Aggressionspotenzials, aber vor allem um möglichst hochwertige Fernsichtbilder: Stützenfreiheit und gleichmäßige Ausleuchtung mit begrenzten Kontrasten. Hier kommt ein zentraler Vorteil von biegeweichen Membranwerkstoffen zum Tragen: Transluzenz, zumeist mit hohem diffusen Anteil. Aus den typischen Geometrien von Stadien und der erforderlichen Stützenfreiheit ergeben sich große Spannweiten, für die sich in den letzten Jahrzehnten zugbeanspruchte Flächentragwerke mit sehr leichten und transluzenten Membranwerkstoffen als typische und äußerst wirtschaftliche Lösung entwickelt haben. Während die ersten derartigen Lösungen rückverankerte Konstruktionen waren, deren Leichtigkeit in der Erscheinung nur durch erheblichen Aufwand in der Verankerung über entsprechende Schwerlastfundamente zu erkaufen war, setzt man heute meist so genannte Speichenradssysteme ein, die in der heutigen Form im Wesentlichen auf das Membrandach in Stuttgart aus dem Jahr 1993 zurückgehen, das von den Ingenieuren Schlaich Bergermann und Partner entwickelt wurde. Ästhetisch kommt es in der Folge zu einem Wandel im Umgang mit dem textilen Material, denn statt großer zusammenhängender Flächen erzeugt die Segmentierung durch die Radialseile mit entsprechender Teilflächenstabilisierung eine kleinteiligere Wiederholung, z. B. durch den Einsatz von Bögen zwischen den Radialseilen.

Eine besondere Untergruppe der Speichenradkonstruktionen sind solche, die zusätzlich zu einem festen Dach im Außenbereich



1

über eine raffbare Struktur im zentralen Bereich verfügen. Durch diese Option der Wandelbarkeit lässt sich je nach Bedarf der Zustand offen oder geschlossen erreichen, wodurch sich die Nutzbarkeit solcher Sportstätten deutlich erweitert. Ganzjährig sind dann witterungsunabhängige Veranstaltungen möglich, wobei durch das transluzente Material die Tageslichtversorgung auch in geschlossenem Zustand stets gewährleistet ist. Als wesentliche Vorläufer für wandelbare Membrandächer in diesem Maßstab sind vor allem die Arena Saragossa (1989) und das Frankfurter Waldstadion (2005) zu nennen, deren Ingenieure ebenfalls sbp waren. Die Firma Hightex ist seit Jahrzehnten im Bau von innovativen Membrandächern für Sportstätten aktiv, darunter finden sich fixe Dächer bei den Stadien von Stuttgart, Busan, Abuja, Berlin, Robina, Johannesburg, Kapstadt und Kiew sowie die verfahrbaren Dächer von Hamburg-Rothenbaum, Wimbledon und Warschau.

Nationalstadion Warschau

Für den Neubau des polnischen Nationalstadions in Warschau wurde nach dem Wettbewerbsgewinn 2007 ein Dachtragwerk nach dem Speichenradprinzip errichtet (Abb. 1–5, s. S. 1122ff.). Dabei ermöglicht das schließbare Innendach des Stadions eine ganzjährige und wetterunabhängige Nutzbarkeit nicht nur für Fußball. Radial angeordnete Seilbinder spannen zwischen einer zentralen Nabe, einem Seilring über dem Spielfeldrand und einem umlaufenden äußeren Druckring. Die Radialseile verlaufen vom oberen Ende der Schrägstützen bzw. vom Druckring aus in Richtung Stadionmitte, kreuzen sich in Gussknoten (Abb. 5) und schließen an zwei in der Höhe versetzte Ringseile an. Der äußere Dachbereich, der sich über die gesamte Tribüne bis hin zum Spielfeldrand erstreckt, stellt den dauerhaft eingedeckten Teil der Seilkonstruktion dar. Zwischen je zwei unteren Radialseilen sind als Teilflächenstabilisierung jeweils neun Stahlbögen in den Segmentfeldern eingefügt (Abb. 5) und bilden die Randgeometrie der Dachmembran, die in diesem Bereich



2

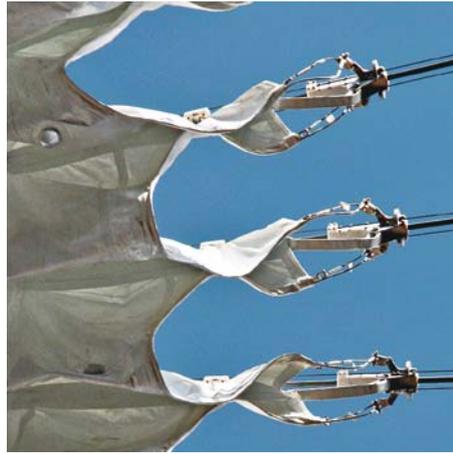
als PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe ausgeführt ist und eine Gesamtfläche von ca. 55 000 m² aufweist. Im Werk vorkonfektioniert, werden die einzelnen Membranpakete in die Konstruktion gehoben, ausgefaltet und über die Bögen an Druckring, Radial- und Ringseil unter Vorspannung befestigt.

Das wandelbare Dach im Zentrum

Das innere Stadionoval im Bereich des Spielfelds wird von einer zweiten Konstruktion überspannt. Eine fliegende Mittelstütze von 70 m Länge hängt über vier Seilstränge am unteren Radialseil. 60 achsweise nach oben führende Seile halten die Stütze in ihrer Mitte. Am unteren Teil des Masts ist eine verfahrbare Membrangarage befestigt (Abb. 2). Nach Absenken der Garage kann das in ihr verstaute Dachmembranpaket auf den 60 Radialseilen über je 15 linear gleitende Befestigungspunkte nach außen aufgeklappt werden. Diese so genannten »Gleitwagen« sind über radiale Gurtbänder mit der Membran verbunden. Elektroseilwinden ziehen so genannte »Fahrwagen«, die am Membranrand befestigt sind, nach außen, die Gleitwagen werden nachgezogen (Abb. 4). Durch unterschiedliche Zuggeschwindigkeiten auf den einzelnen Achsen wird ein gleichzeitiges Einrasten der Fahrwagen in die sich verriegelnde hydraulisch angetriebene Spannkonstruktion erreicht, die die kraftgesteuerte Endspannung der ausgefalteten Membran gewährleistet. Anschließend wird die Membran in ihre endgültige Position gezogen und achsweise vorgespannt, sodass sie die erforderlichen Lasten aufnehmen und das Stadion vor Witterungseinflüssen schützen kann. Dieser ganze Vorgang dauert ca. eine halbe Stunde. Die Fuge zwischen festem und verfahrbarem Dach schließt ein 10 m breites auf den Radialseilen befestigtes Glasdach, das sich unmittelbar unterhalb der Membran befindet und durch eine Neigung nach außen eine entsprechende Entwässerung sicherstellt (Abb. 3). Die Dachmembran des verfahrbaren Teils besteht aus einem PVC-beschichtetem Polyestergewebe, einem transluzenten Material, das sich für häufiges Verfahren und Falten



3



4

eignet. Im äußeren Bereich wurde so genanntes Typ-4-Material verwendet, hier sind die Lasten am höchsten. Im zentralen Bereich ist etwas leichteres Typ-3-Material ausreichend. Der aufmerksame Betrachter kann dies an leicht unterschiedlichen Transluzenzgraden erkennen. Das verfahrbare Dach wurde werkseitig in vier Teilen vorkonfektioniert (Abb. 1), angeliefert und dann bauseits auf dem Dach zu einer großen Fläche von ca. 10 500 m² gefügt. Dazu kam eine stationäre, temporär am Seiltragwerk hängende Schweißmaschine zum Einsatz. Die verwendeten Gurte bestehen aus Polyester und besitzen Zugfestigkeiten bis zu 40 t. Eine intensive Untersuchung ihres Langzeit-, Dehn- und Kriechverhaltens war Voraussetzung, um den notwendigen Spannweg des verfahrbaren Dachs ermitteln zu können.

Stadion »BC-Place«, Vancouver

Auch im Stadion »BC-Place« in Vancouver sorgt ein verfahrbares Dach für eine flexible und witterungsunabhängige Beispielbarkeit.

Das Traglufthallendach des Anfang der 1980er-Jahre errichteten »Airdomes«, der 60 000 Zuschauer fassenden Arena, bei dem die Konstruktion durch einen erhöhten Luftdruck im Innenraum stabilisiert war, wird durch eine neue, auf dem vorgespannten Speichenradprinzip basierende Dachkonstruktion ersetzt. Ihre 36 umlaufenden, hoch aufragenden Stützen prägen das neue Bild des Stadions und akzentuieren den Veranstaltungsort in der imposanten Skyline von Vancouver (Abb. 6). Die Ränge sind dabei mit einer einlagigen Membran aus PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe fest überspannt, die Dachmitte kann dagegen mittels einer zweilagigen pneumatischen Kissenkonstruktion geöffnet und geschlossen werden. Im aufgefalteten Zustand kann sie durch Druckluft zu formstabilen Kissen aufgeblasen werden. Das verfahrbare Dach aus beschichtetem PTFE-Gewebe ist in diesem Zustand für die Aufnahme von Schnee- und Windlasten ausgelegt und bietet durch die Zweilagigkeit der Kissenkonstruktion einen

Literatur:

Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., Lienhard, J.: Atlas Kunststoffe + Membranen, DETAIL/Institut für internationale Architekturdokumentation, München 2010

Dr.-Ing. Jan Cremers, Director Technology Hightex, Professor an der Hochschule für Technik, Stuttgart.
Dr.-Ing. Gregor Grunwald, Projektmanager Hightex

Dr.-Ing. Jan Cremers is director of technology at Hightex and a professor at the University of Technology, Stuttgart.

Dr.-Ing. Gregor Grunwald is project manager at Hightex.

gewissen Wärmeschutz. Im Gegensatz zum verfahrbaren Dach in Warschau ist in diesem Fall die Regelstellung des Dachs »geschlossen«. Das verfahrbare Dach mit seiner ovalen Grundrissform hat im ausgefahrenen Zustand eine Abmessung von ca. 80 × 100 m. Auf 36 Achsen verteilt, ordnen sich die einzelnen Kissenfelder radial um einen zentralen Masten etwa 60 m über dem Stadionspielfeld. Der Mast ist Träger der Parkgarage des Dachs, in die die verfahrbare Membran hineingefaltet werden kann (Abb. 7). Zum Öffnen des Dachs saugen die am zentralen Mast installierten Gebläseeinheiten durch in den Kissen verlegte Luftversorgungsschläuche die Druckluft aktiv aus ihnen heraus (Abb. 12). Anschließend wird die entlüftete Membran über ihre Schlittenaufhängung am Seiltragwerk motorisch nach innen gezogen. Die Membran faltet sich mittig zusammen und wird durch die nach oben fahrende Garage geschützt. Beim Schließen des Dachs wird die Membran nach außen auf die unter dem Ringseil installierte



5

- 1–5 Nationalstadion Warschau, Architekten: gmp, JSK Architekci, Tragwerksplanung: sbp, Generalplaner: Alpine Bau Deutschland, Hydrobudowa Polska, Seilbau: Cimolai, Hightex, Membranbau: Hightex
- 1 Ein Viertel der 10 500 m² großen Membran des verfahrbaren Innendachs vor dem Verschweißen der vier Teile auf der Seilkonstruktion
 - 2 Innendach mit 60 Radialseilen
 - 3 Eine von insgesamt 60 hydraulischen Spannvorrichtungen am Übergang zwischen verfahrbarem und fixem Dach, Glasdach VSG 18 mm aus 2 × 8 mm
 - 4 Fahrwagen auf Radialseilen mit Elektrosehwinde
 - 5 Andichten der PTFE-beschichteten Glasfasermembran des fixen Dachs an den Gussknoten der Seilkonstruktion

- 1–5 National Stadium, Warsaw; architects: gmp, JSK Architekci; structural planning; sbp; general planners: Alpine Bau Deutschland, Hydrobudowa Polska; cable construction: Cimolai, Hightex; membrane construction: Hightex
- 1 A quarter of the 10,500 m² membrane comprising the movable inner roof prior to the heat-sealing of the four sections on the cable structure
 - 2 The inner roof with 60 radial cables
 - 3 One of a total of 60 hydraulic tensioning devices at the junction between the movable and fixed sections of the roof; 18 mm laminated-safety-glass roof (2 × 8 mm)
 - 4 Carriages on radial cables with electric cable winch
 - 5 Sealing the PTFE-coated glass-fibre membrane of the fixed section of the roof at the cast nodes of the cable construction



6



7

Glasdachschräge gezogen (Abb. 10a, b). Durch das anschließende Aufblasen der Kissen stabilisiert sich die Dachkonstruktion (Abb. 10c). Radial umlaufend ist ein Dichtungswulst als äußerer Abschluss des verfahrenen Membrandachs ausgebildet, der sich mit zunehmender Druckluft fest auf das Glasdach presst und damit die notwendige Abdichtung der Konstruktion herstellt (Abb. 11). Das Öffnen bzw. Schließen des über 7500 m² großen verfahrenen Dachs, das als »blue sky roof« bezeichnet wird, benötigt lediglich 20 Minuten. Es ermöglicht eine ganzjährige, wetterunabhängige Nutzung des Stadions und ist als verfahrenbare Kissenkonstruktion in dieser Art und Dimension weltweit einzigartig.

Resümee

In den vergangenen Jahrzehnten haben sich biegegewiche Textil- und Folienwerkstoffe als Ergänzung »klassischer« Baumaterialien fest etabliert. Ihr Einsatz bietet noch immer erhebliche Differenzierungsmöglichkeiten für Gestalter, deren Entwicklung keinesfalls abgeschlossen ist. Membranen weisen in die archetypische Frühgeschichte der Architektur, als hocheffiziente Hightech-Materialien weisen sie gleichzeitig in die Zukunft. Ein dauerhafter Einsatz in verschiedenen Klima- und Kulturräumen ist möglich, zum einen aufgrund prinzipieller Werkstoffeigenschaften, aber auch aufgrund der

Anpassbarkeit der Konstruktion und der möglichen Bandbreite bestimmter Eigenschaften, wie zum Beispiel der Einstellung unterschiedlicher Lichttransmissionsgrade. Biegegewiche Werkstoffe erlauben zudem neben starren Strukturen auch bewegbare und damit veränderliche Konstruktionen in großem Maßstab. Weitere Vorteile ergeben sich gesamtheitlich betrachtet hinsichtlich der sehr geringen erforderlichen Massen – Membranmaterialien wiegen zwischen 0,4 und 2 kg/m². Im Vergleich zu alternativen Konstruktionen ist das Flächengewicht in der Regel um ein Vielfaches geringer, was sich auf einen reduzierten Materialeinsatz in Primär- und Sekundärkonstruktion ebenso auswirkt wie auf den Aufwand für Transport, Montage und letztlich auch den erforderlichen Rückbau nach Ablauf der Nutzungszeit (Abb. 8, 9). In der Summe ist daher die Gesamtenergiebilanz über den Lebenszyklus gegenüber massiveren Konstruktionsalternativen günstiger. Grundsätzlich zeigen Membrankonstruktionen, die nahezu immer Prototypen sind, welche anspruchsvollen Leistungen durch die Zusammenarbeit von Teams mit hochqualifizierten Planern und ausführenden Firmen erreicht werden können – eine maßgebliche Voraussetzung für Innovationen. Dies gilt in besonderem Maße für die hier vorgestellten herausragenden Beispiele wandelbarer Strukturen höchster Komplexität.

Membranes are of increasing importance in the construction of stadium roofs. In addition to the weather protection they provide, the internal light conditions they allow are of growing significance. "Spoked-wheel systems" are commonly used today, based on the model of the membrane roof in Stuttgart (1993), which was developed by the engineers schlaich bergemann und partner (sbp).

Membranes are now subject to segmentation through the use of radial cables, with the stabilization of individual sections. One special subgroup of the spoked-wheel form is that in which a separate structure at the centre can be drawn together as an additional covering. This permits events to be programmed throughout the year regardless of weather conditions, while the translucent material ensures good daylighting even in a closed state. Important forerunners of larger-scale flexible membrane roofs are the stadium in Saragossa (1989) and the Commerzbank Arena (Waldstadion) in Frankfurt (2005), the engineers of which were also sbp.

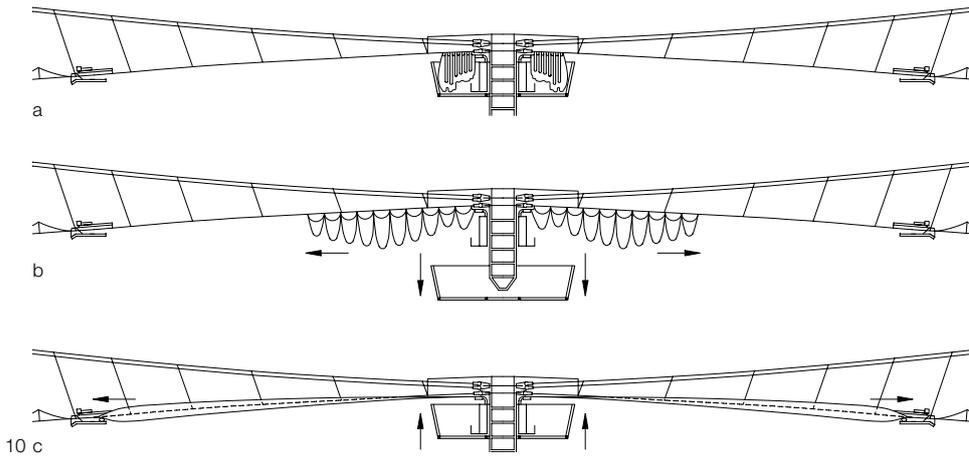
For decades now, the Hightex company has been active in this field. Examples of its work include fixed roofs for arenas in Stuttgart, Busan, Abuja, Berlin, Robina, Johannesburg, Cape Town and Kiev as well as movable (sliding/folding) roofs in Rothenbaum, Hamburg and in Wimbledon and Warsaw. After a competition in 2007 for a new National Stadium in Warsaw, a roof structure was built



8



9



- 6–12 BC-Place Vancouver, Architekten: Stantec Architects, Tragwerksplanung: sbp, Geiger engineers, Generalplaner: PCL Constructors, Membranbau: Hightex
 - 8–12 Innendach aus beschichtetem PTFE-Gewebe
 - 10 Schließvorgang des verfahrenen Innendachs: a offener Zustand, b Absenken der Garage, Zufahren der Membran, c Aufblasen der Kissen
 - 11 Innendachkissen mit Vorspannvorrichtung
 - 12 Druckschläuche im Inneren des Kissens
-
- 6–12 BC Place, Vancouver; architects: Stantec Architects; structural planning: sbp, Geiger Engineers; general planner: PCL Constructors; membrane construction: Hightex
 - 8–12 The inner roof, consisting of coated PTFE fabric
 - 10 Stages of closing the inner roof: a in open state; b lowering the "garage", extending the membrane; c inflating the cushions
 - 11 Inner-roof cushions with pretensioning mechanism
 - 12 Assembly of compression tubes within cushion

there according to the spoked-wheel principle. The closable inner section allows the stadium to be used all year round (ills. 1–5; see also page 1122). Cable trusses laid out in radial fashion are fixed between the central hub, a cable ring over the edge of the playing field, and a peripheral outer compression ring. The radial cables extend from the upper end of the raking support, or from the compression ring, towards the centre of the stadium, intersecting each other in cast nodes (ill. 5) and connected to two elevated ring cables. Permanent covering is provided by the outer roof area, extending over the entire grandstand to a line above the edge of the playing field. Inserted in the segment bays between pairs of lower radial cables are nine steel arcs (ill. 5), which act as stabilizing elements. They form the edge geometry of the roof membrane, which in this section consists of PTFE-coated glass-fibre fabric and which has an overall area of approximately 55,000 m². The oval inner area of the stadium above the playing field can be covered by a second structure. A 70-metre-long "flying" central column is suspended by four cables from the lower radial cable. The column is held in the middle by 60 axial cables. Fixed to the lower part of the mast is a travelling membrane garage (ill. 2). After lowering this unit, the roof-membrane packet within can be unfolded along the 60 cables via 15 fixing points each that glide in a linear direction. These "gliding

trolleys" are attached to the membrane by means of radial straps. The entire opening or closing process takes about half an hour. The joint between the fixed and movable sections of the roof is closed by a 10-metre-wide glass covering fixed to the radial cables. The membrane of the movable section of the roof consists of PVC-coated polyester fabric, a translucent material that is capable of repeated movement, folding and unfolding. The sliding roof was prefabricated in four parts at works (ill. 1), delivered to site and joined together on the roof to form a larger area roughly 10,500 m² in extent. In the BC Place stadium in Vancouver, the roof that was erected in the early 1980s is now being replaced by a form of construction based on the prestressed spoked-wheel principle. The appearance of the stadium today is dominated by 36 peripheral columns that rise above the structure (ill. 6). The tiers of seating are covered by a single-layer membrane consisting of PTFE-coated glass-fibre fabric. The central area of the roof can be opened and closed by means of a two-layer pneumatic cushion that is unique in its size and nature. In contrast to the sliding roof in Warsaw, the Canadian structure is in a standard position when closed. The mobile roof, with an oval layout, has dimensions of roughly 80 × 100 m in an extended state. Divided between 36 axes, the individual cushion bays are arranged in radial fashion about a central mast roughly

60 m above the playing field. To open the roof, the blower units installed round the mast suck in compressed air through supply tubes in the cushions (ill. 12). Finally, the deflated membrane is drawn by motor via sliding mountings on the suspension cables. When the roof closes, the membrane is drawn outwards on to the glass apron roof installed beneath the ring cable. The roof structure is stabilized through the subsequent inflation of the cushion. A radial sealing torus forms the outer closing element of the movable membrane roof. With increasing air pressure, this element presses firmly on to the glazed section of the roof, thereby creating the necessary seal (ill. 11). The process of opening or closing the more than 7,500 m² "blue sky roof" takes just 20 minutes. Membranes have a wide range of properties, not least of which is the transmission of daylight they allow. Other advantages accrue as a result of the very small masses involved: membrane materials weigh between 0.4 and 2 kg per square metre and thus have a far lower weight per unit area than alternative forms of construction. This, in turn, can result in a reduced use of materials in the primary and secondary construction as well as in the outlay for transport, assembly and the ultimate disposal (ills. 8, 9) of the membrane. The overall energy balance during the entire life cycle is, therefore, positive in comparison with solid forms of construction.

