

Krzysztof GERLIC

**ZADASZENIA MEMBRANOWE
W POLSCE –
SWOBODA KSZTAŁTOWANIA**



GLIWICE 2018

MONOGRAFIA



Krzysztof GERLIC

**ZADASZENIA MEMBRANOWE
W POLSCE –
SWOBODA KSZTAŁTOWANIA**

**WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
GLIWICE 2018**

Opiniodawcy

Dr hab. inż. arch. Krystyna JANUSZKIEWICZ, prof. nzw. Zachodniopomorskiego
Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

Dr hab. inż. Romuald TARCZEWSKI, prof. nzw. Politechniki Wrocławskiej

Kolegium redakcyjne

REDAKTOR NACZELNY – Prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ

REDAKTOR DZIAŁU – Dr hab. inż. arch. Beata KOMAR

SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Jolanta NIDERLA-WITKOWSKA

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Śląskiej

Projekt okładki

Michalina GERLIC

ISBN 978-83-7880-560-1

© Copyright by

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

Gliwice 2018

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE	7
Przedmiot i zakres monografii	8
Cel monografii	10
Metoda badań	10
Stan badań	11
1. STRUKTURY MEMBRANOWE I ICH ZASTOSOWANIE	17
1.1. Co to są struktury membranowe – próba definicji	17
1.2. Geometria formy – powierzchnie minimalne	19
1.3. Organizmy żywe	23
2. METODY KSZTAŁTOWANIA	27
2.1. Elementy procesu projektowego	27
2.2. Metody analogowe – modele fizyczne	28
2.3. Metody cyfrowe	31
3. ROZWÓJ STRUKTUR MEMBRANOWYCH W ARCHITEKTURZE	37
3.1. Początki	37
3.2. Włókno szklane	42
3.3. Folia ETFE	48
3.4. Osłony i siatki	51
3.5. Rzeźby	53
3.6. Tymczasowe i mobilne	54
3.7. Nowe idee	57
4. RODZAJE ZADASZEŃ MEMBRANOWYCH	61
4.1. Formy napiętej membrany	61
4.2. Rodzaje podpór – stelaż	67
4.3. Materiał membrany	71
4.4. Zalety i wady materiałów	76
5. STAŁE ZADASZENIA W POLSCE	81
5.1. Amfiteatry	82
5.2. Stadiony	130
5.3. Pozostałe typy	157
5.4. Uwagi dotyczące przedstawionych przykładów	182
6. ELEMENTY ROZWIĄZAŃ	185
6.1. Detale połączeń	185
6.2. Sposoby odprowadzania wody	207
6.3. Sposoby zabezpieczenia przed śniegiem	221
6.4. Korzyści zacielenia	239
6.5. Zapewnienie trwałości	242

6.6. Zapewnienie czystości	244
6.7. Odbijanie światła	246
7. FORMY ZREALIZOWANYCH MEMBRAN	249
7.1. Zestawienie analizowanych przykładów	249
7.2. Linie warstwic	251
7.3. Promienie krzywizny	263
7.4. Podsumowanie analizy form	266
8. WNIOSKI DO PRAKTYKI PROJEKTOWEJ	267
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	277
9.1. Ocena stanu wiedzy	278
9.2. Wyniki badań własnych	278
9.3. Kierunki rozwojowe	279
BIBLIOGRAFIA	281
SPIS ILUSTRACJI	291
SPIS TABEL	304
INDEKS TERMINÓW	305
STRESZCZENIE	319

CONTENTS

INTRODUCTION	7
Subject and research scope	8
Aim of research	10
Research method	10
Research status	11
1. MEMBRANE STRUCTURES AND THEIR APPLICATION	17
1.1. What are the membrane structures – attempt to define	17
1.2. Form geometry – minimal surfaces	19
1.3. Living organisms	23
2. MODELLING METHODS	27
2.1. Elements of modelling process	27
2.2. Analogue methods – physical models	28
2.3. Digital methods	31
3. THE DEVELOPMENT OF MEMBRANE STRUCTURES IN ARCHITECTURE	37
3.1. Beginnings	37
3.2. Fiberglass	42
3.3. ETFE film	48
3.4. Covers and nets	51
3.5. Sculptures	53
3.6. Temporary and mobile structures	54
3.7. New ideas	57
4. MEMBRANE CANOPY TYPES	61
4.1. Tensile membrane forms	61
4.2. Support types – skeleton	67
4.3. Membrane material	71
4.4. Advantages and disadvantages of materials	76
5. PERMANENT CANOPY IN POLAND	81
5.1. Amphitheatres	82
5.2. Stadiums	130
5.3. Other types	157
5.4. Comments on the presented examples	182
6. SOLUTIONS ELEMENTS	185
6.1. Connection details	185
6.2. Water draining ways	207
6.3. Snow protection ways	221
6.4. Shading benefits	239
6.5. Ensuring permanence	242

6.6. Ensuring cleanness	244
6.7. Light reflection	246
7. COMPLETED MEMBRANES FORMS	249
7.1. The comparison of analysed examples	249
7.2. Contour lines	251
7.3. Curvature radii	263
7.4. The summary of the form analysis	266
8. POSSIBILITIES OF RESULTS UTILIZATION	267
9. SUMMARY AND FINAL CONCLUSIONS	277
9.1. Assessment of state of the art	278
9.2. Results of own research	278
9.3. Development directions	279
BIBLIOGRAPHY	281
FIGURES INDEX	291
TABLES INDEX	304
TERMS INDEX	305
ABSTRACT	321

*It is necessary that we architects try to understand living nature,
but not to copy it. This is one very important task for the future¹.*

Frei Otto

WPROWADZENIE

Projektowanie architektoniczne ciągle się rozwija, pojawiają się nowe możliwości materiałowe, nowe narzędzia jak programy komputerowe oraz przede wszystkim nowe teorie i prądy w sztuce. Lepsze materiały pozwalają na realizację struktur, które kiedyś były jedynie w sferze wyobraźni projektantów, a obecnie można je budować i nadawać im fizyczną postać. Ustroje tak ulotne jak błony mydlane mogą być dzisiaj realizowane w formie napiętej membrany i chronić ludzi przed czynnikami środowiskowymi. Zgodnie z witruwiańską triadą (*firmitas, utilitas et venustas*), struktury te mogą nie tylko być trwałe i użyteczne, ale też piękne. Współczesne teorie naukowe związane z troską o środowisko i warunki, w których żyje człowiek zalecają poszukiwanie rozwiązań zgodnych z ideą zrównoważonego rozwoju. W związku z tym, w architekturze również podejmowane są próby wprowadzenia tych idei, a poznanie i stosowanie struktur zgodnych z naturą wydaje się wyjątkowo cenne.

Odpowiedź na pytanie, jak zapewnić napiętej tkaninie odpowiednią sztywność, aby mogła przenosić obciążenia zewnętrzne została już dawno poznana. Natomiast występujący często pogląd, że strukturalom napinanym można nadawać dowolny kształt prowadzi do licznych, nie zawsze udanych, eksperymentów. Określenie kształtu – formy napiętej membrany – stwarzało kiedyś problemy, nie tylko wykonawcze, ale przede wszystkim projektowe i obliczeniowe. Poszukiwania matematyczne Józefa Ludwika Lagrange’a oraz fizyczne Józefa Plateau związane z powierzchniami minimalnymi i napięciem powierzchniowym doprowadziły jedynie do zdefiniowania problemu. Dopiero w XX wieku zostały dopracowane zasady teoretyczne. Natomiast wyniki eksperymentów praktycznych, zwłaszcza kierowanych przez Freia Otto (1925-2015), są bazą, na której powstały procedury służące określaniu kształtu powierzchni zbliżonych do minimalnych, występujących w powierzchniach architektonicznych membran.

W latach 70. XX wieku, wraz z rozwojem technologii cyfrowych, rozpoczęła się rewolucja w wyznaczaniu tych powierzchni. Modelowanie fizyczne napiętych powłok zostało wyparte przez modelowanie cyfrowe. Wirtualne modele komputerowe obecnie zastępują modele wykonywane ręcznie. Modelowanie komputerowe

¹ Frei Otto: „Niezbędne jest, abyśmy my, architekci, starali się zrozumieć żywą naturę, a nie kopiowali jej. To jest bardzo ważne zadanie na przyszłość”, [w:] Hensel M., Menges A., Weinstock M.: *Frei Otto in Conversation with the Emergence + Design Group*. Publication Architectural Design, vol. 74, No. 3, 2004, p. 25.

przynosi konkretne korzyści. Daje swobodę kreatywnemu projektowaniu i rozwiązywaniu problemów inżynierskich o dowolnych wymiarach, zarówno obiektów budowlanych, jak i struktur komórkowych, a nawet molekularnych.

Projektanci wyposażeni w odpowiednie programy komputerowe mogą z łatwością wyznaczać matematyczne powierzchnie minimalne, a także symulować zachowanie napiętej membrany. Dzięki doborowi odpowiednich parametrów można uzyskać wiele różnorodnie ukształtowanych rozwiązań. Rolą architekta jest wtedy wybór odpowiedniej formy spośród wygenerowanych komputerowo wariantów. Mimo spopularyzowania na świecie struktur napinanych, w Polsce nadal są one rzadkością, nie powstaje wiele obiektów z zadaszeniami membranowymi. Przyczyn takiego stanu rzeczy można się dopatrywać w pewnym niedostatku krajowych studiów i badań, a także braku upowszechnienia wiedzy dotyczącej projektowania struktur membranowych. Stąd idea tej monografii, jako podsumowania autorskich badań dotyczących kształtowania zadaszeń membranowych a dokładnie form, które mają napięte powłoki.

Przedmiot i zakres monografii

Przedmiotem badań są struktury membranowe w architekturze oraz wzajemne relacje pomiędzy kreacją artystyczną a pragmatycznym podejściem wykonawczym. Jest to obszar wiedzy i umiejętności związany z teorią i praktyką, w tym przypadku zawężony do architektonicznego projektowania zadaszeń membranowych. Zagadnienia te w istotny sposób ewoluują ze względu na zmieniający się współczesny warsztat architekta i wymagają stałej uwagi.

Badaniami objęte zostały zadaszenia, w których kształt membrany uzyskiwany jest przez określony układ podpór, wykrój materiału oraz przyłożone naprężenie wstępne. Chodzi tu, przede wszystkim, o projektowanie tekstylnych konstrukcji powłokowych, napinanych mechanicznie. Projektowanie tego rodzaju zadaszeń wymaga bowiem specjalistycznej wiedzy, zwłaszcza na etapie koncepcji architektonicznej, kiedy nie są jeszcze wykonywane obliczenia konstrukcyjne.

Zakres badań ogólnych obejmuje, istotny dla najnowszej architektury, wybór zagadnień dotyczących struktur napinanych oraz ich projektowania we współdziałaniu metod analogowych i cyfrowych. Podstawą jest określenie, zdefiniowanie pojęć i usystematyzowanie wiedzy dotyczącej powierzchni minimalnych i struktur napinanych oraz jak zmienia się sposób ich projektowania i realizacji na tle historycznego rozwoju. Dotyczy to najważniejszych przykładów znajdujących się w obiektach na całym świecie, a przedstawionych w literaturze przedmiotu.

Zakres badań szczegółowych zawężony jest do zagadnień dotyczących projektowania zadaszeń membranowych w obiektach użyteczności publicznej w Polsce w latach 2000-2014. W tych latach zaczęły powstawać pierwsze stałe, całoroczne zadaszenia membranowe, począwszy od modernizacji Teatru Letniego w Szczecinie do budowy amfiteatru w Żywcu. Pierwowzorem wszystkich zadaszeń membra-

nowych w Polsce było tymczasowe zadaszenie Opery Leśnej w Sopocie, wykonane w 1964 roku. Zakresem badań zatem objęto ważne, zrealizowane obiekty architektoniczne, w których zastosowane zostały zadaszenia membranowe. Chodzi tu o rodzaj przekrycia, metodę jego kształtowania oraz zastosowaną technologię. Ponadto w monografii przedstawione są zagadnienia istotne dla projektowania, ważne ze względu na realizowane cele, zwłaszcza środowiskowe.

Mimo kilkunastu lat gromadzenia materiału i odwiedzenia dziesiątek obiektów na terenie Europy, podjęta została decyzja o wyborze najbardziej dostępnych realizacji. Dzięki temu możliwe było dotarcie do dokumentacji projektowej i przeprowadzeniu badań *in situ*. Zdecydowano się na zrealizowane obiekty znajdujące się na terenie Polski. Wybrano takie, w których znajdują się stałe zadaszenia membranowe, zaprojektowane i użytkowane jako całoroczne. Wybrano zadaszenia, które już są użytkowane przynajmniej kilka sezonów, co pozwoliło na ich ocenę jakościową. Wcześniej zadaszenia takie w Polsce stosowane były jedynie w okresie letnim, a na zimę demontowane. Dopiero po zrealizowaniu takich obiektów jak Stadion Narodowy w Warszawie czy przebudowa Opery Leśnej w Sopotcie nastąpił wyraźny zwrot w projektowaniu architektonicznym.

Napięta membrana jest też stosowana, jako osłona elewacji lub stanowi element wyposażenia wnętrza, nie występuje wtedy też problem odprowadzania wody opadowej i odśnieżania tak, jak w przypadku zadaszeń, dlatego nie zostały one objęte zakresem badań.

W badaniach pominięto też sieci linowe oraz ograniczono część dotyczącą konstrukcji pneumatycznych. Występujące w sieciach linowych siły powodują rozciąganie wiotkich cięgien i podobne kształtowanie do napiętej tkaniny. Zasadniczą różnicą jest to, że sieci linowe wymagają dodatkowego pokrycia, wypełniającego przestrzeń pomiędzy cięgnami. Natomiast w tkaninie odległości pomiędzy włóknami są tak małe, że spełniają jednocześnie funkcję elementów nośnych, a także pokrycia. W przypadku sieci linowych stosowanie nieprzezroczystego pokrycia powoduje, że są one postrzegane jako zupełnie inny rodzaj konstrukcji. W literaturze przedmiotu sieci linowe wielokrotnie występują razem ze strukturami membranowymi ze względu na to, że były stosowane wcześniej, w czasach, kiedy nie było jeszcze odpowiednio trwałej tkaniny technicznej.

Membrana wykonana z tkaniny technicznej może być również napinana dzięki różnicy ciśnienia po obu jej stronach. Na takiej zasadzie działają konstrukcje pneumatyczne. Wykorzystuje się w nich zwiększone ciśnienie powietrza wewnątrz całego obiektu lub wewnątrz zamkniętej przestrzeni pomiędzy warstwami membran. Ciśnienie powoduje równomierne napięcie powłoki, nadając jej charakterystyczny wypukły kształt, dlatego informacje o tych konstrukcjach zostały ograniczone do niezbędnego minimum.

Cel monografii

Główne cele to zebranie i przedstawienie zagadnień związanych z procesem projektowania zadaszeń membranowych w tym podejmowanych decyzji przy wykorzystaniu najnowszych narzędzi oraz wskazanie kierunków dalszych badań i prawdopodobnych zmian w projektowaniu architektonicznym związanym z ideą zrównoważonego rozwoju i troską o środowisko.

Celem jest przede wszystkim przedstawienie jak realizowane są zasady kształtowania zadaszeń membranowych w aspekcie:

- formy membrany,
- elementów, do których mocowana jest membrana,
- relacji pomiędzy zadaszeniem a zagospodarowaniem terenu pod i wokół zadaszenia.

Poszukiwano przede wszystkim odpowiedzi na pytanie, na ile swoboda kształtowania formy ograniczona jest funkcją lub konstrukcją zadaszenia? Aby to wyjaśnić, określono zagadnienia szczegółowe – w jaki sposób zadaszenia membranowe, realizowane w naszym klimacie, zapewniają:

- prawidłową ochronę przed czynnikami atmosferycznymi,
- właściwe odprowadzanie wody deszczowej,
- odpowiednią sztywność przy dynamicznych obciążeniach wiatrem,
- właściwą nośność dla obciążenia śniegiem lub możliwość jego usuwania,
- odpowiednie parametry, np. utrzymanie czystości membrany.

Wyniki badań mają być pomocne przy projektowaniu tego typu zadaszeń, przede wszystkim na etapie koncepcji architektonicznych. W pracy celowo pominięto zagadnienia wytrzymałościowe, mimo że autor zdaje sobie sprawę z nierozzerwalności etapu poszukiwania kształtu membrany i analizy konstrukcyjnej. Projektowanie tego typu zadaszeń wymaga specyficznej wiedzy, zwłaszcza na etapie koncepcji, kiedy nie są jeszcze wykonywane obliczenia konstrukcyjne.

Metoda badań

Dla uzyskania tak założonego celu przyjęto mieszaną metodę badawczą, w większości opierającą się na logicznej argumentacji. Dla poszczególnych elementów badań zastosowano zróżnicowane metody:

- 1) zebranie dokumentacji projektowej i fotograficznej oraz informacji z dostępnej literatury na temat wybranych obiektów,
- 2) wywiady z autorami projektów, konstruktorami, producentami i zarządcami poszczególnych obiektów,
- 3) porównanie typów, lokalizacji i wielkości obiektów,
- 4) analiza kształtów, porównanie pochylenia zadaszeń, kierunków spływu wody i śniegu oraz krzywizn powierzchni,
- 5) analiza detali, sposobów łączenia membrany z konstrukcją,

6) przeprowadzenie pomiarów środowiskowych przy zadaszeniu dla określenia wpływu na mikroklimat.

Praca składa się z trzech zasadniczych części. Pierwsza (rozdziały 1–4) to analiza literaturowa informacji związanych z projektowaniem zadaszeń membranowych na świecie, analiza przykładów wraz z zasadami kształtowania, ograniczeniami i możliwościami rozwoju.

Kolejna część (rozdziały 5–7) to szczegółowa analiza wybranych obiektów z terenu Polski. Przedstawione w niej zostały schematy przedstawiające plany i przekroje poszczególnych zadaszeń. Poza rysunkami i zdjęciami zamieszczone zostały opisy zawierające następujące informacje:

- lokalizacja,
- przyczyna powstania,
- forma,
- układ konstrukcyjny,
- wielkość,
- zastosowane materiały.

Następne część to wyniki wcześniejszych analiz. Przedstawione w niej są detale zadaszeń i schematy z podziałem na zagadnienia decydujące o ich prawidłowym funkcjonowaniu w klimacie umiarkowanym. Ważną część stanowi opracowanie planów warstwicznych większości membran. Dzięki temu przedstawiono charakterystyczne cechy geometryczne powłok występujących w zadaszeniach.

Pracę podsumowują rozdziały 8–9, wyjaśniające w jaki sposób wyniki opracowania mogą być zastosowane w praktyce projektowej oraz prawdopodobne kierunki rozwojowe dalszych badań.

Długi czas poświęcony na zebranie materiału, opracowanie i przygotowanie publikacji do druku spowodował, że w tym czasie powstało kilka nowych i ciekawych zadaszeń membranowych. Należy tu wspomnieć o stadionach w Lublinie, Łodzi i Niecieczy, amfiteatrze w Świnoujściu oraz kilku zadaszeniach nad scenami, np. w Tomaszowie Lubelskim, Myszkowie, Radomiu, i wielu mniejszych oryginalnych formach. Potwierdza to potrzebę szerzenia wiedzy na temat zasad kształtowania zadaszeń membranowych.

Stan badań

Zagadnienia związane z formowaniem napiętych membran oraz sieci linowych omawiane są przede wszystkim w publikacjach Freia Otto oraz jego współpracowników. Frei Otto w latach 50. rozpoczął swoją działalność naukową, a w 1964 roku założył Instytut Lekkich Konstrukcji w Stuttgarcie, którym kierował przez wiele lat².

² Ludwig Gleaser, *The work of Frei Otto and his teams 1955-1976. IL 17*. Institute of Lightweight Structures, Stuttgart 1978, p. 9.

Pierwszą i przez wiele lat jedyną publikacją w naszym kraju była przetłumaczona na język polski książka Freia Otto pod tytułem „Dachy wiszące”³. Zawierała informacje na temat wykorzystania membran i sieci linowych oraz tworzenia z nich układów przestrzennych. Dodatkowe rozdziały dotyczyły konstrukcji mieszanych, w których ciągnąca była głównymi elementami nośnymi. Tytuł publikacji dotyczył konstrukcji wiszących np. mostów, ale Otto w pracy podkreślał odmienny charakter tych struktur. Wyjaśniał, czym napięte sieci linowe różnią się od układów ciągłych, naprężonych jedynie ciężarem własnym. Bardzo ważne były informacje o konieczności wprowadzania naprężenia wstępnego i właściwego ukształtowania. Szerszą publikacją Freia Otto było opracowanie z 1973 roku⁴, gdzie pierwsza część poświęcona była zagadnieniom formowania konstrukcji pneumatycznych, a druga napinanym sieciom i membranom. Praca niestety nie została przetłumaczona na język polski, co pogłębiało braki w dostępie do literatury.

Publikacje Instytutu Lekkich Konstrukcji w Stuttgarcie oznaczone literami IL zawierają informacje zebrane w ramach spotkań, warsztatów i konferencji. W sumie w latach 1969-1995 ukazało się 41 publikacji. Początkowe numery dotyczyły poszukiwania formy napiętych sieci, zależności pomiędzy formą a siłami wewnętrznymi i badaniami błon mydlanych. Dużym zainteresowaniem cieszyły się formy wywodzące się ze świata przyrody ożywionej i nieożywionej: różnego rodzaju części roślin, komórek zwierzęcych i mikroskopijnych szkieletów. Zagadnienia wynikały z analiz tak zwanych form samokształtnych⁵, które powstają na skutek praw fizyki, między innymi dążenia materii do minimalizacji energii potencjalnej. Zawsze analizowane przykłady traktowane były jako źródło inspiracji dla form strukturalnych. Publikacje o późniejszych numerach dotyczyły bardziej konkretnych obiektów, których forma była uzyskiwana na podstawie doświadczalnych modeli. Nawiązywały też do doświadczeń z modelami fizycznymi, jakie wykonywał Antonio Gaudi przy projektach kościoła Colònia Güell i kościoła Sagrada Família⁶.

Jedną z ciekawszych publikacji architektonicznych jest opracowanie Horsta Bergera pod tytułem *Light Structures – structures of light*⁷. Berger szczegółowo omawia zagadnienia związane z projektowaniem zadaszeń membranowych na podstawie obiektów, które sam projektował i zrealizował. Na wstępie wyjaśnia, na czym polega różnica w podejściu do projektowania lekkich konstrukcji, w których główną rolę nośną pełnią napięte ciągnąca. Pokazuje, jak dużą wytrzymałość na rozciąganie

³ Frei Otto, *Dachy wiszące. Forma i konstrukcja*. Arkady, Warszawa 1959.

⁴ Frei Otto, *Tensile Structures*. MIT Press, Cambridge 1973.

⁵ Siegfried Gass, *Form Kraft Masse 5 – Experimente. Il 25*. Institut für Leichte Flächen-tragwerke, Stuttgart 1990.

⁶ Jos Tomlow, *Das Modell, The Model, El Modelo. IL 34*. Institute of Lightweight Structures, Stuttgart 1989.

⁷ Horst Berger, *Light structures – structures of light. The art and engineering of tensile architecture*, Birkhäuser Verlag, Basel 1996.

ma tkanina, jeśli tylko jest właściwie zamocowana oraz jak spada jej wytrzymałość, kiedy rozciągany materiał jest uszkodzony i dochodzi do rozdierania pojedynczych nitek. Ponad 20 lat działalności projektowej Bergera zaowocowało takimi realizacjami jak: terminal Hajj na lotnisku w Dżudzie (Arabia Saudyjska), stadion króla Fahda w Riadzie (Arabia Saudyjska), centrum zgromadzeń w San Diego (Stany Zjednoczone), pawilon Canada Place w Vancouver (Kanada) oraz najśłynniejszy terminal Jeppesen portu lotniczego w Denver (Stany Zjednoczone). Publikację uzupełniają rozdziały poświęcone konstrukcjom wielkoskalowym, przy których Berger współpracował z Davidem Geigerem. Konstruktorzy, np. Geiger, podkreślają ekonomiczne aspekty wykorzystania membrany, jako materiału pokrywczego, pozwalającego na uzyskanie dużych powierzchni dachu przy niskich kosztach. Natomiast Berger podkreśla piękno, delikatność i nietypowość formy uzyskanej z membrany. W końcowej części publikacji wyjaśnił wykorzystanie modeli fizycznych w etapie wstępnym projektowania. Wyjaśnił też, w uproszczony sposób, działanie metod obliczeniowych, pozwalających na modelowanie sieci przez programy komputerowe. Publikacja jest bardzo przystępnie napisana i często cytowana.

Warte zainteresowania są opracowania Klausa Michaela Kocha, Karla J. Habermanna⁸ i Kazuo Ishii⁹. Publikacje te przedstawiają najciekawsze realizacje z całego świata. Kontakty autorów z projektantami poszczególnych obiektów pozwoliły na udostępnienie informacji i materiałów pochodzących z realizacji. Sylvie Krüger w swojej publikacji¹⁰ dokonała przeglądu najnowszych możliwości wykorzystania tkaniny w architekturze z podziałem na osłony pionowe, poziome i przestrzenne. Wszystkie omawiane realizacje osadzone są w znanych historycznych rozwiązaniach.

Publikacje takich autorów jak: Heino Engel¹¹, Andrew Orthon¹², Gotthilf Goetz Schierle¹³ lub Daniel Schodek i Martin Bechthold¹⁴ dotyczą wszystkich systemów konstrukcyjnych, ale w każdej z nich znajduje się rozdział poświęcony konstrukcjom wykorzystującym napinane tkaniny. Autorzy próbują określać typy i formy najczęściej występujących konstrukcji. Niektórzy wprowadzają podziały i klasyfikacje, jak Engel, a inni próbują określić typowe rozpiętości lub krzywizny, np. Orthon. Dzięki tym publikacjom powstała systematyka, typologia form i rodzajów konstrukcji.

⁸ Klaus M. Koch, Karl J. Habermann, *Membrane Structures: The Fifth Building Material*. Prestel Verlag, 2004.

⁹ Kazuo Ishii, *Membrane designs and structures in the world*. Shinkenchiku-sha, Tokyo 1999.

¹⁰ Sylvie Krüger, *Textile architecture – Textile Architektur*. Jovis, Berlin 2009.

¹¹ Heino Engel, *Structure Systems*. Hatje Cantz, Germany 1997.

¹² Andrew Orton, *The way we build now: form, scale and technique*. E & Fn Spon, London 1988.

¹³ Gotthilf G. Schierle, *Structure and design*. Cognella, 2008.

¹⁴ Daniel Schodek, Martin Bechthold, *Structures*. Pearson Prentice Hall. New Jersey 2008.

Wanda Lewis, w publikacji *Konstrukcje napięte*¹⁵, główny nacisk położyła na etap poszukiwania formy. Wyjaśniła, że definiowanie kształtu konstrukcji w stanie naprężonym jest procesem iteracyjnym, czyli polegającym na wielokrotnych powtórzeniach. Programy komputerowe wykorzystują je w procesach obliczeniowych. Poszukiwanie form optymalnych polega na sprawdzeniu określonych kryteriów. Podkreśliła też potencjał napiętych konstrukcji jako sztuki form strukturalnych.

W zbiorowej publikacji pt. *Konstrukcje budowlane* jeden z rozdziałów dotyczy konstrukcji tekstylnych. Adam Zagubień¹⁶ zebrał tam zagadnienia związane z projektowaniem konstrukcji z materiałów tekstylnych. Podobne informacje znajdują się w publikacji *Atlas dachów – dachy spadziste*¹⁷, gdzie jeden z rozdziałów poświęcony jest membranom – dachom tekstylnym. Rozdział zawiera wiadomości na temat właściwości stosowanych materiałów, metod łączenia oraz sposobów podpierania za pomocą konstrukcji brzegowych. Publikacja zawiera również kilka szczegółowo zilustrowanych obiektów.

Jedną z najwyżej ocenianych prac pod względem praktycznym jest publikacja Michaela Seidela¹⁸. Bardzo szczegółowo przedstawiono w niej informacje na temat produkcji materiałów, z których wykonywane są konstrukcje membranowe, czyli tkaniny techniczne i różnego rodzaju cięgna. Następnie wyjaśniono problemy, jakie występują przy wykonaniu i wznoszeniu tego typu budowli.

Publikacje związane z tematem niniejszej monografii dotyczą w większości zagadnień konstrukcyjnych, metod obliczeniowych, a w mniejszym stopniu sfery architektonicznej. Przykładem jest dorobek pracowników Politechniki Gdańskiej na czele z Pawłem Kłosowskim i Andrzejem Ambroziakiem^{19, 20, 21, 22, 23}, w którym bardzo szczegółowo analizowane są zagadnienia związane z metodami obliczeniowymi napiętej membrany, właściwościami tkaniny technicznej, w tym dotyczą-

¹⁵ Wanda J. Lewis, *Konstrukcje napięte. Ich forma i praca*. Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2008.

¹⁶ Adam Zagubień, *Konstrukcje tekstylne*, [w:] *Budownictwo ogólne, tom 4. Konstrukcje budynków*. Arkady 2010.

¹⁷ Eberhard Schunck, Hans Jochen Oster, Rainer Barthel, Kurt Kiebl, *Atlas dachów. Dachy spadziste*, MDM, Cieszyn 2005, s. 428-432.

¹⁸ Michael Seidel, *Tensile Surface Structures, A practical Guide to cable and Membrane Construction*. Ernst & Sohn, Berlin 2009.

¹⁹ Andrzej Ambroziak, Paweł Kłosowski, Michał Nowicki, *O problemach w projektowaniu konstrukcji membranowych*. Inżynieria i Budownictwo, 1/2005.

²⁰ Andrzej Ambroziak, Paweł Kłosowski, *O projektowaniu konstrukcji membranowych*. Inżynieria i budownictwo 8/2008.

²¹ Andrzej Ambroziak, Paweł Kłosowski, *On aspects of tensile structures analysis*. Local Seminar of IASS Polish Chapter Lightweight Structures in Civil Engineering. Wydaw. Nauk. Micro-Publ. J.B. Obrębski, Częstochowa 2004.

²² Andrzej Ambroziak, *Membrane-hanging roof analysis: an example*. Task quarterly Volume 10, 3/2006.

²³ Andrzej Ambroziak, *Geometrycznie nieliniowa analiza membran stosowanych do konstrukcji przekryć wiszących z uwzględnieniem różnych typów związków konstytutywnych*, Autoreferat Pracy Doktorskiej, Gdańsk, 7 czerwiec 2006.

cych jej splotu i rodzaju pokrycia. Cenne jest to, że wspomniane analizy prowadzone są na przykładzie projektowanego wtedy zadania Opery Leśnej w Sopocie.

Opracowania naukowe dotyczące formy architektonicznej, przede wszystkim odnoszą się do poszukiwania inspiracji w swobodnym kształtowaniu napiętych membran. Teoretyczne modele uzyskiwane są za pomocą najnowszych programów komputerowych. Płynnie zmieniając parametry napiętej membrany, można generować liczne, zbliżone do siebie, wirtualne formy. Można też wprowadzać losowy dobór położenia punktów definiujących miejsce zamocowania membrany dzięki odpowiednio przygotowanym skryptom współpracującym z programem głównym. Dzięki takim narzędziom architekt może wybierać z setek przypadków układy najbardziej oryginalne, spełniające jego oczekiwania. Zagadnienia te związane są z tzw. projektowaniem parametrycznym, a ostatnio coraz częściej stosowanym terminem architektury parametrycznej.

Światowe tendencje w kształtowaniu i wykorzystaniu membran w architekturze kierują się w stronę łączenia struktur prętowo-ciężnowych z wypełnieniem modułarnymi segmentami membranowymi. O ile kiedyś celem było uzyskanie powtarzalności poszczególnych segmentów, o tyle obecnie wykorzystywane narzędzia do projektowania parametrycznego pozwalają na precyzyjne określenie kształtu i wymiarów dowolnej liczby nieco różniących się między sobą segmentów.

Wiele publikacji na temat konstrukcji membranowych ukazało się pod patronatem IASS – *International Association for Shell and Spatial Structures* (Międzynarodowe Stowarzyszenie Powłok i Konstrukcji Przestrzennych). Stowarzyszenie to od 1959 roku organizuje międzynarodowe sympozja, które odbywają się na wszystkich kontynentach. Jedną z grup roboczych tego Stowarzyszenia organizuje sesje techniczne dotyczące konstrukcji napiętych i membranowych (*Tension and Membrane Structures*), w których autor miał okazję uczestniczyć. Stowarzyszenie prowadzi też własny *Journal*, w którym ukazują się kolejne artykuły. W Polsce od 1995 roku działa lokalna grupa IASS naukowców, którzy spotykają się na corocznych seminariach o nazwie LSCE (*Lightweight Structures in Civil Engineering*).

Najbardziej zbliżonym tematycznie do niniejszej monografii jest działalność interdyscyplinarnego stowarzyszenia o nazwie Tensinet. Łączy ono wszystkich zainteresowanych budowaniem napiętych konstrukcji membranowych. Początkowo stowarzyszenie finansowane było przez Komisję Europejską. Powstało w 2001 roku dla stworzenia bazy naukowców, projektantów i wykonawców konstrukcji membranowych. Stowarzyszenie to wydaje biuletyny oraz organizuje warsztaty i sympozja, których owocem są wysokiej rangi wydawnictwa. Jedną z najważniejszych jest publikacja, której autorami są Brian Forster i Marijke Mollaert²⁴. Poza tym Tensinet ma bogatą bazę informacji na temat obiektów zrealizowanych na terenie całej Europy.

²⁴ Brian Forster, Marijke Mollaert, *European design guide for tensile surface structures*. Tensinet, Brussel 2004.

Na koniec należy wspomnieć próbę szerzenia wiedzy dotyczącej projektowania struktur membranowych wśród polskich studentów architektury. Był to konkurs architektoniczny pod tytułem „Membrana w kreowaniu przestrzeni”, który został zorganizowany w 2011 roku. Pomysłodawcą konkursu oraz jego organizatorem było biuro projektowe Modern Construction Systems, główny projektant Stadionu Miejskiego na Euro 2012 w Poznaniu. Głównym celem konkursu była analiza możliwości dotyczących zastosowania membrany w miejskiej przestrzeni publicznej oraz ukazanie potencjału, jaki za sobą niesie użycie tego materiału dla wprowadzenia nowych wartości estetycznych poprawiających atrakcyjność otoczenia²⁵. Zagadnienia projektowania struktur membranowych są wyjątkowym zagadnieniem, ułatwiającym poszerzanie wyobraźni studentów architektury. Dzięki analizie modelu fizycznego student widzi ściśle powiązanie formy i siły. Jednak brak tego powiązania w prostych programach do modelowania komputerowego zwiększa poszukiwania i próby jego uzupełnienia. Przykładem może być praca dyplomowa Krzysztofa Szewczyka obejmująca opracowanie programu komputerowego poszukującego kształt struktur membranowych²⁶.

²⁵ Magda Broniatowska, *Konkurs idea: membrana*. Architektura i Biznes 6/2011, s. 24.

²⁶ Krzysztof Szewczyk, *Form-finding and patterning techniques for membrane structures*. M.Sc Thesis. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby 2013.

1. STRUKTURY MEMBRANOWE I ICH ZASTOSOWANIE

1.1. Co to są struktury membranowe – próba definicji

Zadaszenia membranowe są jednym z rodzajów struktur stosowanych w architekturze dla ochrony przed czynnikami atmosferycznymi.

Co oznacza słowo membrana? Termin ten pochodzi z łaciny (łac. *membrana* - skórka, skóra, błona, pergamin)²⁷ i jest powszechnie używany, między innymi w języku angielskim (ang. *membrane*) i języku niemieckim (niem. *membran*). Oznacza „błonę”, czyli cienki, elastyczny element występujący w przyrodzie np. w organizmach roślinnych lub zwierzęcych²⁸. Drugie znaczenie to rodzaj cienkiej, elastycznej przegrody²⁹, częściowo przepuszczającej np. określoną substancję, natomiast trzecie znaczenie to cienka, sprężysta i drgająca płytka³⁰. Wszystkie te definicje podkreślają niewielką grubość i elastyczność membrany, która pozwala na odkształcanie oraz sprężystość, która powoduje, że może drgać w określonych warunkach. Cechy te dalekie są od własności materiałów budowlanych stosowanych w architekturze. Razem z niewielką grubością membrany jest związana niewielka masa, większa podatność na uszkodzenia i większa przepuszczalność cieplna. Dlatego stosowanie struktur membranowych jest związane z określonymi ograniczeniami,

a specyficzne właściwości powodują, że można z nich wykonywać nietypowe formy, odmienne od tych tradycyjnych, które występują w architekturze.

Membrana utrzymuje swój kształt dzięki temu, że jest napięta, czyli wymaga odpowiedniego zamocowania, aby nawet niewielkie obciążenia nie powodowały odkształceń. Błony, które występują w przyrodzie są połączone ze sztywnymi elementami szkieletu. Ta wzajemna współpraca elementów wiotkich i sztywnych pozwala na to, że ich układ, czyli „struktura”³¹ może utrzymywać swoje położenie oraz stawiać opór zewnętrznym obciążeniom. W przypadku architektury strukturami membranowymi są części budowli, które wykonane są z napiętej tkaniny technicznej lub folii. Niewielka grubość materiału, z którego są wykonane powoduje, że mogą w nich występować tylko siły rozciągające.

W języku angielskim systemy konstrukcyjne, w których główną rolę odgrywają wiotkie rozciągane elementy, takie jak ciężna i membrany, określane są słowem *tensile*³² – napięte³³. Aby uzyskać napięcie membrany, konieczne jest spełnienie określonych warunków. Układ elementów, do których jest zamocowana musi

²⁷ Kazimierz Kumaniecki, *Słownik łacińsko-polski*, PWN, Warszawa 1986, s. 306.

²⁸ Stanisław Dubisz, *Uniwersalny słownik języka polskiego*, t. 3, PWN, Warszawa 2003, s. 605.

²⁹ Membrana – elastyczna przegroda pomiędzy dwoma ośrodkami (gazowymi lub ciekłymi), przepona, por. Elżbieta Sobol, *Słownik wyrazów obcych*. PWN, Warszawa 1995, s. 707.

³⁰ Membrana – sprężysta cienka płytka drgająca pod wpływem fali dźwiękowej, por. Stanisław Skorupka, Halina Auderska, Zofia Lempicka, *Mały słownik języka polskiego*. PWN, Warszawa 1989, s. 381.

³¹ Struktura – układ i wzajemne zależności poszczególnych elementów stanowiących pewną całość, por. Stanisław Dubisz, *op.cit.*, t. 3, s. 1421.

³² *Tensile* (ang.) – rozciągający, rozciągliwy, por. M. Skrzyńska, S. Czerni: *Słownik naukowo-techniczny angielsko-polski*. PWN, Warszawa 1995, s. 907.

³³ Napięcie – stan silnego naciągnięcia czegoś elastycznego, por. Stanisław Dubisz, *op.cit.*, t. 2, s. 821.

być dostatecznie sztywny oraz odpowiednio odsunięty, aby napięcie nie powodowało zbliżenia tych elementów. Napięcie błony może też być spowodowane różnicą ciśnień występujących po obu jej stronach, skutkiem tego jest wypychanie lub zasysanie powłoki. W naturze może to być ciśnienie cieczy wewnątrz komórki roślinnej lub zwierzęcej. Natomiast w konstrukcjach budowlanych napinanie uzyskiwane jest przez pompowanie powietrza.

Pierwsza publikacja Freia Otto była pod tytułem *Das hängende Dach*³⁴ – dachy wiszące. Nazwa nawiązywała do konstrukcji mostów wiszących, ale Otto wyraźnie podkreślał, że typową cechą nie jest to że „zwisają”, tylko, że stanowią wstępnie napięty układ krzyżujących cięgien. W kolejnych publikacjach Otto użył tytułu *Zugbeanspruchte Konstruktionen*^{35,36}. Tłumaczenie tej publikacji na język angielski zawierało zwrot *tensile structures*³⁷. Termin „*tensile*” używany jest w odniesieniu do elementów lub do całych konstrukcji, natomiast bywa on również używany w odniesieniu do architektury. W tytułach publikacji Philipa Drew³⁸, Hansa Joachima Schocka³⁹ oraz publikacji Roberta Scheuermanna i Keith Boxer⁴⁰ występuje *tensile architecture*, jako zwrot dotyczący obiektów, a nawet sztuki ich kształto-

wania z wykorzystaniem napiętej membrany. Gdyby próbować dosłownie przetłumaczyć ten zwrot, to powinien on brzmieć następująco „architektura napięta” lub „architektura rozciągana”, co jest trudne do przyjęcia w języku polskim. W przypadku zwrotu „konstrukcje napięte” brzmi to lepiej, a „konstrukcje błonowe⁴¹” lub „konstrukcje membranowe” nie tylko sugeruje materiał, z którego jest wykonana, ale dodatkowo podkreśla ich napięcie. W teorii konstrukcji stosowany jest termin „stan błonowy⁴²”, w którym zakładany jest stan naprężenia, gdzie występują jedynie siły styczne do powierzchni, powodujące rozciąganie i ściskanie. W przypadku membran występują tylko siły rozciągające, więc użycie terminu „konstrukcje błonowe” jest jak najbardziej prawidłowe. Stosowanie innych określeń, np. „namiotowe”, podkreśla tymczasowość, a „tekstylne” określa rodzaj materiału, z którego jest wykonane, czyli tkaniny technicznej. Terminy te są rzadziej stosowane. Nawet użycie terminu „plandeka dachowa” nie jest błędem, ale niestety wyraźnie dewaluuje ten materiał. Poza tym korzystanie z innych terminów odbierane bywa jako brak profesjonalizmu.

Struktury membranowe stosowane są w architekturze jako przegrody chroniące przed działaniem czynników atmosferycznych tak jak

³⁴ Frei Otto, *Das hängende Dach. Gestalt und Struktur*, Bauwelt Verlag, Berlin 1954.

³⁵ *Zugbeanspruchung* (niem.) – naprężenie rozciągające, por. Małgorzata Sokołowska, Anna Bender, Krzysztof Żak, *Słownik naukowo-techniczny niemiecko-polski*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002, s. 1335.

³⁶ Frei Otto, *Zugbeanspruchte Konstruktionen. Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen*, Ullstein, Frankfurt, Berlin 1962.

³⁷ Frei Otto, R. Trostel, F.K.Schleyer, *Tensile structures. Design, structure, and calculation of buildings of cables, nets, and membranes*, The MIT Press 1973.

³⁸ Philip Drew, *Tensile architecture*, Granada Publishing Limited, London 1979.

³⁹ Hans Joachim Schock, *Soft shells. Design and technology of tensile architecture*, Birkhauser Verlag, Basel, Berlin, Boston 1997.

⁴⁰ Robert Scheuermann, Keith Boxer, *Tensile architecture in the urban context*. Oxford, Butterworth Architecture 1996.

⁴¹ Terminu tego użył Tadeusz Kolendowicz w tytule artykułu, patrz: Tadeusz Kolendowicz, *Konstrukcje błonowe*. Budowlany Informator Techniczny, 7/8 2001, s. 11-16.

⁴² Stan błonowy lub bezmomentowy – siły wewnętrzne w powłoce są rozłożone stycznie do jej powierzchni środkowej, a zatem nie ma zginania, por. Tadeusz Kolendowicz, *Mechanika budowli dla architektów*, Arkady Warszawa 1996, s. 49.

dach⁴³ i ściany. Poza funkcją czysto użytkową, pełnią w budynku o wiele ważniejszą rolę. Ich zróżnicowana forma, przez swoją odmienność, nadaje charakter całemu budynkowi. Wysockość, na jakiej się znajdują powoduje, że widoczne są z daleka i stanowią element ułatwiający orientację w przestrzeni.

Głównym celem autora jest przedstawienie jak realizowane są zasady kształtowania struktur membranowych w klimacie umiarkowanym, np. w Polsce, stąd główną uwagę zwrócono na dachy. Dla osłon elewacji nie jest istotne zapewnienie właściwego odprowadzenia wody i usuwanie śniegu. W przypadku struktur membranowych często zacierą się granica pomiędzy dachem a ścianą, dlatego pojęcie „dachu” jest poszerzane i zastępowane „przekryciem⁴⁴” lub „zadaszeniem”. Obejmuje ono wtedy nie tylko wszelkie konstrukcje oparte na ścianach czy słupach, ale również konstrukcje, które stanowią osłonę „z góry” i „z boku”. Władysław Borusiewicz⁴⁵ nazywał je „wiszącymi przekryciami błonowymi”. W słownikach języka polskiego częściej pojawia się termin „zadaszenie” niż „przekrycie”, dlatego wydaje się, że najbardziej poprawnym językowo terminem jest określenie „zadaszenia błonowe”, jednak powszechność słownictwa obcego spowodowała, że

obecnie najczęściej używany jest zwrot „zadaszenia membranowe”.

1.2. Geometria formy – powierzchnie minimalne

Membrana, aby móc przenosić zewnętrzne obciążenia powinna być napięta, inaczej będzie przemieszczać się, nawet przy niewielkich obciążeniach. Napięcie membrany powoduje, że przyjmuje formę wynikającą z kształtu elementów, do których jest zamocowana, układu sił, które na nią działają oraz przygotowanych wykrojów, na podstawie których została wykonana. Forma ta nie jest typową powierzchnią geometryczną, a jedynie mające charakterystyczne cechy występujące w innych powierzchniach. Na pewno jest to powierzchnia o podwójnej krzywiznie⁴⁶. Jeśli napięcie membrany wynika tylko z przyłożonego naprężenia wstępnego, to jest to powierzchnia, której krzywizna Gaussa⁴⁷ jest ujemna. W literaturze polskiej używana jest nazwa krzywizny siodłowanej⁴⁸ oraz to, że powierzchnię taką tworzą punkty hiperboliczne⁴⁹. Przyjęła się też nazwa „powierzchnia antyklastyczna”, która pochodzi z języka greckiego i jest używana w języku angielskim (*antyclastic surface*).

⁴³ Dach – część budynku ograniczająca go od góry i zabezpieczająca przed opadami atmosferycznymi; składająca się z konstrukcji nośnej i pokrycia dachowego. Zależnie od kształtu rozróżnia się dachy: jednospadowe (pulpitowe), dwuspadowe, czterospadowe, mansardowe, półszczytowe, namiotowe, stożkowe, kopulaste, baniaste, cebulaste, pilaste i łupinowe, por. Wielka encyklopedia powszechna PWN, *op.cit.*, t. 2, s. 783.

⁴⁴ Przekrycie – konstrukcja nośna osłaniająca od góry pomieszczenie zamknięte (w budynku) lub pewien obszar przestrzeni otwartej (np. wiata peronowa na dworcu kolejowym lub autobusowym); przekrycie opiera się na ścianach (budynku) lub na słupach (w przypadku konstrukcji wolno stojącej); przekrycie budynkowe dzieli się na stropowe i dachowe, por. *ibidem*, t. 9, s. 524.

⁴⁵ Władysław Borusiewicz, *Konstrukcje budowlane dla architektów*, Arkady, Warszawa 1978, s. 355.

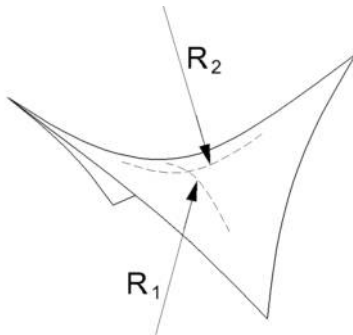
⁴⁶ Krzywizna – odwrotność promienia ($k=1/R$). W przypadku krzywizny powierzchni chodzi o krzywizny główne, wynikające z największego i najmniejszego promienia krzywizny znajdującego się w płaszczyznach zawierających prostą prostopadłą do powierzchni w danym punkcie, por. Stefan Przewłocki, *Geometria wykreslna w budownictwie*. Arkady, Warszawa 1982, s. 65.

⁴⁷ Krzywizna Gaussa – wielkość obliczana, jako iloczyn krzywizn głównych powierzchni w danym punkcie, por. Igor N. Bronsztejn, Konstantin A. Siemiendiajew, *Matematyka, poradnik encyklopedyczny*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999, s. 337.

⁴⁸ Krzywizna siodłowana, por. Stanisław Polański, Aleksander Kowalewski, Jerzy Daniluk, *Geometria dla konstruktorów*, WNT Warszawa 1965, s. 319.

⁴⁹ Punkt hiperboliczny, por. Igor N. Bronsztejn, Konstantin A. Siemiendiajew, *op.cit.*, s. 337.

Wyjaśnieniem matematycznych definicji jest il. 1. Powierzchnia siodłowa, bo tak uproszczona nazwa najczęściej używana jest przez architektów, charakteryzuje się tym, że jeden promień krzywizny znajduje się po jednej stronie powierzchni, a drugi promień krzywizny po przeciwnej stronie. Krzywizna jest charakterystyczna dla określonego punktu powierzchni, ale nie oznacza to, że jest stała dla całej powierzchni.



Il. 1. Schemat powierzchni antyklasycznej

Zbliżone właściwości ma powierzchnia paraboloidy hiperbolicznej⁵⁰; też jest powierzchnią o podwójnej krzywiznie z ujemną krzywizną Gaussa. Ponadto paraboloida hiperboliczna jest powierzchnią prostokreślną⁵¹, co ułatwia wykonanie szalunków w przypadku żelbetowych konstrukcji powłokowych. Przekroje paraboloidy hiperbolicznej są parabolami lub hiperbolami, stąd krzywizny w poszczególnych punktach różnią się między sobą.

Powierzchnia siodłowa jest bezpośrednio związana z matematycznym pojęciem powierzchni minimalnej. Definicja określa ją jako zbiór punktów przestrzeni o zerowej średniej krzywiznie, która obliczana jest na podstawie wzoru:

$$H = \frac{k_1 + k_2}{2} = 0, \quad (1)$$

k_1, k_2 – krzywizny główne powierzchni w danym punkcie⁵².

Aby średnia krzywizna wynosiła zero, to obie krzywizny główne muszą być sobie równe, a znaki muszą być przeciwne, czyli promienie powinny znajdować się po przeciwnych stronach powierzchni. Oczywiście wielkość tych promieni może się zmieniać w różnych punktach powierzchni.

Przykłady powierzchni minimalnych przedstawione są przez Stefana Przewłockiego⁵³ i Mieczysława Majewskiego⁵⁴. Matematycznie tylko katenoida⁵⁵ i helikoida⁵⁶ są precyzyjnie zdefiniowane. Pozostałe rodzaje tworzą formy trudne do opisanego wzorami arytmetycznymi, a zarazem trudne do geometrycznego wykreślenia. Powierzchnie takie są jakby granicami ciągu położenia kolejnych punktów w przestrzeni, które tworzą formę o najmniejszym polu. Określone są elementami brzegowymi, które mogą być dowolnie położone w przestrzeni.

⁵⁰ Paraboloida hiperboliczna to powierzchnia powstała z przesunięcia paraboli po drugiej ustawionej w przeciwną stronę, poza tym, jest to też powierzchnia prostokreślna, por. Tadeusz Kolendowicz, *Mechanika budowlana dla architektów*, Arkady, Warszawa 1996, s. 56.

⁵¹ Prostokreślność to właściwość powierzchni, którą można uzyskać przez ruch prostej, por. Stefan Przewłocki, *op.cit.*, s. 62.

⁵² Igor N. Bronsztejn, Konstantin A. Siemiendiajew, *op.cit.*, s. 337.

⁵³ Stefan Przewłocki, *op.cit.*, s. 105.

⁵⁴ Mieczysław Majewski, *Przekrycia powłokowe – geometryczne kształtowanie w projektowaniu architektonicznym*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1997, s. 137.

⁵⁵ Katenoida – powierzchnia utworzona przez obrót linii łańcuchowej, por. Wielka encyklopedia, *op.cit.*, vol. 5, s. 523.

⁵⁶ Helikoida – powierzchnia śrubowa ogólna, powstała przez obrót krzywej płaskiej lub skośnej dookoła ustalonej prostej i jednocześnie ruch wzdłuż tej prostej, por. Wielka encyklopedia, *op.cit.*, vol. 4, s. 599.

Trudne matematycznie zagadnienie zostało zdefiniowane fizycznie przez Josepha Plateau⁵⁷. Wykazał on, że błona mydlana rozpięta na zadanej zamkniętej krzywej (wymodelowanej np. z drutu) przyjmuje kształt powierzchni minimalnej. W przypadku gdy definiująca krzywa brzegowa leży w jakiejś płaszczyźnie, to otrzymana powierzchnia jest płaska (promienie jej krzywizny wzrosły do nieskończoności), czyli płaszczyzna jest szczególnym przypadkiem powierzchni minimalnej.

Powierzchnie minimalne mogą się łączyć i tworzyć formy złożone, tzw. periodyczne powierzchnie minimalne. Matematycznie zostało to udowodnione przez Hermanna A. Schwarz⁵⁸. W przyrodzie powierzchnie te występują w roztworach wodnych tzw. lipidów i detergentów. Szkielet koralowca jest również zbliżony do periodycznych powierzchni minimalnych⁵⁹.

Powierzchnia minimalna jest powierzchnią stanu równowagi, wynikającą z działania napięcia powierzchniowego. Błona mydlana jest jednorodna i napięcie powierzchniowe działa we wszystkich kierunkach z taką samą siłą. W napiętej membranie siły wewnętrzne mogą być tej samej wartości, ale jest to przypadek szczególny. Zależy to od przyłożonego naprężenia wstępnego. Poza tym forma napiętej membrany częściowo uzależniona jest od przygotowanych wykrojów, stąd ostateczna forma jest tylko zbliżona do powierzchni minimalnych.

Inny rodzaj powierzchni występuje, gdy na membranę działa dodatkowa siła, wynikająca z różnicy ciśnienia powietrza po obu stronach powłoki. Taki napór powoduje wiatr, działając na żagiel lub ciśnienie powietrza wewnątrz bańki mydlanej. Działanie zewnętrznej siły powoduje wypychanie lub zasysanie powłoki i nadawanie jej podwójnej krzywizny. Matematyczna definicja mówi, że są to powierzchnie o podwójnej krzywiznie, której krzywizna Gaussa jest dodatnia albo inaczej o krzywiznie wypukłej⁶⁰. Powierzchnię taką tworzą punkty eliptyczne⁶¹. Stosowana też jest nazwa „powierzchnia synklastyczna” (*synclastic surface*). Dodatnią krzywiznę Gaussa mają też sfera, elipsoida, paraboloida obrotowa itp. W zależności o kształtu linii brzegowej, przygotowanej powłoki i elementów ograniczających wypychanie pod wpływem ciśnienia membrana przyjmuje formę zbliżoną do wycinka sfery, sumy połączonych sfer lub powierzchni obwiedniowej⁶², stycznej do układu sfer.

Powierzchnie takie występują w konstrukcjach pneumatycznych. W monografii przede wszystkim przedstawione są przykłady obiektów z membraną, która jest naprężona przez układ elementów podporowych, bez konieczności dodatkowego, ciągłego pompowania powietrza.

Twórczość architektoniczna wydaje się nieskrępowana, dlatego można założyć, że projektowane formy mogą być dowolne, a występujące w nich powierzchnie swobodne. Mieczys-

⁵⁷ Joseph Antoine Fernand Plateau (1801-1883) belgijski fizyk, który doświadczalnie określił wpływ sił napięcia powierzchniowego na kształt powierzchni błonek cieczy, por. Wielka encyklopedia, *op.cit.*, vol. s. 723.

⁵⁸ Patrz Krystyna Januszkiewicz, *Powierzchnie minimalne i membrany architektoniczne*, Archivolta 3(59)/2013, s. 44-51.

⁵⁹ Patrz Romuald Tarczewski, *Topologia form strukturalnych: naturalne i tworzone przez człowieka prototypy form konstrukcyjnych w architekturze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011, s. 106.

⁶⁰ Krzywizna wypukła, por. Stanisław Polański, Aleksander Kowalewski, Jerzy Daniluk, *op.cit.*, s. 319,

⁶¹ Punkt eliptyczny, por. Igor N. Bronsztejn, Konstantin A. Siemiendajew, *op.cit.*, s. 337.

⁶² Obwiednia – krzywa styczna do każdej krzywej danej rodziny, stąd powierzchnia obwiedniowa to zbiór punktów przestrzeni tworzących powierzchnię styczną do zbioru określonych powierzchni, por. Igor N. Bronsztejn, Konstantin A. Siemiendajew, *op.cit.*, s. 321.

sław Majewski⁶³ zdefiniował je, jako zaprojektowane w sposób dowolny, według indywidualnej wizji twórcy, takie, które nie podlegają regułom matematycznym i geometrycznym. Aby przedstawić formę swobodną, konieczne jest korzystanie z takich sposobów jak: rysunek, wizualizacja, animacja lub model fizyczny. Najczęściej przedstawiane są charakterystyczne elementy takiej powierzchni jak przekroje płaszczyznami poziomymi lub pionowymi. Powierzchnia przecięta płaszczyznami poziomymi przedstawia plan warstwiczny, a przecięta płaszczyznami pionowymi (podłużnymi i poprzecznymi) przedstawia siatkę profili. Gęstość siatki jest zwiększana w zależności od tego, jak bardzo złożona jest powierzchnia. Takie przedstawienie ułatwia zrozumienie kształtu, a zarazem zbudowanie modelu fizycznego. Czasami taki podział jest wykorzystywany do zbudowania szkieletu konstrukcyjnego, na który naciągana jest membrana. Formy, które modelowane są cyfrowo najczęściej reprezentowane są przez siatkę trójkątów. Programy komputerowe generują taką siatkę, aby wykorzystać ją w dalszym procesie obliczeniowym, w tzw. metodzie elementów skończonych⁶⁴. Krawędzie trójkątów zwykle nie pokrywają się ani z warstwicami, ani z profilami.

Jan Foretník⁶⁵ wyjaśnia, że formy swobodne stosowane w architekturze częściowo wynikają z narzędzi, którymi są modelowane np. z poleceń stosowanych w programach komputerowych. Powstają w wyniku określonych przekształceń, np.: rozciągania, skręcania, skalowania lub zaokrąglania. Paweł Rubinowicz⁶⁶ do

tego dodaje: rozbitcie, deformację i rozproszenie, jako elementy kształtowania form złożonych w architekturze współczesnej. Architekt projektując obiekty, nadaje im formy, które wynikają z jego wyobraźni. Przy czym, inspirowane jest szeroko rozumianą naturą, matematyką lub formami, które już wcześniej widział. Aby dostosować je do potrzeb funkcji, lokalizacji i możliwości realizacji, w procesie projektowym wykonuje analizę porównawczą generowanych wariantów. Aleksandra Prokopska⁶⁷ podkreśla, że projektant rozważając możliwości i ograniczenia, realizuje proces przez wielokrotne powtarzanie określonych faz.

Ponieważ formy oparte na powierzchniach minimalnych mają najbardziej efektywnie wykorzystany materiał dla przeciwstawienia się obciążeniom, więc są dobrą inspiracją dla innych konstrukcji. Krystyna Januszkiewicz⁶⁸ podkreśla ich rolę w projektowaniu architektonicznym, przedstawiając wiele przykładów, w których powierzchnie minimalne były początkową formą, następnie dostosowaną i zrealizowaną w obiektach architektonicznych. Jednym z nich może być projekt Masaki Endoh i Masahiro Ikeda domu o nazwie Natural Ellipse w Tokio. Forma geometrycznego torusa przekształcona została do wielkości budynku wpisanego w wąską działkę. Wyznaczony został układ linii, wzdłuż których został zaprojektowany stalowy szkielet. Następnie zamocowane zostały sztywne panele, wyprofilowane tak, że przypominają napiętą membranę. Innym przykładem może być dach kompleksu basenowego w Bad Dürrenheim zaprojektowany przez pracownię Geier+Geier i zrealizowany

⁶³ Mieczysław Majewski, *op.cit.*, s. 30-31.

⁶⁴ Wanda J. Lewis, *Konstrukcje napięte. Ich forma i praca*, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2008, s. 26-27.

⁶⁵ Jan Foretník, *Architektura, geometrie a výpočetní technika*, Vysoke uceni technicke v Brene, Brno 2010.

⁶⁶ Paweł Rubinowicz, *Chaos jako porządek wyższego rzędu w wybranych trendach współczesnej architektury*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2010.

⁶⁷ Aleksandra Prokopska, *Analiza metodologiczna wybranych działań projektowych w procesie architektonicznym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 236, s. 71-77.

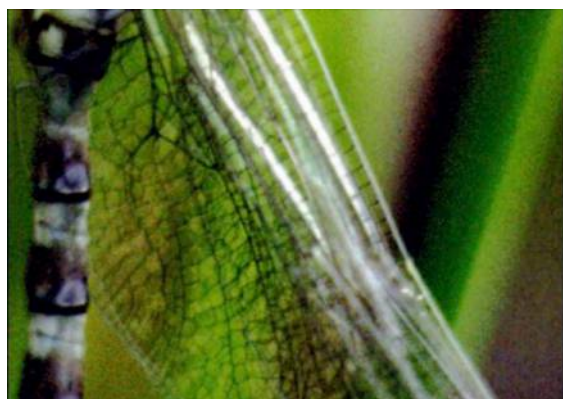
⁶⁸ Krystyna Januszkiewicz, *op.cit.*, s. 48.

w 1987 roku. Zastosowano tam drewniany ruszt z listew uformowanych według powierzchni minimalnej⁶⁹.

Jak to już wcześniej zostało wyjaśnione poszczególne fragmenty napiętej membrany przyjmują formę powierzchni dwukrzywiznowej. Próba uzyskania swobodnej formy przez wykorzystanie membrany wiąże się z koniecznością odpowiedniego ukształtowania konstrukcji, do której jest przymocowana. W takim przypadku membrana jest rodzajem pokrycia, skóry, która współtworzy przestrzeń, oddziela ją od środowiska, ale też pozwala na przenikanie do wnętrza światła, dźwięków, ciepła itd.

1.3. Organizmy żywe

Natura zawsze pociągała człowieka do naśladowania, a poznawanie jej praw powodowało ciągły rozwój. Podpowiadała też człowiekowi jak ma kształtować przedmioty i budowle, aby spełniały jego potrzeby. Poza tym ułatwiała wybór odpowiedniego materiału oraz sposobów łączenia poszczególnych części.



Il. 2. Skrzydła ważki

Różne aspekty naśladowania zwłaszcza natury w architekturze omówione są przez Andrzeja Cząstkę⁷⁰. Na przestrzeni wieków naśladowane były nie tylko poszczególne formy, ale też całe układy, a nawet zasady działania i procesy występujące w naturze. W renesansie skupiano się na proporcjach ciała ludzkiego, jako najdoskonalszym wzorcu do naśladowania. Używane formy, jeśli nawet były kształtowane płynnie i miękko, to były wynikiem stosowania geometrycznych łuków. Obowiązywał prymat geometrii i starano się stosować idealne kształty. Dopiero w okresie secesji powszechnie wprowadzono linie o stale zmiennej krzywiznie⁷¹. Dzięki temu bardziej przypominały naturalne krzywizny części roślin. Istotnym krokiem było też zastosowanie w architekturze powierzchni paraboloidy hiperbolicznej przez Antonio Gaudiego⁷². Jest to forma geometryczna, ale o zmieniającej się krzywiznie.

Pod koniec XIX wieku rozpoczął się gwałtowny rozwój przemysłu i wszechobecna industrializacja. Częściowym objawem przeciwstawienia się temu na początku XX wieku było ukształtowanie się kierunku nazywanego architekturą organiczną. Było to częścią szerszego nurtu w sztuce, nazywanego abstrakcją organiczną. Jej twórcy uważali, że architektura powinna być kształtowana w analogii do natury. Wzorowanie się na organizmach żywych nie oznaczało dosłownego naśladowania, ale raczej zasad funkcjonowania i rzeczywistych zależności przestrzennych.

Hugo Häring pisał, że poszukiwanie kształtu jest zgodne z naturą: „Organiczna architektura jest faktem. Nowa technika dysponująca lekimi konstrukcjami, o dużej elastyczności nie

⁶⁹ http://commons.bcit.ca/civil/edufacts/glulam_tree.html (6-04-2005).

⁷⁰ Andrzej Cząstka, *Architektura a natura – problem mimesis w architekturze*, monografia – Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 2007, s. 35.

⁷¹ Janusz Ballenstedt, *Architektura – historia i teoria*, PWN, Warszawa-Poznań 2000, s. 415.

⁷² *Ibidem*, s. 418.

wymaga, aby dom był statyczną formą kubiczną, ale umożliwia formy domu, na wzór organizmu spełniającego wymagania stawiane mu przez życie...⁷³.

Zmieniały się poglądy na temat kształtowania architektury. Louis Sullivan głosił, że „forma podąża za funkcją” (*form follows function*)⁷⁴, co oznaczało, że dekoracja nie powinna przysłaniać funkcji obiektu, ale harmonijnie współgrać z nowoczesnymi technologiami budowlanymi⁷⁵. Czasami było to mylnie pojmowane, jakoby forma wymagała poszukiwania przez architekta i wynikała z funkcji danego obiektu. Drugim ważnym hasłem modernizmu było „mniej znaczy więcej” (*weniger ist mehr, less is more*)⁷⁶ Ludwika Miesa van der Rohe’a. Architekt starał się stosować oszczędne, ale wyraziste gesty, aby osiągnąć czystą formę i idealne proporcje.

Hasła te były różnie realizowane w architekturze, natomiast w przypadku kształtowania konstrukcji przede wszystkim stosowano zasadę minimalnego wykorzystania materiału. Aby to osiągnąć, sięgano do analizy form występujących w naturze, stąd tak istotną rolę odegrali między innymi Buckminster Fuller i Frei Otto. Zajmowali się oni nie tylko badaniami formy, ale łączyli to z przepływem sił w istniejących strukturach. Szukali odpowiedzi na pytania o tajniki natury, jak budować w skalach mikro

i makro⁷⁷. Poza tym byli wizjonerami poszukującymi projektów idealnych, próbowali przewidzieć futurystyczne megastruktury.

Organizmy w drodze ewolucji dostosowały się do określonych potrzeb, wybierając jak najprostsze i zarazem najbardziej oszczędne rozwiązania. Dzięki temu w naturze powstały formy stosujące zasadę minimalnego wykorzystania materiału. Podobnie kształtowane są struktury powłokowe występujące w przekryciach o dużych rozpiętościach. Zatraca tam się podział na skórę i szkielet, choć pozwala on na optymalizowanie rozwiązań budowlanych, np. ułatwia wykonanie. Struktury formowane zgodnie z zasadami biologicznymi są tektoniczne⁷⁸ i nie mają zbędnych efekciarskich dekoracji, kształtowane są zgodnie z logiką konstrukcji⁷⁹. Zasady kształtowania architektury, wynikające ze struktury nośnej, bardzo dobrze przedstawił Curt Siegel⁸⁰, który w „Formach strukturalnych w nowoczesnej architekturze” zebrał doświadczenie dydaktyczne z pracy na Uniwersytecie w Stuttgarcie. W dyskusjach przeprowadzonych z Frejem Otto analizowali zagadnienia estetyki i piękna wynikające z form natury⁸¹.

W latach 60. XX wieku z cybernetyki wyodrębniła się nowa nauka o nazwie bionika⁸². Naukowcy główną uwagę skierowali na procesy, jakie dzieją się w określonym czasie.

⁷³ Stanisław Latour, Adam Szymski, *Rozwój współczesnej myśli architektonicznej*, Państw. Wydaw. Nauk. Warszawa 1985, s. 346.

⁷⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Form_follows_function#Debate_on_the_functionality_of_ornamentation (7-04-2016).

⁷⁵ Peter Gössel, Gabriele Leuthäuser, *Architektura XX wieku*, Taschen 2006, s. 54.

⁷⁶ Stanisław Latour, Adam Szymski, *op.cit.*, s. 294.

⁷⁷ Oliver Herwig, *Das Grosse im Kleinen - Architektur und Design wachsen zusammen*, im Christian Schittich, *Mikroarchitektur: kleine Bauten, temporäre Strukturen, Raumzellen*, Detail 2010, s. 58-59.

⁷⁸ Tektonika (gr. tektoniké – sztuka budowlana, ciesielstwo) – cecha obiektu polegająca na podporządkowaniu jego części składowych i detali zasadzie zwartości i przejrzystości całej kompozycji, [w:] Witold Szolginia, *Architektura*, Sigma NOT, Warszawa 1992, s. 158.

⁷⁹ Maciej Kysiak, *Architektura pawilonów wystawowych – funkcja, forma, konstrukcja*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998, s. 109.

⁸⁰ Curt Siegel, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*. Arkady, Warszawa 1974.

⁸¹ Eda Schaur, *Basics: form force mass, IL 21*. Institute of Lightweight Structures, Stuttgart 1979, p. 166, 175.

⁸² Jurij Siergiejewicz Lebiediew, *Architektura i bionika*, Arkady, Warszawa 1983.

Analizowano nie tylko formy i ich proporcje, ale też kolejność, prędkość i zależności pomiędzy poszczególnymi zjawiskami dynamicznymi zachodzącymi w naturze. Z obserwacji wyprowadzane zostały prawa stosowane w informatyce, ekonomii i zarządzaniu. Również architekci i urbaniści zainteresowali się takim podejściem do problemu⁸³. Analizowano, jak przebiegają procesy, czy są w jakiś sposób sterowane czy może przebiegają samistnie. Nawet jeśli nie można na nie wpływać, to przynajmniej można je przewidywać i wykorzystywać. Pojawiły się takie określenia jak „samokształtne” i „samoorganizacja”, oznaczające procesy toczące się bez ingerencji zewnętrznych. Procesy te są niejako zakodowane i decydują o rozwoju organizmów żywych. Michael Hensel⁸⁴ analizując prace biologów, przedstawił zastosowanie ich w projektowaniu architektonicznym.

Biologiczne materiały komórkowe mają skomplikowaną strukturę wewnętrzną wynikającą z samoorganizacji poszczególnych modułów. Jak wyjaśnia Michael Weinstock⁸⁵ piankowe materiały komórkowe tworzą układy liniowe lub sferyczne, a przy tym są mocne i ażurowe. Dzięki temu mogą być przydatne dla nowych systemów konstrukcyjnych w architekturze i budownictwie. Najnowsze badania dotyczą też właściwości materiałów, które decydują o przydatności w określonych warunkach, na przykład: jak to się dzieje, że zachowują czystość, w jaki sposób utrzymują określoną temperaturę lub jak zatrzymują i przechowują wodę.

Obecnie stosowane zasady zrównoważonego rozwoju zalecają minimalizację ingerencji w środowisko, ochronę materiałów, energii itd., a współistnienie z naturą związane jest z myślą o zachowaniu jej dla kolejnych pokoleń. Poza tym stosowanie biomorficznego wyglądu jest jakby przeciwieństwem technologii, powrotem do natury.

Od czasu pierwszych doświadczeń robionych w Instytucie Lekkich Konstrukcji w Stuttgarcie minęło już dużo czasu. Obecnie analizowane organizmy poddawane są procesowi dygitalizacji, który pozwala na zamianę formy fizycznej na model cyfrowy. Następnie wykorzystując przekształcenia matematyczne, można model zmieniać i dostosowywać do określonych potrzeb. Podsumowaniem zmian w podejściu do analizy form organicznych w architekturze mogą być najnowsze opracowania Achima Mengesa⁸⁶. Próbuje on traktować już nie tylko architekturę, ale sam proces projektowania architektonicznego jako zjawisko zbliżone do rozwoju form w naturze.

⁸³ Małgorzata Solska, *Architektura organiczna a bioniczna a nowoczesne technologie budowlane*, Czasopismo Techniczne – Architektura, z. 2-A, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2011, s. 187-196.

⁸⁴ Michael Hensel, Achim Menges, Michael Weinstock, *Emergence: Morphogenetic Design Strategies*, Architectural Design, vol. 74, No. 3, London 2004.

⁸⁵ Michael Weinstock, *Self-organisation and material constructions*. Architectural Design 76 (2), p. 34-41.

⁸⁶ Achim Menges, Polymorphism, Architectural Design, 76, 2, 2006, p. 78-87.

2. METODY KSZTAŁTOWANIA

2.1. Elementy procesu projektowego

Formy powłok występujących w zadaniach membranowych są wypadkową koncepcji architektonicznej oraz analizy sił wewnętrznych. Ostateczny kształt napiętej membrany jest więc wynikiem złożonego procesu projektowego. W uproszczeniu można podzielić go na kilka etapów^{87, 88}:

- wstępne określanie kształtu,
- tworzenie modelu obliczeniowego,
- poszukiwanie formy (*form finding*),
- analizę obciążeń,
- generowanie wykrojów,
- wykonanie szczegółowej dokumentacji.

Mimo że poszczególne etapy następują po sobie, to często pojawia się konieczność powtórzenia każdego z tych etapów, a nawet powrotu do wcześniejszego. Architekt określa kształt zadania na podstawie wymagań inwestora jak: obszar, który powinien być przekryty, wymaganą wysokość, pochylenie i kierunek spadku. Projekt przestrzennej formy powinien uwzględniać nie tylko wymogi estetyczne, ale też funkcjonalne i techniczne.

Drugi etap to przekształcenie trójwymiarowego kształtu, określonego przez architekta, na model obliczeniowy z uwzględnieniem wszystkich aspektów konstrukcyjnych.

Kolejny etap to poszukiwanie formy. Czynność ta nie występuje w żadnym innym rodzaju konstrukcji. Zwykle forma określona przez architekta poddawana jest analizie statyczno-wytrzymałościowej. Natomiast w przypadku

wszystkich rodzajów konstrukcji membranowych konieczne jest określenie położenia wewnętrznych punktów powłoki. Zakładana jest równowaga wewnętrznych sił powstałych w wyniku jedynie naprężenia wstępnego, a odpowiednio dobrany układ elementów podporowych określa miejsce przyłożenia tego naprężenia. Na tym etapie nie są uwzględniane jakiegokolwiek zewnętrzne obciążenia, czyli działanie wiatru i śniegu. Naprężenie wstępne wynika ze sposobu zamocowania membrany do elementów podporowych. Słowo zamocowanie w przypadku membrany należy rozumieć nie tylko, jako fizyczny sposób połączenia powłoki ze stelażem, ale jako miejsce, gdzie przyłożona jest siła powodująca napięcie membrany. Kiedyś proces poszukiwania kształtu polegał na budowaniu modelu fizycznego. Dzięki temu projektant miał możliwość prześledzenia wpływu napięcia membrany na wygięcie jej powierzchni. Chroniło to też przed próbą tworzenia formy, której fizycznie nie da się zrealizować i której kształt nie wynika z napięcia. Obecnie, przede wszystkim, używane są programy komputerowe, choć nadal zalecane jest budowanie modelu fizycznego. Angielski termin *form finding* stosowany jest coraz to częściej w projektowaniu architektonicznym jako etap wyboru przez projektanta formy generowanej komputerowo.

W kolejnym etapie procesu projektowego wykonywane są obliczenia polegające na sprawdzeniu, czy konstrukcja spełnia właściwe nor-

⁸⁷ Barry H.V. Topping, Peter Ivanyi, *Computer Aided Design of Cable Membrane Structures*, Saxe-Coburg Publications on Computational Engineering, 2008, p. 22.

⁸⁸ Javier Sánchez, Miguel Ángel Serna, Paz Morer, *A multi-step force-density method and surface-fitting approach for the preliminary shape design of tensile structures*, Engineering Structures 29, 2007, p. 1967.

my budowlane. Przede wszystkim oznacza to, że konstrukcja analizowana jest pod kątem obciążeń od śniegu i wiatru. Ciężar własny membrany jest tak mały, że może być pominięty. Dla porównania masa 1 m² membrany wynosi 0,70÷1,40 kg, natomiast obciążenia działające na tę samą powierzchnię wynoszą około 20÷60 kg od wiatru i 80÷130 kg od śniegu. Podane wartości są uproszczone i zależą do wielu współczynników, ale różnica wielkości jest widoczna. Sylwester Kobielałak i Edward Hutnik⁸⁹ podkreślają jak ważnym problemem tego typu konstrukcji jest nie tylko podparcie, ale zabezpieczenie ich przed poderwaniem przez wiatr.

Przedostatni etap to generowanie wykrojów. Ponieważ formy napiętych membran są powierzchniami nierozwijałymi, czyli takimi, których nie można uzyskać przez deformację płaskiego fragmentu tkaniny, więc konieczne jest uzyskanie odpowiedniego podziału powierzchni na mniejsze elementy, ale takie, które można wyciąć z pasa produkowanej tkaniny. Końcowym etapem jest przygotowanie dokumentacji wykonawczej z uwzględnieniem wszystkich szczegółów zamocowania, łączenia i montażu⁹⁰.

W poszczególnych etapach biorą udział architekt, konstruktor i wykonawca membrany. Na efekt końcowy wpływa: jakość współpracy pomiędzy nimi oraz to, na jakim etapie rozpocznie się ta współpraca. Wyspecjalizowane firmy zajmujące się wykonywaniem zadaszeń membranowych mają odpowiednie programy komputerowe, natomiast stojący na początku procesu projektowego architekt ma ograniczo-

ny dostęp do tego typu narzędzi. Potwierdzeniem jest artykuł z 2006 roku, wskazujący trudności w dostępie do odpowiednich narzędzi dla architekta⁹¹.

2.2. Metody analogowe – modele fizyczne

Materiał, z którego wykonana jest membrana jest wiotki, dlatego wszelkie zmiany obciążeń powodują wyraźne przemieszczenia poszczególnych części powłoki. Z kolei zmiana kształtu powoduje, że zmienia się konfiguracja sił wewnętrznych. Dlatego precyzyjne wyznaczenie kształtu i obliczenie naprężeń było kiedyś bardzo trudne, a czasami wręcz niemożliwe. Aby to rozwiązać, były i nadal są stosowane badania modelowe. W modelu fizycznym można zaobserwować jak zmienia się kształt w zależności od napięcia membrany. Ideałem jest to sytuacja, kiedy wewnętrzne siły są tej samej wielkości, wtedy konstrukcja podporowa jest najefektywniej wykorzystana. Stan takiej równowagi występuje w błonach mydlanych, które przyjmują formę powierzchni minimalnej. Dlatego projektanci powinni poszukiwać form zbliżonych do powierzchni minimalnych.

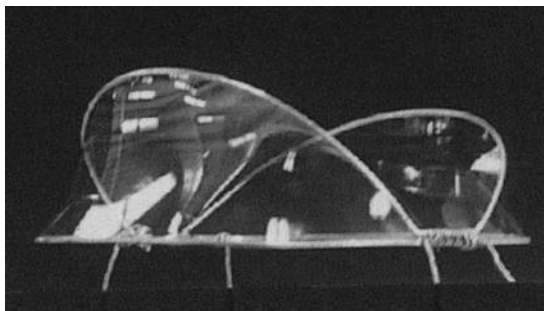
W laboratoriach Instytutu Lekkich Konstrukcji w Stuttgarcie Frei Otto ze swoimi współpracownikami wykonywali doświadczenia polegające na analizie kształtu poszczególnych błon mydlanych⁹². Niestety tego typu doświadczenia są trudne do uzyskania, a modele są wyjątkowo nietrwałe. Mimo to dokonywane były pomiary przez wykonywanie fotografii na

⁸⁹ Sylwester Kobielałak, Edward Hutnik, *Przekrycia stalowe dużych rozpiętości, cz. I*. Inżynier budownictwa 6/2014, s. 100-103.

⁹⁰ Philippe Véron, Jean-Claude Léon, Philippe Trompette, *Design of textile structures: methodology and data architecture*, Computers and structures 67, 1998, p. 309-317.

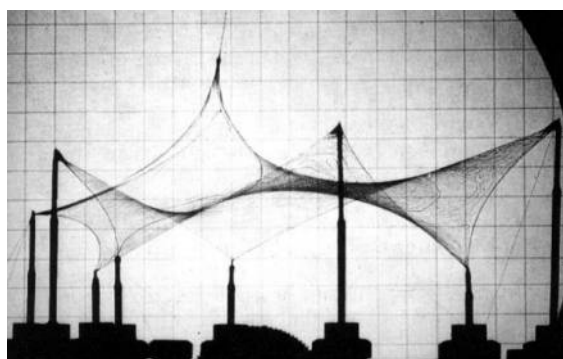
⁹¹ Javier Sánchez, Miguel Ángel Serna, Paz Morer, *op.cit.*

⁹² Siegfried Gass, *Form Kraft Masse 5 - Experimente*, II 25. Institut für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1990, p. 2.54-2.56.



Il. 3. Błona mydlana na ramce z drutu

tle ortogonalnej siatki lub na błonę rzutowane były pasy światła, które pozwalały określić krzywiznę błony w określonym miejscu. Modele z błonami mydlanymi były wykonywane na odpowiednio ukształtowanym drucie lub na zwilżonej nitce, która imitowała zachowanie ciągną brzegowego.

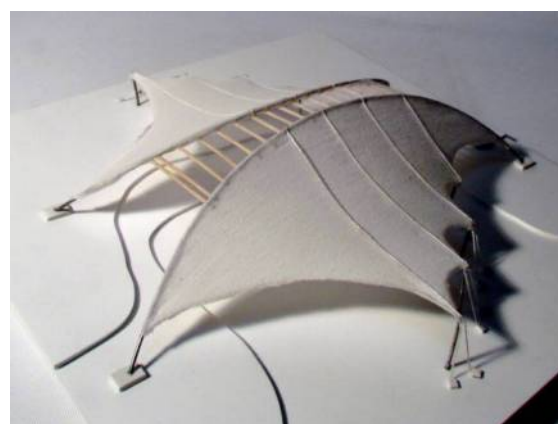


Il. 4. Błona mydlana na nitkach

Innym rozwiązaniem, bardziej trwałym, jest wykorzystanie modeli fizycznych wykonanych z elastycznego materiału. Różnica pomiędzy nimi polega przede wszystkim na właściwościach materiału, z którego wykonany jest model. Struktura błony mydlanej pozbawiona jest włókien i nie ma ograniczeń formowania, ponieważ ciecz tworząca błonę może swobodnie się przemieszczać. Jedynie napięcie powierzchniowe i lepkość płynu, z którego jest wykonana decydują o jej wymiarach i trwałości. Napięcie powierzchniowe dąży do tego, aby błona przyjmowała najmniejszą powierzchnię. Natomiast zwilżone elementy

brzegowe utrzymują ją w określonym miejscu przestrzeni. Niewielka grubość i ciężar błony nie mają minimalny wpływ na jej kształt, gdyż nie powodują wyraźnych ugięć. Przy braku obciążeń zewnętrznych błona mydlana dopasowuje swój kształt do stanu równowagi, który jest powierzchnią minimalną.

Niestety każdy materiał ma swoje ograniczenia, może wydłużać się w określonych granicach. Zależy to od rodzaju surowca, z którego wykonane są włókna tkaniny. Poza tym jego właściwości zależą od splotu, z jakiego jest zrobiony. Powoduje to, że wzdłuż włókien materiał ma inne właściwości niż skośnie do nich⁹³. Najczęściej materiał jest mniej rozciągliwy.



Il. 5. Fizyczny model membrany – praca studencka

Problemem modeli jest precyzja z jaką należy je wykonać, aby błędy pomiarowe nie ważyły na wynikach końcowych. Poza tym właściwości materiału, z którego jest wykonany model powinny być najbardziej zbliżone do oryginalnych, a zarazem proporcjonalne do skali. Błędy niedokładności i sztywności materiału powiększone do rozmiaru oryginalnego mogą prowadzić do błędnych wniosków. Największą dokładność można uzyskać przy dużej skali, ale wykonywanie prototypów w skali 1:1 jest zbyt kosztowne. Frei Otto modele swoich

⁹³ Wpływ kierunku na właściwości materiału nazywany jest anizotropią.

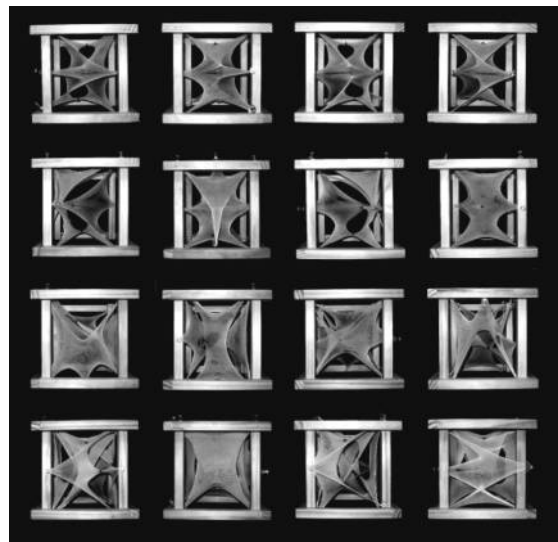
pierwszych realizacji wykonał w skali 1:25. Natomiast w przypadku projektu stadionu olimpijskiego w Monachium badania zostały przeprowadzone na modelu wykonanym w skali 1:125⁹⁴. Próbowano tam określić wymiary i położenie poszczególnych elementów sieci linowej. Aby nie dotykać modelu próbowano nawet wykorzystać metody fotogrametryczne⁹⁵. Mimo to różnice pomiarowe między modelem a realizacją były duże. Zwłaszcza, że niedokładności wynikające z nieprecyzyjnego przycinania lin doprowadziły do tego, że siły w niektórych cięgnach sieci różniły się aż o 60% względem przewidywanych. Ostatecznie zdecydowano się na opracowanie programu obliczeniowego opartego, jak to później zostało nazwane, na metodzie gęstości sił⁹⁶.



Il. 6. Model sieci linowej Stadionu Olimpijskiego w Monachium

Mimo tych problemów model fizyczny daje możliwość prześledzenia zachowania się membrany pod wpływem obciążeń. Przez zmianę położenia elementów podporowych można dokonać zmiany kształtu itp. Nie ma obawy, że zostanie przyjęta forma, której nie

można uzyskać w rzeczywistości. Wielu uznanych projektantów zadajeś membranowych, m.in. Horst Berger⁹⁷, radzi początkującym, aby swoje pierwsze doświadczenia przeprowadzili przez analizę zachowania kawałka elastycznej dzianiny⁹⁸.



Il. 7. Przykład badań modelowych

W zależności od potrzeb architekt może różnicować napięcie membrany w określonym kierunku, co powoduje, że powstała forma nie jest powierzchnią minimalną, a jedynie jest zbliżona do niej. Poza tym modele fizyczne są jak na razie najbardziej wiarygodne, jeśli chodzi o symulację zachowania membrany w konstrukcjach mobilnych, w których dochodzi do zmiany kształtu podczas zmiany położenia. W przypadku dachów składanych konieczne jest sprawdzenie jak zachowa się fałdowana powłoka, kiedy elementy ją podtrzymujące przesuwają się w określonym kierunku. Przykładem może być analiza zachowania mem-

⁹⁴ Wanda J. Lewis, *op.cit.* s. 29.

⁹⁵ Polegające na analizie kształtów i ich wzajemnego położenia na podstawie fotografii.

⁹⁶ Wanda J. Lewis, *op.cit.*

⁹⁷ Horst Berger, *Light structures - structures of light. The art and engineering of tensile architecture*, Birkhäuser Verlag, Basel 1996, p. 45.

⁹⁸ Dżianina to materiał, który wykonywany jest przez łączenie oczek powstałych z nitek, w odróżnieniu od tkaniny, która powstaje z przeplatania wyprostowanych nitek. Dzięki temu ma większą elastyczność i to we wszystkich kierunkach.

brany części ruchomej zadaszenia stadionu BC Place w Vancouver przedstawiona przez Karen Lynch⁹⁹.

Mimo że modelowanie komputerowe jest coraz bardziej powszechne, to nadal stosowana jest analiza modeli fizycznych. Dzięki technice druku 3D możliwe jest fizyczne wykonanie wirtualnego modelu. Przykładem może być opracowanie dla Anish Kapoor modelu instalacji Marsyas¹⁰⁰. Model fizyczny pozwala na lepsze prześledzenie formy. Niestety wielkość modelu w niektórych przypadkach ma ograniczenia, nie można wejść do środka, a wizualizacje nie pokazują wszystkiego. Jeden z projektantów, stylistów samochodowych twierdzi, że na ekranie widzi około 40% tego, co na modelu, dlatego w projektach nadal stosowane są techniki tradycyjne¹⁰¹.

Wydaje się, że kiedyś konstruktor więcej współpracował z wykonawcą, a teraz współpraca konstruktora przeniosła się w kierunku architekta. To on pomaga w poszukiwaniu metod odnalezienia właściwej formy. Poza tym w niektórych przypadkach proces projektowania rozpoczyna się od modelu fizycznego, czasami nawet od analizy organizmu biologicznego. Dzięki digitalizacji, skanowaniu przestrzennemu formę fizyczną można zamienić na model cyfrowy.

Wykorzystanie modeli fizycznych zrobionych z nitek jest wyjątkowo ważnym elementem w dydaktyce na studiach architektonicznych. Hilka Rogers¹⁰² podkreśla, że studenci w szczególny sposób są pobudzani do rozwoju i analizy „przepływu sił”.

2.3. Metody cyfrowe

Od czasu opracowania pierwszych procedur obliczeniowych dotyczących poszukiwania kształtu minęło już kilkadziesiąt lat. Programy komputerowe, które są obecnie stosowane, pozwalają na dynamiczne symulowanie zmian kształtu napiętej membrany. Określone są przemieszczenia powłoki, lin i pozostałych elementów konstrukcji podporowej pod wpływem obciążeń. Natomiast architekt potrzebuje narzędzi, który przede wszystkim ułatwią mu wstępne określenie kształtu, aby wybrać formę, która może być później zrealizowana. Niestety nie zawsze ma dostęp do właściwego oprogramowania¹⁰³.

Programy, które wyznaczają kształt napiętej membrany korzystają z zależności matematycznych i fizycznych, jakie są przypisane do materiału powłoki oraz poszczególnych elementów podporowych. Jednym z podstawowych praw kształtujących membranę jest to, że jest wiotka, czyli nie ma wewnętrznej sztywności. Membrana nie może przenosić sił ani ściskających, ani zginających, a jedynie siły rozciągające, tak jak błona mydlana. Wielkości sił ani wewnętrznych zależą nie tylko od wymiarów i zewnętrznych obciążeń, ale w przypadku membrany zależą też od jej kształtu. Niewielka jego zmiana powoduje natychmiastową zmianę konfiguracji tych sił, dlatego na etapie poszukiwania kształtu pomijane są obciążenia zewnętrzne, a jedynie brane są pod uwagę siły wynikające z naprężenia wstępnego.

Teoretycznie zasady kształtowania nie różnią się od innych rodzajów konstrukcji. Każdy

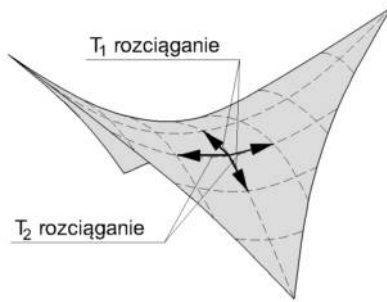
⁹⁹ Karen Allen Lynch, *The Renew BC Place in Vancouver, BC, Canada*. Proceedings, IASS Symposium 2013, published by the IASS, Wrocław 2013, p. 92.

¹⁰⁰ Michael Hensel, Achim Menges, Michael Weinstock, *Engineering Design: Working with Advanced Geometries*, [in:] *Emergence: Morphogenetic Design Strategies*, Architectural Design, vol. 74, No. 3, 2004, p. 64-71.

¹⁰¹ *Ibidem*.

¹⁰² Hilka Rogers, *Projektować z modelami cięgnowymi*. Architektura i Biznes 10/1998, s. 30-33.

¹⁰³ Javier Sánchez, Miguel Ángel Serna, Paz Morer, *op.cit.*, p. 1967.



II. 8. Siły wewnętrzne w membranie

punkt membrany, czyli każdy węzeł teoretycznej sieci obliczeniowej musi być w równowadze. Niestety, aby wyznaczyć kształt początkowy danej membrany, a tym bardziej, żeby sprawdzić jak zachowa się pod wpływem obciążeń, konieczne jest wykorzystanie zależności nieliniowych metodą elementów skończonych. Dla architekta bardziej istotna jest wiedza dotycząca zależności, jaka występuje pomiędzy siłami a kształtem samej membrany. Wartości sił wewnętrznych powodujących rozciąganie związane są z promieniami krzywizn głównych powierzchni. Wyrażone to jest wzorem:¹⁰⁴

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} = F, \quad (2)$$

F – siła zewnętrzna działająca na membranę, np. ciśnienie powietrza w konstrukcjach pneumatycznych lub obciążenie od śniegu,

T_1, T_2 – siły wewnętrzne działające wzdłuż osnowy i wątku,

R_1, R_2 – główne promienie krzywizny.

Jeśli założymy, że membrana nie jest obciążona siłami zewnętrznymi tylko naprężeniem wstępnym, czyli pominięte jest obciążenie wiatrem, śniegiem, a tym bardziej stałym wewnętrznym ciśnieniem powietrza, to:

$$F = 0 \quad (3)$$

Założenie to jest słuszne podczas wstępnego procesu poszukiwania kształtu. Uzyskiwana jest wtedy powierzchnia zbliżona do minimalnej, podobnie jak w błonie mydlanej.

Po przekształceniu uzyskuje się równanie:

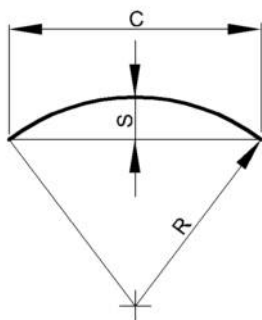
$$\frac{T_1}{T_2} = -\frac{R_1}{R_2}, \quad (4)$$

z którego wynika, że wzrost siły w jednym kierunku, np. 10-krotny, pociąga za sobą taki sam wzrost promienia krzywizny. Można stwierdzić, że 10-krotnie prostuje się membrana w określonym kierunku. Poza tym stosunek sił rozciągających w membranie można porównać do wskaźnika napięcia osnowy do wątku. Chodzi tu o proporcje sił, jakie występują w prostopadłych włóknach tkaniny, czyli osnowie i wątku. Znak ujemny wynika z tego, że promienie krzywizn znajdują się po przeciwnych stronach powierzchni, tak jak to jest w powierzchni antyklastycznej.

W przypadku powierzchni minimalnych wskaźnik wynosi 1. Jest to stan idealny, kiedy siły wewnętrzne są w równowadze i równe sobie. W praktyce często w jednym kierunku stosowane jest napięcie większe niż w kierunku prostopadłym do niego. Najczęściej różnica ta wynika z potrzeby architektonicznej, tj. nadania powłóce bardziej atrakcyjnego kształtu. Różnica napięcia uzyskiwana jest za pomocą doboru wielkości sił wewnętrznych. Zbyt duża powoduje, że powierzchnia jest bardzo wyprostowana w jednym kierunku i przestaje być powierzchnią o podwójnej krzywiznie. Może to prowadzić do powstawania fałd na tkaninie lub większych przemieszczeń przy podmuchach wiatru.

¹⁰⁴ Barry H.V. Topping, Peter Ivanyi, *op.cit.*

¹⁰⁵ Craig G. Huntington, *Tensile Fabric Structures: Design, Analysis, and Construction*. American Society of Civil Engineers, 2013, p. 66-69.



Il. 9. Promień, cięciwa i strzałka łuku

Wśród różnych opracowań dotyczących zasad kształtowania membran można znaleźć ciekawe uproszczenia. Craig G. Huntington¹⁰⁵ zaproponował sposób pominięcia skomplikowanych obliczeń polegający na sprawdzeniu możliwości wykonania danej formy przez analizę ukształtowania powłoki. Aby wyznaczyć krzywiznę powierzchni, w kilku istotnych miejscach w uproszczeniu można określić promienie łuków kołowych na określonej długości. Promień łuku można obliczyć na podstawie poniższego wzoru, gdzie znana są rozpiętość i strzałka łuku. Można go zastosować zarówno dla dowolnych punktów membrany, jaki i krawędzi brzegowych¹⁰⁶.

$$R = \frac{C^2 + 4S^2}{8S}, \quad (5)$$

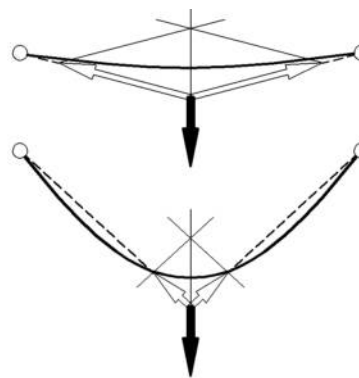
R – promień łuku,

C – długość cięciwy łuku,

S – strzałka łuku.

Niektórzy projektanci stosują orientacyjne proporcje strzałki do rozpiętości łuku. Pozwala to na porównanie wygięcia danej krawędzi lub powierzchni. Najczęściej jest to przedstawiane w postaci ułamka, np. $1/8 \div 1/20$.

Schemat zamieszczony na il. 10 wyjaśnia, dlaczego krzywizna powierzchni jest tak istotna. Przedstawione dwa cięgna mają podobną rozpiętość i obciążone są tą samą siłą. Cięgna



Il. 10. Wpływ kształtu pojedynczego cięgna na wielkość sił wewnętrznych

te mają różną długość albo inaczej – jedno jest bardziej wyprostowane, a drugie ma większy zwis. Aby zrównoważyć to samo obciążenie, cięgno wyprostowane musi przenieść dużo większe siły wewnętrzne niż cięgno mocniej wygięte. Ze schematu wynika, że w górnym przypadku siły wewnętrzne są nawet większe od obciążenia.

Programy komputerowe, które służą poszukiwaniu form napiętej membrany wykorzystują metodę elementów skończonych i uwzględniają geometryczną nieliniowość materiału. Pozwala to na symulowanie zachowania tego typu powłok pod wpływem obciążenia. Dana powierzchnia w modelu obliczeniowym dzielona jest na określoną liczbę mniejszych geometrycznych elementów, co nazywane jest procesem dyskretyzacji. Następnie przypisywane są parametry związane z właściwościami materiału i naprężeniem wstępnym. Dalej określane jest położenie wszystkich punktów stałych, czyli miejsc, w których membrana jest mocowana do konstrukcji. Definiowane są też parametry wiotkich elementów brzegowych, których kształt, podobnie jak membrany, zależy od wartości obciążeń działających na nie. Na tej podstawie obliczane jest położenie teoretycznych punktów – węzłów wirtualnej sieci.

¹⁰⁶ Igor N. Bronszejn, Konstantin A. Siemiendajew, *op.cit.*, s. 215.

Do poszukiwania tej formy (*form finding*) stosowane są dwie metody obliczeniowe^{107, 108}:

- gęstości sił,
- dynamicznej relaksacji.

W obu położenie punktów powierzchni uzyskiwane jest metodą wielokrotnego powtarzania matematycznych procedur. Metoda gęstości sił powstała dla obliczania sieci linowych. Położenie teoretycznych węzłów uzależnione jest od wektorów sił działających w poszczególnych cięgnach. Ponieważ odległości pomiędzy linami mają wpływ na formę napiętej sieci, więc nazwa „gęstości sił”. Metoda ta została adaptowana do określania form napiętych membran. Natomiast metoda dynamicznej relaksacji polega na założeniu, że poszczególne części membrany przemieszczają się, drgają. Wychylenie elementarnej części membrany od stanu równowagi powoduje, że wzrasta energia potencjalna wynikająca z napięcia membrany. Powrót w przeciwną stronę powoduje wzrost prędkości i energii kinetycznej. Stosując współczynniki tłumiące, można odnaleźć położenie, w którym energia jest najmniejsza i drgania ustają, stąd nazwa „dynamicznej relaksacji”¹⁰⁹.

Programy komputerowe są również niezbędne na etapie generowania wykrojów. Forma napiętej membrany jest powierzchnią nierozwijałą, czyli taką, której nie można uzyskać przez deformację płaskiego fragmentu tkaniny. Konieczne jest uzyskanie podziału powierzch-

ni na mniejsze fragmenty, które można wyciąć z płaskiego pasa produkowanej tkaniny. Wiąże się to z zaprojektowaniem układu szwów na powłoce, z jednoczesnym ograniczeniem strat materiału. Ideałem jest, kiedy linie szwów są zbliżone do prostych i mają jak najmniejszą krzywiznę. Polega to na wyznaczaniu linii geodezyjnych¹¹⁰ na powierzchni powłoki. Linie te, w uproszczeniu, są najkrótszą drogą łączą punkty leżące na danej powierzchni. Określony układ szwów pozwala na wyznaczenie wykrojów, czyli płaskich wzorców do cięcia tkaniny. Trudnym elementem tego etapu jest umiejętność określenia wydłużenia tkaniny pod wpływem obciążeń. Końcowa forma membrany jest naprężona, bryty¹¹¹ w tkaninie wycinanego materiału zaś nie są naprężone.

Krzyszyna Januszkiewicz¹¹² przedstawia jak zmienia się projektowanie architektoniczne dzięki wprowadzeniu programów komputerowych. Architektowi nie są potrzebne programy do szczegółowych obliczeń wytrzymałościowych, ale przede wszystkim takie, które pozwolą mu na modelowanie form, w tym przypadku napiętej membrany. Typowe programy używane w projektowaniu architektonicznym pozbawione są procedur służących modelowaniu powierzchni zbliżonych do minimalnych. Braki te uzupełniają aplikacje rozszerzające możliwości programu. Przykładem jest Soap Skin & Bubble do programu Sketchup. Innymi przykładami są Tensile Draw firmy Mehler dla

¹⁰⁷ Wanda J. Lewis, *op.cit.*, s. 41.

¹⁰⁸ David S. Wakefield, *Engineering analysis of tension structures, theory and practice*. Engineering structures 21/1999, p. 680-690.

¹⁰⁹ Linia geodezyjna – linia na powierzchni łącząca dwa niezbyt odległe punkty po najkrótszej drodze, *Wielka encyklopedia powszechna, op.cit.*, t. 4, s. 174.

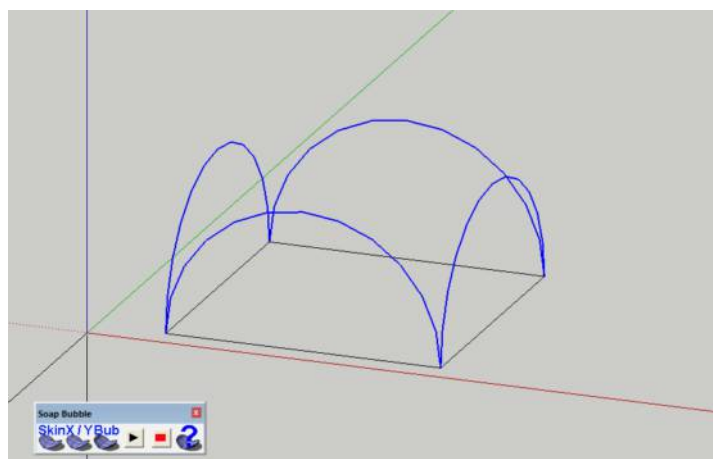
¹¹⁰ Wanda J. Lewis, *op.cit.*, s. 63.

¹¹¹ Bryt – 1) pas płótna żaglowego, z wielu brytów zszyte są żagle, w żaglach trapezowych i prostokątnych bryty biegną zwykle prostopadle do górnego liku żagla, w trójkątnych i czworokątnych skośnych zwykle równoległe lub prostopadle do liku wolnego, 2) w krawiectwie damskim i dziecięcym pas lub klin tkaniny w kształcie trapezu lub trójkąta, bryty są wszywane w spódnice, płaszcze itp., *Wielka encyklopedia powszechna, op.cit.*

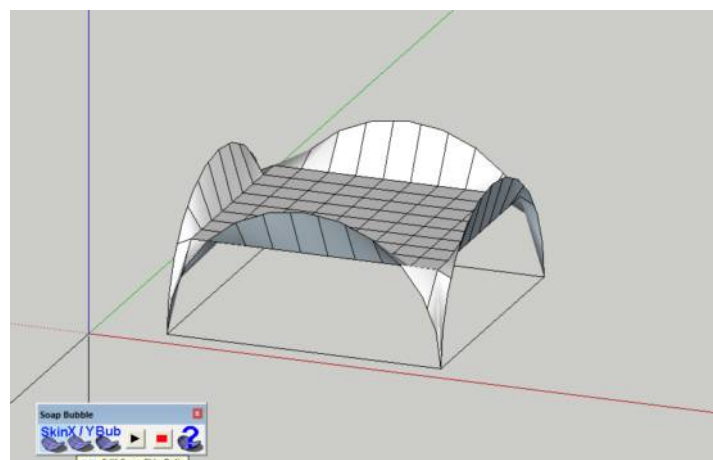
¹¹² Krzyszyna Januszkiewicz, *O projektowaniu architektury w dobie narzędzi cyfrowych – stan aktualny i perspektywy rozwoju*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.

programu AutoCAD oraz bardziej złożona aplikacja Rhino Membrane dla programu Grasshopper. Dzięki przygotowanym procedurom możliwe jest uzyskanie powierzchni określonej elementami brzegowymi, np. wybierane są krawędzie zamkniętego wielokąta, a program tworzy powierzchnię zbliżoną do minimalnej. Zmieniając parametry, np. wskaźnik napięcia, w kierunku osnowy do napięcia w kierunku wątku, można zmieniać krzywizny powierzchni. Wszystko odbywa się przy założeniu, że na membranę działa jedynie

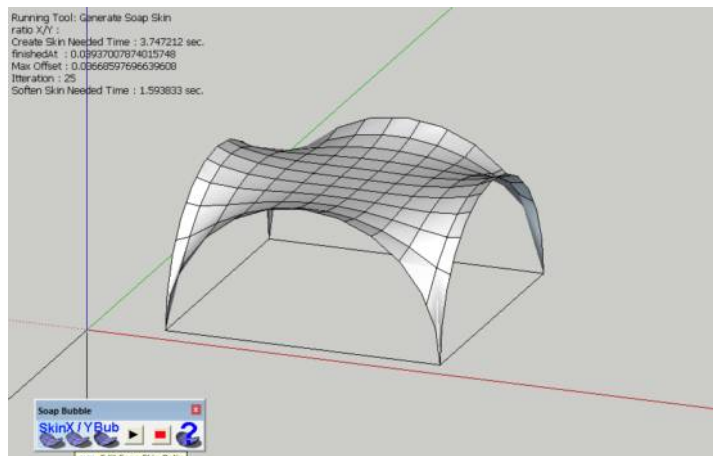
napięcie wstępne lub wewnętrzne ciśnienie powietrza. Bardziej precyzyjne określenie kształtu z uwzględnieniem zróżnicowanych naprężeń występujących w cięgnach brzegowych i symulacją obciążeń zewnętrznych można uzyskać za pomocą programów, które obsługiwane są przez przeszkolonych konstruktorów. Wystarczy odpowiednio wcześniej nawiązana współpraca, już na etapie wstępnej koncepcji, i większość ewentualnych problemów zostaje pominięta.



Il. 11. Modelowanie membrany – etap definiowania elementów brzegowych



Il. 12. Modelowanie membrany – etap definiowania sieci węzłów



Il. 13. Modelowanie membrany – etap poszukiwania położenia węzłów (*formfinding*)

3. ROZWÓJ STRUKTUR MEMBRANOWYCH W ARCHITEKTURZE

3.1. Początki

Zadaszenia wykorzystujące elementy wiotkie i elastyczne powstawały od zarania ludzkości. Najprostsze szalasy pokrywane były zwierzęcymi skórami lub plecionymi matami. Niestety materiały te nie były tak trwałe jak budowle wykonane z kamienia, dlatego do dnia dzisiejszego zachowało się tak mało przykładów owych budowli. Natomiast grupy ludzi prowadzące koczowniczy tryb życia do czasów współczesnych wykorzystują namioty dla ochrony przed warunkami atmosferycznymi. Konstrukcje tych budowli były i są związane z tradycją, kulturą oraz materiałami, jakie dostępne są w danym regionie. O tym pisali Philip Drew¹¹³, Romuald Tarczewski¹¹⁴ i Oskar Büttner ze Stanisławem Karczmarczykiem¹¹⁵. Namioty wykorzystywane też były do organizowania tymczasowych miejsc wypoczynku przez wojsko (Bernd Baier¹¹⁶, Horst Berger¹¹⁷, Berthold Burkhardt¹¹⁸).

W kulturze wywodzącej się z judaizmu, a przejętej przez chrześcijaństwo, namiot nazywany

Namiotem Spotkania był miejscem przechowywania Arki Przymierza. Było to najświętsze miejsce podczas wędrówki Izraelitów do Ziemi Obiecanej, dlatego między innymi w architekturze sakralnej wykorzystywane były elementy dekoracyjne nawiązujące do zadaszeń wykonanych z tkaniny¹¹⁹. Pewną reminiscencją Namiotu Spotkania są baldachimy wykonywane nad ołtarzem lub amboną. Do tych symboli wielokrotnie nawiązywały formy zadaszeń nad ołtarzami podczas pielgrzymek papieskich, co zostało opisane przez autora¹²⁰ w 2002 roku.

Słowo namiot wiąże się przede wszystkim z tymczasowym zadaszeniem, składanym i transportowanym w inne miejsce. Współczesne namioty mają wyrafinowane konstrukcje, wykonywane z najlepszych materiałów, pozwalają także na szybki montaż. Dla ułatwienia transportu mają możliwie najmniejszy ciężar i małe wymiary. Podstawową częścią każdego namiotu jest zawsze napięta tkanina, która spełnia rolę osłony przed warunkami

¹¹³ Philip Drew, *Tensile architecture*, Granada Publishing Limited, London 1979, p. 1-120.

¹¹⁴ Romuald Tarczewski, *Morphological similarities of primeval tents and contemporary tensile surface structures*. Local Seminar of IASS Polish Chapter Lightweight Structures in Civil Engineering. Wydaw. Nauk. Micro-Publ. J.B. Obrębski, Częstochowa 2004, s. 225-230.

¹¹⁵ Oskar Büttner, Stanisław Karczmarczyk, *Membrany jako konstrukcje przekryć powierzchniowych o stabilnym kształcie*, [w:] *Problemy projektowe w kontekście nowych technologii budowlanych*, V Konferencja Naukowo-Techniczna, Kraków, 24 października 2003, s. 33-46.

¹¹⁶ Bernd Baier, Stefan Meyer-Miethke, *Anpassungsfähig Bauen Adaptable Architecture, IL 14*, Institut für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1975.

¹¹⁷ Horst Berger, *Light structures - structures of light. The art and engineering of tensile architecture*, Birkhäuser Verlag, Basel 1996, p. 21-26.

¹¹⁸ Berthold Burkhardt, Frei Otto, Ilse Schmall, *Zelte Tents, IL 16*. Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1976.

¹¹⁹ Krzysztof Gerlic, *Tent as a symbol of traditional roofing form*, [in:] *The signs of tradition in architecture*, Oficyna Wydawnicza Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej, Nysa 2008, s. 55-61.

¹²⁰ Krzysztof Gerlic, *Przekrycia z tkanin na przykładzie ołtarzy papieskich*, [w:] *Budownictwo Sakralne i Monumentalne*, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 2002, s. 115-121.

atmosferycznymi (Robert Kronenburg¹²¹, Berthold Burkhardt¹²²).

Najstarsze zadaszenia wykonane z tkaniny, a związane z budynkami stosowane były w starożytnych amfiteatrach dla osłony widzów przed intensywnym promieniowaniem słonecznym. Nazywane były *velarium*. Do dnia dzisiejszego zachowały się jedynie ryciny przedstawiające przykłady tych zadaszeń oraz ich opisy. Na podstawie otworów w kamiennych konstrukcjach można określić miejsca, gdzie umieszczone były słupy. Do nich mocowane były liny, które stanowiły konstrukcję nośną zadaszenia. Poniżej lin rozwieszane były prostokątne pasy tkaniny z naturalnych włókien. Zadaszenia te były rozpinane w miarę potrzeb, dla ochrony widzów¹²³.

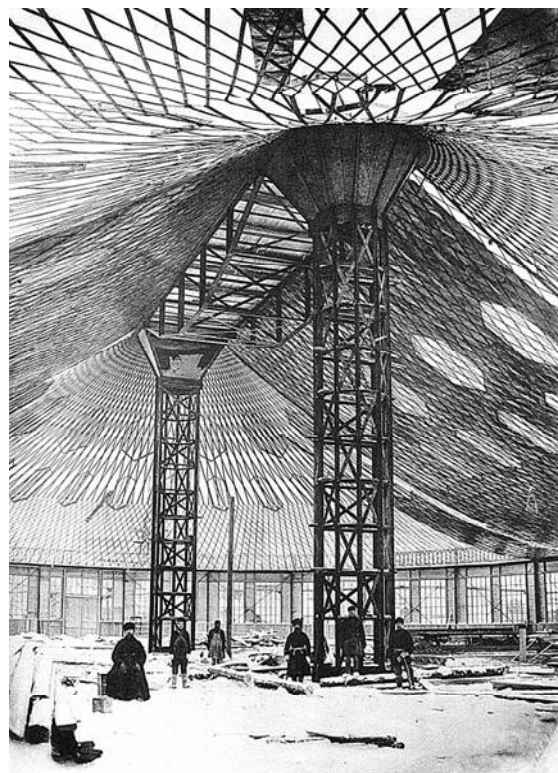


Il. 14. Namiot cyrkowy

Zanim powstały naukowe zasady formowania zadaszeń membranowych stawiane były duże namioty cyrkowe. Potrzebne były dla przygotowania miejsca występów i ochrony widowni. Konstrukcje te były tworzone na podstawie

wcześniejszych doświadczeń z mniejszymi obiektami. Stosowane wtedy materiały to stosunkowo ciężka podgumowana tkanina nazywana brezentem oraz stalowe skręcane liny.

Pierwszym zrealizowanym przykładem nowoczesnego zadaszenia były hale wystawowe zaprojektowane przez Władimira Szuchowa. Obiekty powstały w Niżnym Nowgorodzie na wystawę w 1896 roku. Te śmiałe budowle wyraźnie wyprzedzały epokę. Konstrukcja każdego zadaszenia była siatką ścięgową o podwójnej krzywiznie i rozpiętości dochodzącej do 40 m^{124, 125}. Miały formę namiotów podpartych wewnętrznymi słupami, a wykonane były ze stalowych płaskowników.



Il. 15. Hala wystawowa Władimira Szuchowa

¹²¹ Robert Kronenburg, *Portable Architecture*. Architectural Press, Oxford 2003.

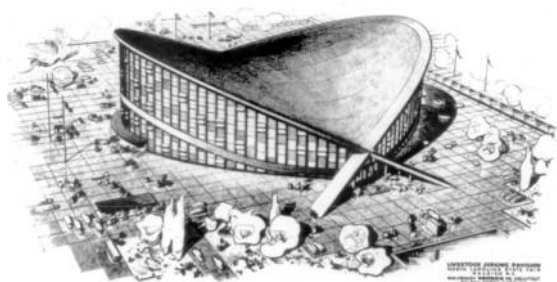
¹²² Berthold Burkhardt, Uta Pankoke, *Wandelbare Dächer Convertible roofs*, IL 5, Institut für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1972.

¹²³ Horst Berger, *Light structures - structures of light. The art and engineering of tensile architecture*, Birkhäuser Verlag, Basel 1996, p. 21-26.

¹²⁴ Frei Otto, *Dachy wiszące, op.cit.*

¹²⁵ Frei Otto, *Tensile Structures, op.cit.*

Idea wykorzystania rozciąganych lin do budowy wiszących dachów pojawiła się u Macieja Nowickiego już w latach 40. Natomiast zrealizowana została dopiero w 1952 roku w hali w Raleigh (Stany Zjednoczone). Autorami projektu byli William Deitrick i Maciej Nowicki, a konstrukcję zaprojektował Fred Severud. Niestety tragiczna śmierć polskiego architekta nie pozwoliła mu zobaczyć ukończonego dzieła. Układ nośny był oparty na ukośnie położonych dwóch, parabolicznych łukach i rozpiętej pomiędzy nimi sieci linowej. Pokrycie zostało wykonane z blachy trapezowej przymocowanej do lin. Ciężna utrzymująca ciężar dachu były rozpięte między łukami,



Il. 16. Hala w Raleigh Nowickiego

a ciężna prostopadle do nich umieszczone wprowadzały naprężenie wstępne i zabezpieczały przed poderwaniem dachu przez wiatr. Dzięki temu uzyskana została dwukrzywiznowa powierzchnia ograniczona łukami. Forma ta stała się ikoną nowoczesnych konstrukcji i była wzorem dla wielu kolejnych realizacji. Najszybszy rozwój napiętych konstrukcji powierzchniowych rozpoczął się po II wojnie światowej, kiedy to dzięki działalności Freia Otto powstały naukowe zasady ich kształtowania. Podczas studiów miał on okazję przebywać w Stanach Zjednoczonych i zapoznać się z działalnością znanych architektów. Między innymi, w 1950 roku w pracowni Freda Seve-

ruda widział rysunki Areny w Raleigh opracowane przez Macieja Nowickiego. Otto zobaczył, że projekt realizował jego podobne pomysły, jak budować z użyciem minimalnej ilości materiału¹²⁶. Jego praca naukowa zainteresowała jednego z największych producentów namiotów, Petera Stromejera, z którym po studiach rozpoczął działalność projektową. Publikacje dotyczące dachów wiszących, a przede wszystkim ciekawe realizacje są kamieniem węgielnym dla nowych sposobów kształtowania struktur przestrzennych. Frei Otto przede wszystkim analizował konstrukcje przestrzennie. Sprzeciwiał się upraszczaniu ich do dwuwymiarowych planów i przekrojów.



Il. 17. Zadaszenie dla orkiestry w Kassel

Wiedział, że stosownie form przestrzennych daje dużo większe korzyści. Poza tym wykorzystanie rozciąganej błony jest zgodne z jej naturą. Otto, podobnie jak Antonio Gaudi, wykorzystywał modele fizyczne do określania kształtu wynikającego z równowagi sił wewnętrznych. Modele wykonane z linek pozwalały mu na porównania do sieci pajęczych, a wykorzystanie błony mydlanej służyło do analizy form opartych na powierzchniach minimalnych.

Pierwszymi realizacjami Freia Otto były zadaszenia wykonane na wystawę ogrodniczą Bu-Ga (*Bundesgartenschau*) w Kassel (Niemcy) w 1955 roku. Jedno z zadaszeń miało formę

¹²⁶ Gunnar Tibert, *Numerical Analyses of Cable Roof Structures*, Royal Institute of Technology, Department of Structural Engineering, Stockholm 1999, p. 5-6.

opartą na czworoboku z wierzchołkami położonymi na przemian – wysoko i nisko. Wymiary tego zadaszenia wynosiły 12×12 m. Ta delikatna wygięta forma przypominała żagiel lub motyla z rozłożonymi skrzydłami. Kolejne, bardziej złożone zadaszenia powstały na wystawę w Kolonii w 1957 roku. Największe przeznaczone było jako osłona nad estradą do tańca¹²⁷. Miało kształt oparty na dwunastokacie foremnym o zewnętrznej średnicy 31 m i wysokości dochodzącej do 10 m. Zewnętrzne wierzchołki położone były na przemian, wysoko i nisko, a na środku znajdował się okrągły otwór o średnicy około 6 m. Poszczególne płaty miały kształt zbliżony do wcześniej przedstawionego zadaszenia. Były to formy zbliżone do paraboloidy hiperbolicznej, choć uzyskane były z napiętej tkaniny.



Il. 18. Zadaszenie estrady do tańca w Kolonii

W tym samym czasie na Międzynarodowych Targach w Izmirze (Turcja) powstał polski pawilon zaprojektowany przez Oskara Hansena i Lecha Tomaszewskiego. Nazwano go, od nazwisk projektantów, strukturą HT¹²⁸. Zadaszenie składało się z modułów opartych na przestrzennych czworobokach. Wzdłuż krawędzi bocznych znajdowały się lekkie kratownicowe dźwigary, które podtrzymywały wysoko położone narożniki. Charakterystyczne dla



Il. 19. Pawilon Polski na Międzynarodowych Targach w Izmirze

tych zadaszeń było to, że napięta tkanina miała wyraźny, graficzny układ. Jasne i ciemne pasy tkaniny łączone były równolegle do krawędzi brzegowych, co podkreślało ich prostokreślność tak, jak paraboloidy hiperbolicznej. Podobną strukturę zaprojektował Oskar Hansen na Expo w Sao Paulo (Brazylia) w 1958 roku, o czym wspominał Frei Otto w swojej publikacji¹²⁹. Grafika zadaszeń Oskara Hansena podkreślała prostokreślność powierzchni, natomiast układy szwów Freia Otto przebiegały po głównych krzywiznach powierzchni. Dzieliły membranę na pasy równoległe do przekątnej, łączącej niskie narożniki zadaszenia. Taki układ jest zgodny z przebiegiem sił rozciągających daną powłokę, a zarazem dopasowaniem nitek tkaniny do kierunku obciążeń.

Stosowane wtedy tkaniny techniczne pozwalały jedynie na stawianie budowli tymczasowych i o mniejszych wymiarach. Jedynie sieci linowe pozwalały na tworzenie stałych zadaszeń i większych rozpiętościach. Na Expo w Brukseli w 1958 roku postawiony został pawilon francuski. Projektantami byli Guillaume Gillet i René Sarger. Konstrukcja dachu składała się

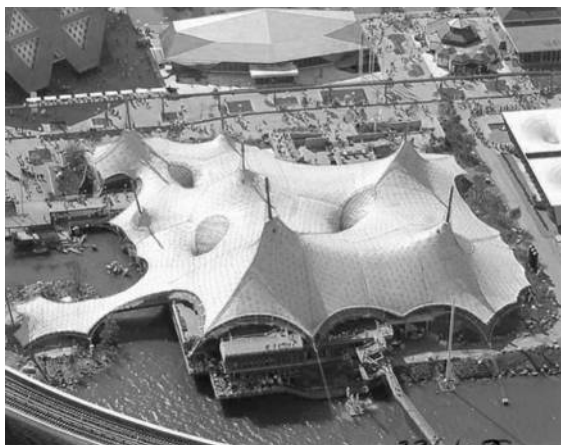
¹²⁷ Ludwig Gleaser, *The work of Frei Otto and his teams 1955-1976. IL 17*. Institute of Lightweight Structures, Stuttgart 1978, p. 15.

¹²⁸ Oskar Hansen. *Architektura i Biznes* 10/2003.

¹²⁹ Frei Otto, *Dachy wiszące, op.cit.* s. 71-72, 167-170.

z dwóch, połączonych płatów sieci linowych o wymiarach prawie 100 m każdy. Sieci linowe rozpięte były na przestrzennych czworokątach z przekątnie biegnącymi cięgnami.

Na tę samą wystawę powstał słynny Pawilon Philipsa zaprojektowany przez Le Corbusiera i Iannisa Xenakisa. Le Corbusier już wcześniej miał doświadczenie z projektowaniem „namiotu”. W 1937 roku zaprojektował pawilon Nowego Czasu (Pavilion des Temps Nouveau)¹³⁰. Jego forma była bardzo prosta, prawie ortogonalna. Natomiast w Pawilonie Philipsa forma składała się z połączonych płatów paraboloidy hiperbolicznej. Konstrukcja pawilonu została wykonana z prefabrykowanych segmentów betonowych. Prostokreślność powierzchni została podkreślona przez cięgna, które dociskały do siebie prefabrykaty. Były to czasy, kiedy geometria paraboloidy hiperbolicznej była inspiracją dla wielu architektów. Wtedy też w Meksyku swoje żelbetowe powłoki realizował Felix Candela.



Il. 20. Pawilon niemiecki w Montrealu

Kolejnymi ważnymi realizacjami Freia Otto były pawilony na wystawie w Lozannie w 1964 roku oraz najsłynniejsze dzieło – pawi-

lon niemiecki na wystawie Expo w Montrealu w 1967 roku. Doświadczenie w projektowaniu i realizacji sieci linowych Otto nabył przy eksperymentalnej sieci w Stuttgarcie, która później została siedzibą Instytutu Lekkich Konstrukcji¹³¹.



Il. 21. Zadaszenie stadionu olimpijskiego w Monachium

Po sukcesie pawilonu w Montrealu, Frei Otto został zaproszony do współpracy z Günтером Behnischem przy projekcie kompleksu olimpijskiego w Monachium na olimpiadę w 1972 roku. Zadaszenie obejmowało większą część trybun stadionu olimpijskiego, halę sportową i basen oraz przejścia pomiędzy nimi. Zdecydowano się na realizację tak nietypowego pomysłu, ponieważ przypominał napiętą sieć pajęczą opartą na słupach ustawionych za widownią. Jako pokrycie zastosowano panele z akrylu o grubości 4 mm, dzięki temu maksymalnie wykorzystano światło dzienne do doświetlenia trybun. Stalowa sieć linowa o oczkach 75×75 cm podtrzymywana była przez 58 słupów¹³². Całość składał się prawie z 20 segmentów sieci linowej o wymiarach przekraczających 60 m. Projekt takiej sieci był nie lada wyzwaniem. Konieczne było opracowanie nie tylko samej formy, ale przede

¹³⁰ Samuel Flora, *Le Corbusier in Detail*. Architectural Press, Elsevier, Amsterdam 2007, p. 27.

¹³¹ Bernd Baier, Stefan Meyer-Miethke, *Anpassungsfähig Bauen, Adaptable Architecture. IL 14*. Institut für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1975, p. 13.

¹³² Prem Krishna, *Cable - Suspended Roofs*. McGraw-Hill Book Company, New York 1978.

wszystkim metody oceny konstrukcji, zapewnienia jej bezpieczeństwa. Nie było wcześniej odpowiednich narzędzi. To wtedy rozpoczęto opracowywać programy komputerowe, które pozwalają na określenie sił wewnętrznych¹³³.

W Polsce w tym czasie powstawały zadaszenia tymczasowe, stawiane na okres letni. Przykładami są: kawiarnia letnia przy ulicy Heweliusza w Gdańsku, pawilon rozrywkowo-taneczny „Non Stop” w Sopocie, kawiarnia letnia przy Akademickim Ośrodku Sportowym Politechniki Gdańskiej we Wrzeszczu oraz największe zadaszenie z ruchomym pokryciem nad Operą Leśną w Sopocie¹³⁴. Nieco później powstało niewiele mniejsze zadaszenie amfiteatru w Połczynie Zdrój. Po początkowych problemach i częściowym zniszczeniu pokrycia Opery Leśnej w Sopocie konieczne było skorygowanie kształtu powłoki. Wprowadzono dodatkowe punkty kotwiące bez zmiany położenia głównych słupów podporowych, co zwiększyło krzywiznę membrany. Natomiast w Połczynie konieczne były zmiany pochylenia i krzywizny.

W podobnym czasie na Śląsku w Wojewódzkim Parku Kultury i Wypoczynku w Chorzowie powstała letnia kawiarnia. Położona była na wyspie, przy głównym ciągu pieszym, w pobliżu hali wystawowej i kąpieliska. Lokalizacja nad wodą, w atrakcyjnym miejscu zachęciła projektanta Adama Lisika do wykorzystania zadaszenia membranowego. Prosty układ oparty na jednym wysokim słupie oraz kilku mniejszych pozwalał na zamocowanie czworobocznej powłoki. Wysoki słup powodował, że zadaszenie widoczne było z daleka, a wygięte brzegi membrany nadawały mu kształt zbliżony do żagli. Tak też było nazy-

wane: „żagiel na wyspie”. Niestety materiał (podgumowany brezent), z którego wykonano powłokę był stosunkowo ciężki i nietrwały. Autor po latach powrócił do wykorzystania zadaszenia membranowego w Ołtarzu Papieskim w Gliwicach. Tym razem inna forma, oparta na łukowych kratownicach nawiązywać miała do wielu symboli. W tym przypadku, jako pokrycie konstrukcji została użyta specjalna przezroczysta folia¹³⁵.

3.2. Włókno szklane

Dalszy rozwój technologiczny związany był między innymi z podbojem kosmosu. Po katastrofie przy starcie rakiety Apollo poszukiwano nowych materiałów tekstylnych, zdolnych przenosić większe obciążenia, a przede wszystkim odpornych na działanie ognia. Uzyskano to dzięki wykorzystaniu włókien szklanych.



Il. 22. Pawilon Stanów Zjednoczonych w Osace

Spektakularnym przykładem zastosowania tego nowego materiału tekstylnego w budownictwie był pawilon amerykański na wystawie Expo'70 w Osace. Autorami projektu byli Davis Brody Associates i David Geiger. Zastosowano konstrukcję pneumatyczną o niskim profilu i owalnym planie. Wymiary samej

¹³³Frei Otto wspomina, że pierwszym obiektem, w którym próbowano określić kształt sieci linowej była hala sportowa w kompleksie olimpijskim. Bernd Baier, Stepfan Meyer-Miethke, *op.cit.*, s. 17.

¹³⁴Danuta Kochanowska, *Gdańskie dachy powłokowe*. Architektura 1/1965.

¹³⁵Na podstawie rozmowy z profesorem Adamem Lisikiem – najprawdopodobniej było to pierwsze w Polsce użycie folii ETFE.

membrany wynosiły 142×83 m przy różnicy wysokości zaledwie 7 m. Konstrukcje pneumatyczne były już wcześniej znane, między innymi jako osłony radarów, projektowane przez Waltera Birda. Natomiast wymiary i sposób ukształtowania membrany, wzmocnionej układem lin, rozwiały obawy o trwałość konstrukcji pneumatycznych. Tkanina techniczna wykonana z włókien szklanych była pokryta winylem dla zwiększenia szczelności, aby powietrze nie przedostawało się przez powłokę^{136, 137}. Poza tym był pierwszym obiektem, gdzie zastosowano obliczenia komputerowe do określenia kształtu powłoki i sił wciągach¹³⁸.

Natomiast pierwszym stałym obiektem, w którym zastosowano tkaninę z włókien szklanych pokrytych PTFE jest centrum sportowe przy uczelni w La Verne. Zadaszenie o pięciu stożkowych formach zostało zaprojektowane przez pracownię Shaver Partnership i oddane w 1973 roku. Zadaszenie jest reklamowane przez firmę Birdair, która jest wykonawcą membrany, jako przykład trwałości materiału, obecnie już ponad 40 lat¹³⁹.



Il. 23. Uczelniane centrum sportowe w La Verne

Proces projektowania struktur membranowych nastroczał wiele problemów, przede wszystkim potrzebne były procedury obliczeniowe. Dzięki nowoczesnym technikom można było pró-

bować określić kształt początkowy, wyznaczyć wykroje oraz określić naprężenia w konstrukcji. Pawilon w Osace był pierwszym obiektem, w którym zastosowano obliczenia komputerowe do poszukiwania kształtu napiętej powłoki. Dzięki zastosowaniu nowego materiału i metod obliczeniowych rozpoczął się okres, kiedy wiele stadionów w Stanach Zjednoczonych zostało zadaszonych konstrukcjami pneumatycznymi. Pierwszym był stadion Pontiac Silverdome w Detroit. Obecnie obiekty te są przebudowywane, między innymi ze względu na wysokie koszty ciągłego pompowania powietrza oraz problemy z odśnieżaniem przy ponadnormatywnych opadach śniegu. Przykładami są stadion w Minneapolis i stadion BC Place w Vancouver.



Il. 24. Pawilon Stanów Zjednoczonych w Spokane

Na wystawie Expo '74 w Spokane (Stany Zjednoczone), w czasach zimnej wojny, nawet architektura wykorzystywana była do rywalizacji. Każda spektakularna budowla miała pełnić podwójną rolę, a także podnosić prestiż państwa. Tematyka wystawy była bardzo neutralna, nawiązywała do ekologii, a dokładnie dotyczyła zanieczyszczenia środowiska. Pawilon Stanów Zjednoczonych miał formę nawiązującą do tradycyjnych wigwamów amerykań-

¹³⁶ Silvia L. Titotto, Ruy M. Pauletti, Reyolando M. Brasil, *Tensile structures: form and function relationships*. International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Barcelona 2003.

¹³⁷ <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/OSAKA/intro.html> (22-07-2016).

¹³⁸ David M. Campbell, *The unique role of computing in the design and construction of tensile membrane structures*. Proceedings of ASCE Second Civil Engineering Automation Conference, 19-11-1991, New York.

¹³⁹ <http://www.birdair.com/projects/university-la-verne-sports-science-and-athletics-pavilion> (22-07-2016).

skich Indian. Miał stożkową formę opartą na centralnym słupie. Plan podstawy miał kształt eliptyczny z dwoma wycięciami. Zadaszenie dominowało nad całym terenem, długość podstawy wynosiła prawie 100 m. Konstrukcja była pozornie zbliżona do takiej, jaką zastosował Frei Otto w Montrealu w 1967 roku. Zewnętrzna sieć linowa była zamocowana do centralnego pierścienia, podtrzymwanego centralnym słupem. Poniżej sieci podwieszona była membrana wykonana z tkaniny winylowej. Ze względu na olbrzymie wymiary zdecydowano się na sieć trójkierunkową. Poza tym dla zapewnienia dużych otworów wejściowych wprowadzono sztywne kratownicowe łuki. Olbrzymie koszty, które zostały poniesione na wybudowanie pawilonu, zadecydowały o tym, aby pozostawić go po zakończeniu wystawy. Jednak, jak się szybko okazało, silny wiatr i intensywne opady śniegu doprowadziły do zniszczenia powłoki. Do dnia dzisiejszego zachowała się tylko ażurowa sieć linowa. Horst Berger podkreślił, że jest to przykład niezrozumienia natury struktur membranowych. Zbyt sztywna sieć linowa, o trójkierunkowym układzie lin, nie odkształcała się razem z powłoką. Umieszczone ponad membraną łączniki utrudniały zsuwanie śniegu, a sztywne łuki brzegowe stworzyły progi, które zatrzymały śnieg¹⁴⁰. O tym problemie wspomina też Andrzej Kowal¹⁴¹. Po zniszczeniu pokrycia pozostała sieć linowa. Jest ona symbolem, pamiątką wydarzenia, nadal czekającą na pomysł jak ją zagospodarować. Stosowanie zadaszeń membranowych poza ochroną przed intensywnym promieniowaniem słonecznym jest też nawiązaniem do tradycji



Il. 25. Hajj Terminal w Dżuddzie (Arabia Saudyjska)

krajów, w których namiot był typową formą domu. Mała odległość od Mekki powoduje, że większość pielgrzymów Islamu korzysta z terminala Hajj – lotniska w Dżuddzie (*Jeddah*) w Arabii Saudyjskiej. Zadaszenie składa się z 210 powtarzalnych segmentów o wymiarach 45×45 m wykonanych z włókna szklanego pokrytego PTFE. Daje to powierzchnię prawie 43 ha, co czyni je jednym z największych zadaszeń na świecie. Obiekt został wzniesiony w 1981 roku na podstawie projektu, który wykonali Skidmore, Owings & Merrill oraz Geiger-Berger Associates¹⁴². „Dzięki wykorzystaniu jasnej, odbijającej promienie słoneczne membranie uzyskano olbrzymią otwartą przewiewną i naturalnie oświetloną przestrzeń. Zastosowanie przekryć pozwoliło uniknąć kosztów energochłonnych urządzeń klimatyzacyjnych, przekształcono upał pustynnego słońca w przyjemny, delikatny klimat, napotkany jedynie w lesie”. Tak zachwalał swoje rozwiązanie jeden z projektantów Horst Berger¹⁴³.

¹⁴⁰ Horst Berger, *Form and function of tensile structures for permanent buildings*. Engineering Structures 21 (1999), p. 672-673.

¹⁴¹ Andrzej Kowal, *Powłokowe przekrycia o dużej rozpiętości*. Materiały budowlane 11/2005, s. 57.

¹⁴² *Structure of the Hajj Terminal, Jeddah, Saudi Arabia*. Architectural Review, October 1983 (1040), p. 104.

¹⁴³ Horst Berger, *Structures of light, op.cit.*, p. 77.



Il. 26. Stadion w Rijadzie

Podobnie zostało zaprojektowane zadaszenie stadionu w Rijadzie przez Iana Fräsera, Johna Roberta wraz z Geiger-Berger Associates. W gorącym klimacie pustynnym zapewniono sprzyjające warunki dla przebywających tam 68 000 ludzi¹⁴⁴. Kształt zadaszenia przypomina połączone 24 namioty Beduinów, z tą różnicą, że są białe, a nie takie jak tradycyjne, wykonane z ciemnej wełny.

Uzasadnione jest stosowanie jasnej membrany w gorącym klimacie, natomiast użycie jej, jako dachu w obiektach zamkniętych, a zwłaszcza wymagających ogrzewania budzi wątpliwości dotyczące strat ciepła. Izolacyjność membrany jest zbyt mała, aby zrównoważyć straty ciepła przedostającego się przez przegrody zewnętrzne nawet, jeśli są zrobione z podwójnych warstw. Poza tym realizacja w Ameryce Północnej wymagała między innymi rozwiązania problemu obciążenia śniegiem. Na przykład port lotniczy w Denver (Stany Zjednoczone), oddany w 1994 roku, położony jest w centrum Gór Skalistych, gdzie w okresie zimowym są bardzo niskie temperatury i obfite opady śniegu. Projektant Curtis W. Fentress przy współpracy z konstruktorami wykonał koncepcję architektoniczną nawiązującą do ośnieżonych szczytów górskich. W tym przy padku ważne



Il. 27. Port lotniczy w Denver

też były sprawy strat ciepła i kosztów użytkowania. Horst Berger udowodnił, że całoroczny bilans zysków i strat energii w obiekcie zamkniętym, zadaszonym przez dwuwarstwową membranę wart jest zainwestowania. Nie potrzeba go doświetlać, gdyż światło przedostaje się przez membranę. Nie potrzeba go również klimatyzować, gdyż promieniowanie ciepłe jest odbijane przez membranę. Dzięki temu uzyskano jednoprzestrzenne wnętrza o wymiarach 60×274 m. Dodatkową korzyścią zastosowania membrany w tym obiekcie jest efekt żarzenia się dachu oglądanego z okien samolotu¹⁴⁵.



Il. 28. Stadion Georgia w Atlancie

Zastosowanie tkaniny z włókien szklanych pokrytych PTFE pozwala na uzyskanie największych rozpiętości ze względu na małą masę materiału pokryciowego. Poza tym jasna

¹⁴⁴ Hanna Michalak, Stefan Pyrak, Kazimierz Szulborski, *Przekrycia podwieszane trybun stadionów sportowych*, Inżynieria i budownictwo 1/1997, s. 14-17.

¹⁴⁵ Horst Berger: *Light structures, op.cit.*, p. 170-185.

membrana chroni przed promieniowaniem i nie tworzy ciemnych obszarów. Przedstawione wcześniej przykłady konstrukcji pneumatycznych z biegiem czasu okazały się kosztowne w użytkowaniu. Nowym rozwiązaniem w latach 90. okazało się wykorzystanie konstrukcji prętowo-ciężkowej¹⁴⁶ o układzie tzw. kopuły wiszącej. Opatentowana przez Dawida Geigera struktura została zrealizowana w kilku stadionach na całym świecie. Jednym z największych przykładów jest dach stadionu Georgia w Atlancie (Stany Zjednoczone). Projekt dachu wykonał Matthys Levy z Weidlinger Ass¹⁴⁷. Obiekt został zrealizowany w 1992 roku i ma największe jak dotąd wymiary 235×186 m dla tego typu konstrukcji. Stadion na 72 000 miejsc ma stały dach, w całości pokryty membraną. Odbyły się tam główne uroczystości i rozgrywki wielu dyscyplin sportowych podczas olimpiady w Atlancie w 1996 roku. Konstrukcja dachu składa się z zewnętrznego ściskanego pierścienia oraz wewnętrznych ciężkich i rozpór. Pierścień umieszczony jest na 15-metrowych słupach ponad widownią, a napięte ciężkie tworzą przestrzenną strukturę, stopniowo podnoszącą się w środkowej części, stąd nazwa „kopuła wisząca”. Dawid Geiger opatentował sposób kształtowania i przenoszenia obciążeń w tego typu konstrukcjach, ale zbliżona zasada została już wcześniej zastosowana przez Wacława Zalewskiego w dachu Katowickiego Spodka¹⁴⁸. Mogłoby się wydawać, że stosowanie tak lekkich konstrukcji o dużych wymiarach, narażonych na silne podmuchy wiatru

może być niebezpieczne. W 2008 roku przez centrum Atlanty przeszło tornado. Trąba powietrzna minęła stadion w odległości niecałych 200 m. Pod wpływem silnych podmuchów doszło jedynie do rozkołysania sprzętu zawieszono pod kopułą i niewielkich uszkodzeń membrany spowodowanych spadającymi elementami, oderwanymi od sąsiadujących budynków¹⁴⁹. Obecnie stadion przeznaczony jest do zamknięcia, gdyż obok powstaje zupełnie nowy z otwieranym dachem.

Idea wykorzystania struktur tensegrity o układzie kopuły jest bardzo interesującym zagadnieniem, pozwalającym na dużo większe możliwości niż tradycyjne konstrukcje. Przykłady analiz teoretycznych struktur szeroko przedstawione są w publikacjach Janusza Rębielaka¹⁵⁰.



Il. 29. Arena O₂ w Londynie

Konstrukcja, która nazywana jest największą kopułą, a mianowicie Arena O₂, wcześniej nazywana Millenium Dome, w rzeczywistości jest konstrukcją podwieszoną. Nawet nie jest, tak jak wcześniejsza, konstrukcją tensegrity opartą na zewnętrznym pierścieniu. Do 12 słupów o 100-metrowej wysokości, za pomocą

¹⁴⁶ Stosowana też jest angielska nazwa tensegrity.

¹⁴⁷ Ronald E. Shaeffer, *Tensioned Fabric Structures. A practical Introduction*. ASCE, New York 1996, p. 1.15-1.17.

¹⁴⁸ Stanisław Kuś, Andrzej Żórawski, *Rozwój ciężkowych konstrukcji podwieszonych od hali widowiskowej w Katowicach do Georgia Dome w Atlancie*. Inżynieria i Budownictwo, 1/1997, s. 9-16.

¹⁴⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/2008_Atlanta_tornado_outbreak (8-07-2016).

¹⁵⁰ Janusz Rębielak, *Numerical modeling of lightweight structures*, (eds.) J.B. Obrębski, Proceedings of International Conference on Lightweight Structures in Civil Engineering, Warsaw, Poland, June 24-28, 2002, p. 61-68.

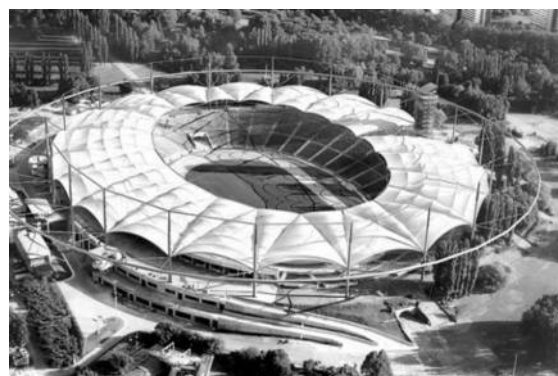
ciągien, podwieszona jest konstrukcja tworząca przestrzenny układ lin biegnących po południkach i równoleżnikach kopuły. Arena powstała w Londynie dla zorganizowania głównych obchodów 2000 roku, stąd jej początkowa nazwa. Zewnętrzna średnica wynosi 365 m, a wysokość 52 m. Autorami projektu są Richard Rogers, Buro Happold, a wykonawcą firma Birdair¹⁵¹. Założenie wypukłej, a nie siodłowej formy wymusiło zastosowanie większej liczba elementów, do których mocowana jest membrana.



Il. 30. Hala Tropical Islands w Krausnick

Podobne wymiary ma hala Tropical Islands w Krausnick (Niemcy) położona około 60 km od centrum Berlina. Została wybudowana w 2000 roku jako hangar CargoLifter¹⁵² dla nowego typu sterowców transportowych. Projekt obiektu wykonała pracownia SIAT Architektura+Technik. Potrzebna była duża kubatura, wolna od podpór i możliwość całkowitego otwarcia hali. Obecnie mieści się tam park rozrywki, ponieważ idea wykorzystania sterowców ponownie upadła. Dla lepszego wykorzystania promieni słonecznych na południowej elewacji wymieniono pokrycie z membrany odbijającej promieniowanie na folię ETFE

przepuszczającą nawet promieniowanie UV. Wymiary hali wynoszą 360×210×107 m¹⁵³. Przedstawione trzy ostatnie obiekty są największymi na świecie. Niestety ich wymiary powodują, że mają problemy z wykorzystaniem. Koszty ich utrzymania są na tyle duże, że budzą wątpliwości, czy korzyści wizerunkowe je równoważą. Dlatego nie ustają dyskusje na temat tego, czy ich nie rozebrać lub przynajmniej częściowo nie przebudować.



Il. 31. Koncepcja zadaszenia Stadionu Śląskiego w Chorzowie

W Polsce ważnym etapem rozwoju była koncepcja zadaszenia Stadionu Śląskiego o nazwie Saturn, wykonana przez pracownię TB z Katowic. Zaproponowany pod koniec lat 90. układ pierścieniowo-ciężnowy wypełniony napiętą membraną byłby największym tego typu zadaszeniem w Polsce¹⁵⁴. Jednak nieuzasadnione kontrowersje i obawy o bezpieczeństwo konstrukcji spowodowały wstrzymanie prac. Ostatecznie nie został zrealizowany w swojej pierwotnej formie, lecz zaproponowano nową konstrukcję, pokrytą płytami z poliwęglanów. Obecnie, po wybudowaniu Stadionu Narodowego w Warszawie na Euro 2012, stosowanie membrany nie budzi już takich obaw i dyskusji. Przeciż przed Mi-

¹⁵¹ *Millennium Dome in London*, Detail 6/2000, p. 1018-1023.

¹⁵² Hartmut Pasternak, *CargoLifter – hala sterowców*, Inżynieria i budownictwo 6/2001, s. 322-325.

¹⁵³ Eberhard Schunck, Hans Jochen Oster, Rainer Barthel, Kurt Kießl, *Atlas dachów. Dachy spadziste*, MDM, Cieszyn 2005, s. 428-432.

¹⁵⁴ Zdzisław Pelczarski, *Modernizacja śląskiego giganta*. Architektura i Biznes 12/1998, s. 30-35.

strzostwami Świata w Niemczech, w 2006 roku, stadiony w: Berlinie, Hamburgu, Gelsenkirchen, Lipsku, Stuttgarcie i we Frankfurcie zostały przebudowane lub wybudowane od nowa i wszystkie zostały zadaszone membraną.

Polscy architekci też nabrali doświadczenia w projektowaniu zadaszeń membranowych i zaczęli je stosować w swoich projektach. Realizacje na terenie Polski omówione są w kolejnych rozdziałach. Tu należy przedstawić konkurs architektoniczny z 2012 roku, który wygrała pracownia MCS z Poznania. Konkurs dotyczył koncepcji kompleksu sportowego w Konstantynie, mieście w północno-wschodniej Algierii¹⁵⁵. Idea miała spełniać warunki stawiane dla letnich Igrzysk Olimpijskich. Zaprojektowany kompleks składa się z kilku obiektów sportowych: stadionu, wielofunkcyjnej hali, zespołu pływalni, hali do tenisa, budynku przeznaczonego do sportów jeździeckich oraz hotelu. Gorący klimat Afryki i biała membrana stanowią naturalne powiązanie chroniące przed promieniowaniem słonecznym. Projektant Wojciech Ryżyński z zespołem wykorzystał możliwości dowolnego kształtowania membrany i w każdym obiekcie uformował ją nieco inaczej.



Il. 32. Koncepcja kompleksu sportowego w Konstantynie w Algierii

Zaproponowany stadion główny ma promienisty układ łukowych dźwigarów nośnych oraz rozpiętych pomiędzy nimi łukami wypychającymi membranę. Dzięki temu membrana miękko łączy zadaszenie i osłonę elewacji, chroni od góry i z boku. W wielofunkcyjnej hali membrana zamocowana jest do mocno wygiętych żeber-słupów i tworzy wiele nakładających się powłok pełniących osłonę elewacji. Wspomaga to system wewnętrznej wentylacji, przypominając nieco odchylone skrzela u ryby. W centrum tenisowym zaproponowano ruchomy dach z rozwijaną membraną zamocowaną do promienistego układu linowego. Dzięki dużemu doświadczeniu i wykorzystaniu najnowszych programów komputerowych możliwe było takie ukształtowanie obiektów, nadanie im nieregularnych i miękkich form.

3.3. Folia ETFE

W ciągu ostatnich kilkunastu lat, równoległe z membranami wykonanymi z tkaniny technicznej, widoczny jest bardzo szybki rozwój struktur wykonanych z folii ETFE. Jest to stosunkowo nowy materiał budowlany, gdyż po raz pierwszy został zastosowany w 1982 roku w zoo w Arnhem¹⁵⁶. Natomiast spektakularna



Il. 33. Projekt Eden w Kornwalii

¹⁵⁵ Natalia Malinga, *Kompleks sportowy XXI wieku w Konstantynie, Algieria*. Archivolta 3(59)2013, s. 22-34.

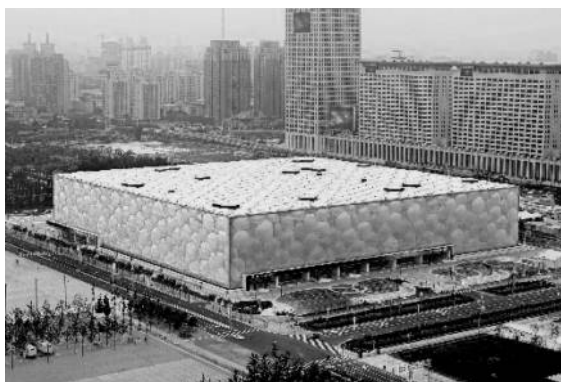
¹⁵⁶ <http://www.vector-foiltec.com/about-us/history-etfe/> (14-04-2016).

realizacja z 2000 roku, Projekt Eden w Kornwalii, spowodowała zainteresowanie architektów tym lekkim i przezroczystym materiałem. Projektantem kopuły geodezyjnych wypełnionych poduszkami z folii ETFE jest Nicholas Grimshaw. Średnica największej kopuły wynosi 125 m, natomiast pojedyncze poduszki dochodzą do 9 m¹⁵⁷.



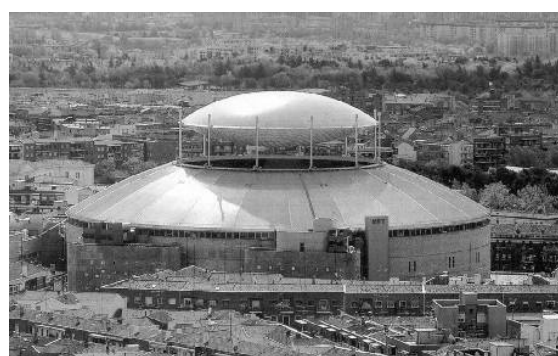
Il. 34. Allianz Arena w Monachium

Innym przykładem realizacji z wykorzystaniem folii ETFE jest stadion Allianz Arena w Monachium, którego projektantami są Pierre de Meuron i Jacques Herzog¹⁵⁸. Oddany został do użytku w 2005 roku. Poduszki z folii ETFE zostały wykorzystane jako wypełnienie konstrukcji zadaszenia oraz jako osłona elewacji.



Il. 35. Wodny Sześcian w Pekinie

Podobnie zostały wykorzystane poduszki w Wodnym Sześcianie w Pekinie, zaprojektowanym przez PTW Architects na olimpiadę w 2008 roku. W tym przypadku poduszki umieszczone są w podwójnej strukturze dachu i ścian, dzięki czemu można regulować ilość ciepła przedostającego się przez przegrody¹⁵⁹. Forma całego obiektu ma geometryczny kształt oparty na kwadracie. Natomiast podział przestrzennej kratownicy ma nieregularne pola, przypominające strukturę piany.



Il. 36. Centrum Vistalegre w Madrycie

Jedną z większych poduszek z folii, o średnicy 50 m, wykonana jest w Madrycie. Ma formę bardziej zbliżoną do soczewki, gdyż jest oparta na planie okręgu. Pełni rolę ruchomego dachu nad areną, na której kiedyś odbywały się tradycyjne korridy. Obecnie mieści się tam centrum sportowo-rozrywkowe. Poduszka wykonana jest z dwóch materiałów. Górna powłoka wykonana jest z tkaniny z włókien poliestrowych pokrytych PCW, aby dobrze odbijać promieniowanie słoneczne. Dolna powłoka wykonana jest z folii ETFE, aby przepuszczać więcej światła dziennego. Aby ciśnienie powietrza mocniej nie wybrzuszyło folii, dolna powłoka dodatkowo wzmocniona jest ortogonalną siatką z lin¹⁶⁰. Całość może być podno-

¹⁵⁷ <http://www.domerama.com/general/what-is-the-eden-project/> (8-04-2011).

¹⁵⁸ *Allianz Arena, München*, Detail 9/2005, p. 984-998.

¹⁵⁹ *Watercube – National Swimming Centre in Beijing*, Detail 12/2007, p. 1469-1475.

¹⁶⁰ *Pneumatyczne dachy i elewacje*, Budownictwo fachowe 3/2001, s. 12-13.

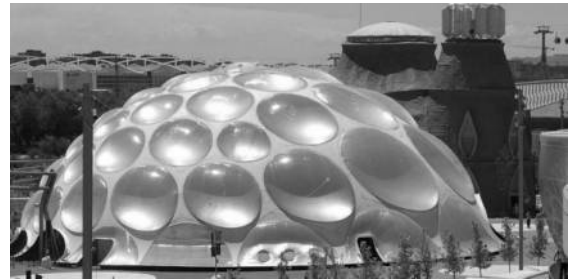
szona i opuszczana po to, aby otwierać przestrzeń nad główną areną. Obiekt został oddany w 2000 roku, a konstrukcję zadaszenia projektowała pracownia Schlaich Bergermann und Partner. Większe wymiary miała soczewka pawilonu niemieckiego w Sewilli na Expo '92 (ponad 90 m długości) oraz zadaszenie pawilonu Guthrie w Selangor koło Kuala Lumpur w Malezji (111×21 m).



Il. 37. Centrum Khan Shatyr w Astanie

Ze względu na swoje walory folia ETFE wydaje się być modnym materiałem, więc szybko przybywa realizacji. Kolejnym przedstawionym przykładem jest największy namiot na świecie, Khan Shatyr w Astanie. W nowej stolicy Kazachstanu powstało wielofunkcyjne centrum handlowo-rozrywkowe. Jego dach został zaprojektowany w formie stożkowej, o kształcie trochę innym niż tradycyjne jurty stosowane w tamtym półpustynnym klimacie. Projekt przygotowała pracownia Normana Fostera^{161,162}. Główna konstrukcja oparta jest na kratownicowym trójnogu, który podtrzymuje centralny pierścień. Przy podstawie znajduje się zewnętrzny żelbetowy pierścień, a pomiędzy nimi rozpięta jest radialna sieć linowa. Przestrzeń pomiędzy linami została wypełniona poduszkami z folii ETFE, dzięki temu kon-

strukcja może się odkształcać nawet przy bardzo dużych wahaniach temperatury. Całość ma prawie 150 m wysokości.



Il. 38. Pawilon Pragnienia w Saragossie

Jednoczesne wykorzystanie efektu przezroczystości i odbicia pozwoliło architektowi (Enric Ruiz-Geli z pracowni Cloud 9) na stworzenie Pawilonu Pragnienia¹⁶³. Był on częścią ekspozycji poświęconej „wodzie i zrównoważonemu rozwojowi” na wystawie Expo 2008 w Saragossie¹⁶⁴. Wypukła forma kopuły pokryta była niby kroplami rosy. Osiągnięto to dzięki poduszkom wykonanym z dwóch warstw folii – zewnętrznej przezroczystej i wewnętrznej z metalicznym natryskiem. Dodatkowe podświetlenie potęguje ten efekt po zmroku. Architekt ten już wcześniej wykorzystywał poduszki z folii ETFE, między innymi w wielofunkcyjnym budynku Media-TIC w Barcelonie.



Il. 39. Zadaszenie przystanku tramwajowego w Łodzi

¹⁶¹ <http://ersatzexpat.blogspot.com/2013/04/the-khan-shatyr-astanas-giant-tent.html> (28-04-2015).

¹⁶² <http://www.fosterandpartners.com/projects/khan-shatyr-entertainment-centre/> (21-05-2015).

¹⁶³ <http://www.arenasing.com/en/projects/singular-buildings/thirst-pavilion> (8-07-20016).

¹⁶⁴ <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4413.html> (8-07-2016).

Stosowanie metalicznego natrysku pozwala ograniczać lub regulować przezroczystość poduszek z folii. Natomiast barwny natrysk pozwala uzyskać efekt witrażu. Tak zostało wykonane zadaszenie przystanku tramwajowego w Łodzi. Pojedyncza warstwa folii jest napięta na stalowym szkielecie przypominającym drzewa lub żebra – form, które nawiązują do łódzkiej secesji. Zadaszenie zostało zrealizowane przez firmę Taiyo Europe w 2015 roku na podstawie koncepcji Jana Gałęckiego¹⁶⁵.

Napiętą folię wykorzystano również w zadaniu otwartego pasażu handlowego w nabrzeźnej dzielnicy Clarke Quay w Singapurze. Projekt pracowni Alsop został zrealizowany w 2006 roku. W tym przypadku folia została nadrukowana jednobarwnie dla zmniejszenia przezroczystości, ale jest wielobarwnie podświetlana¹⁶⁶.



Il. 40. Pawilon wystawowy w Esslingen

Konstrukcje pneumatyczne to nie tylko poduszki. Napompowane komory nośne w formie prostych rur mogą pełnić funkcję słupów, belek i ram. Przykładem takiego wykorzystania membrany jest pawilon wystawowy o nazwie

Airecture zaprojektowany przez Festo Corporate Design i zrealizowany w 1996 roku w Esslingen (Niemcy)¹⁶⁷. Złożony, zewnętrzny układ konstrukcyjny zapewnia ortogonalne wnętrze o wymiarach 19×40 m, wolne od podpór¹⁶⁸.

3.4. Osłony i siatki

Zupełnie odmienne właściwości od folii, która nie przepuszcza powietrza, mają różnego rodzaju materiały ażurowe. Wykorzystywane są jako osłony elewacji, jako wizualne wypełnienia konstrukcji. Chociaż nie przenoszą takich obciążeń jak zadaszenia, ale powinny być napięte, aby nie przemieszczać się pod wpływem wiatru. Materiały te mocowane są podobnie jak tkanina techniczna, najczęściej do sztywnych ram.



Il. 41. Pawilon Planeta M w Hanowerze

Ciekawym przykładem takiej konstrukcji jest pawilon Planeta M zaprojektowany przez Karla Karkau z pracowni Triad. Wewnątrz pawilonu prezentowane były najnowsze osiągnięcia związane z mediami koncernu Bertelsmann¹⁶⁹. Obły kształt o metalicznym połysku ustawiony

¹⁶⁵ https://pl.wikipedia.org/wiki/Dworzec_Tramwajowy_Centrum (29-12-2016).

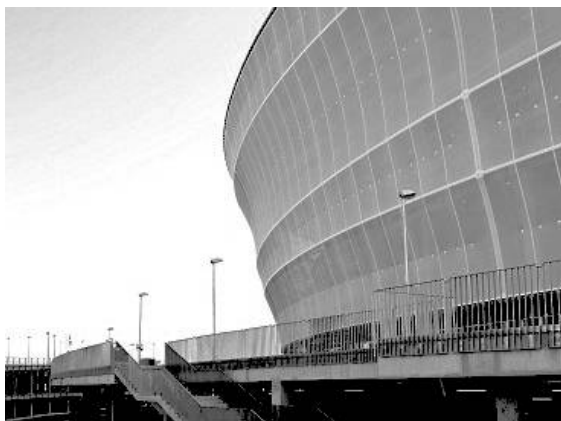
¹⁶⁶ <http://www.arcspace.com/features/alsop-architects/clarke-quay/> (23-08-2006).

¹⁶⁷ Hans Joachim Schock, *Soft shells. Design and technology of tensile architecture*. Birkhauser Verlag, Basel, Berlin, Boston 1997, p. 102-105.

¹⁶⁸ Robert Kronenburg, *Portable Architecture – Design and Technology*. Birkhauser Verlag, Basel, Boston, Berlin 1997, p. 60-64.

¹⁶⁹ Gerd Schmid, *Expo 2000, planet M covering with stainless steel fabric*, [in:] *The Design of Membrane and Lightweight Structures*. VUB Brussels University Press, 2002.

na słupach robił na Expo 2000 niesamowite wrażenie. Jeszcze ciekawszy efekt uzyskano po zmroku, kiedy ażurowa osłona była podświetlona na zmieniającą się barwną iluminacją. Sposób zamocowania siatki do konstrukcji w sposób uzależniony jest od tego jak zrobiona jest struktura siatki, czy wykonana jest z nitek czy z drutów, a w przypadku Planety M – z pasków blachy przeplatanych metalowymi prętami. Innym przykładem zastosowania siatki elewacyjnej jest zewnętrzna osłona stadionu we Wrocławiu. W tym przypadku wykonana jest z włókien szklanych pokrytych PTFE¹⁷⁰. Głównymi walorami, które zadecydowały o wyborze tego materiału było to, że jest mocny, lekki, odporny na zabrudzenia i podpalenie, a jednocześnie można go podświetlać w różnych kolorach.



Il. 42. Osłona elewacji stadionu we Wrocławiu

Membrana może być wykorzystana, jako materiał konstrukcyjny o wymiarach kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu metrów. Przy właściwym ukształtowaniu można zapewnić bezpieczeństwo konstrukcji bez specjalnych wzmocnień. Może też być traktowana, jako materiał



Il. 43. Centrum Pompidou w Metz

pokryciowy, kiedy jego walory wytrzymałościowe nie są w pełni wykorzystywane. Przykładem jest Centrum Pompidou w Metz (Francja)¹⁷¹. Cecil Balmond i Shigeru Ban wykorzystali białą membranę zamocowaną do gęstej struktury nośnej wykonanej z drewna. Chcieli uzyskać jasną, błyszczącą i gładką powierzchnię, która częściowo przepuszcza światło dzienne. Podobnie został pokryty Pawilon Japoński na wystawie Expo 2000 w Hanowerze, który zaprojektował Shigeru Ban wraz z Freiem Otto. Przy okazji powtórzyli pomysł na postawienie konstrukcji ze słynnej wielofunkcyjnej hali z Mannheim (Niemcy)¹⁷².



Il. 44. Ściana osłonowa hali do koszykówki w Londynie

¹⁷⁰ Tomasz Głowacki, *Stadion Miejski we Wrocławiu*, *Architektura-Murator*, 03/2012, s. 52-63.

¹⁷¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Centre_Pompidou-Metz (6-05-2015).

¹⁷² Polega na wykorzystaniu płaskiego rusztu z drewnianych listew połączonych przegubowymi węzłami. Ruszt jest podnoszony przez wypchnięcie go w górę, a następnie zamocowany wzdłuż krawędzi brzegowych. Sposób nieco przypomina podnoszenie struktur pneumatycznych.

W przypadku hali do koszykówki wykorzystanie membrany pokrytej PCW było od samego początku traktowane jako rozwiązanie tymczasowe. Stwierdzono, że hala na 12 000 miejsc siedzących jest potrzebna tylko na czas olimpiady, dlatego poszukiwano rozwiązania najtańszego takiego, które pozwalało rozebrać halę po olimpiadzie. Rozważano nawet pomysł przetransportowania hali na kolejną olimpiadę do Brazylii¹⁷³. Hala została zaprojektowana przez pracownię Wilkinson Eyre Architects. Został wybrany taki materiał pokryciowy, aby można go było w całości poddać recyklingowi. Podobnie został zaprojektowany ośrodek strzelecki na Olimpiadzie w Londynie przez pracownię Magma Architecture. Nieco inaczej ukształtowany układ membran tworzył ściany osłonowe obiektów¹⁷⁴.

3.5. Rzeźby

Niektóre struktury membranowe tworzą swego rodzaju rzeźby, instalacje. Dalekie są od swojej funkcji zadaszenia. Przykładem takiego wykorzystania membrany jako materiału pokryciowego swobodnej formy jest pawilon „Lilas”, który został zaprojektowany dla galerii Serpentine przez Zahę Hadid na coroczną ekspozycję w 2007 roku¹⁷⁵. W 2013 roku Zaha Hadid zaprojektowała rozbudowę starego ceglanego budynku Serpentine Sackler Gallery w krzywoliniową kawiarnię¹⁷⁶. Autorka w swoich realizacjach łączy białą membranę ze sztywnymi błyszczącymi panelami, co powoduje, że zaciera się różnica pomiędzy poszczególnymi materiałami. Dzięki temu może uzyskiwać formy, których nie otrzymałby z samej napiętej membrany. Podobnie zaprojektowała mobilny pawilon Chanell (il. 75).



Il. 45. Pawilon Galerii Serpentine w Londynie

W przypadku obiektów o dużych wymiarach projektant zmuszony jest do optymalizacji formy ze względu na wytrzymałość konstrukcji, natomiast w mniejszych realizacjach może pozwolić sobie na większą swobodę. Przykładem takiej rozrzeźbionej formy jest zadaszenie centrum przesiadkowego w Detroit (Stany Zjednoczone). Obiekt został zaprojektowany przez pracownię Parsons Brinckerhoff i oddany w 2009 roku¹⁷⁷. Zadaszenie składa się z 7 modułów utworzonych z połączenia dwóch przeciwnie położonych form stożkowych. Ukośne ustawienie osi stożków podkreśla swobodę w kształtowaniu formy.



Il. 46. Centrum przesiadkowe Rosa Parks w Detroit

¹⁷³ Marcin Mateusz Kołakowski, *Mity i marzenia*. Architektura i Biznes. 6/2012, s. 54, 62.

¹⁷⁴ <https://adesigndaily.wordpress.com/2012/06/13/olympic-shooting-venue-by-magma-architecture/> (23-08-2012).

¹⁷⁵ <http://www.zaha-hadid.com/design/lilas-installation/> (6-05-2015).

¹⁷⁶ <https://www.dezeen.com/2013/09/25/serpentine-sackler-gallery-by-zaha-hadid/> (19-11-2016).

¹⁷⁷ <http://www.fabritecstructures.com/portfolio-rosa-parks-transit-center-detroit-mi> (23-07-2016).

Na jeszcze większą swobodę kształtowania pozwalają struktury umieszczone we wnętrzach. Brak jest wtedy zewnętrznych obciążeń – opadów i wiatru. Jednym z najbardziej spektakularnych przykładów jest instalacja *Marsyas* zaprojektowana przez Anish Kapoor, która powstała w galerii Tate Modern w Londynie¹⁷⁸. Rzeźba, prezentowana była w latach 2002-2003. Wykonana była z ciemnopurpurowo-



Il. 47. Instalacja *Marsyas* w galerii Tate Modern w Londynie

wej membrany o długości 150 m i wysokości 10 kondygnacji. Pomiędzy skrajnymi pierścieniami, do których zamocowana była membrana, nie było żadnej dodatkowej podpory. Jej forma przypominała gigantyczną, napiętą błonę, wyjętą z jakiegoś monstrualnego stwora. Podobnie spektakularną strukturą jest „chmura” zaprojektowana przez Massimiliano Fuksa w Centrum Kongresowym w Rzymie. Struktura – rzeźba o długości ponad 100 m i nieregularnym kształcie, pełni funkcję dodatkowej osłony ukrytej wewnątrz szklanego budynku. Nieregularny kształt w tym przypadku został uzyskany dzięki gęstej przestrzennej siatce stalowych prętów. Natomiast walory wytrzymałościowe membrany nie zostały wy-

korzystane, pełni ona jedynie funkcję półprzezroczystej i lekkiej osłony.

Innym przykładem może być pawilon zaprojektowany przez Renzo Piano z okazji 500. rocznicy odkrycia Ameryki. Obiekt został zbudowany w Genui (Włochy), w mieście, w którym urodził się Krzysztof Kolumb. Forma pawilonu wyraźnie nawiązuje do nabrzeża morskiego: wysokie maszty, liny i łukowo wygięte membrany. Sama nazwa *Grande Bigo* oznacza wielki bom, czyli część żurawia, za pomocą którego ładowane były statki¹⁷⁹.



Il. 48. Pawilon wystawowy *Grande Bigo* w Genui

3.6. Tymczasowe i mobilne

Struktury membranowe były i są wykorzystywane do stawiania obiektów tymczasowych. Obecnie szybko zmieniające się potrzeby tym bardziej powodują, że konieczne są obiekty o zmieniającej się funkcji, a nawet formie. Stawiane są obiekty na konkretne wydarzenia i od razu przewidywane jest ich rozbieranie lub przenoszenie. Najbardziej charakterystycznym przykładem są pawilony wystawowe. Poza zapewnieniem ochrony przestrzeni wystawowej dzięki swojej formie wyróżniają się od innych pawilonów lub wyrażają określone idee. Maciej Kysiak¹⁸⁰ podkreślał, że dzięki lekkiej konstrukcji można je łatwo transportować na miejsce.

¹⁷⁸ [https://en.wikipedia.org/wiki/Marsyas_\(sculpture\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Marsyas_(sculpture)) (21-11-2015).

¹⁷⁹ Maria T. Ceola: *Il Grande Bigo*. Cannobio, Milano 1992.

¹⁸⁰ Maciej Kysiak, *op.cit.*



Il. 49. Pawilon Nowego Czasu w Paryżu

Takim przykładem był pawilon Nowego Czasu (*des Temps Nouveaux*), zaprojektowany przez Le Corbusiera na wystawę w 1937 roku w Paryżu¹⁸¹. Le Corbusier zaproponował formę nawiązującą do antycznej świątyni judaistycznej. Natomiast nie zastosował pochyłego zadaszenia, lecz ortogonalne ściany i dach. Wymagało to zastosowania odpowiednio sztywnej, stalowej konstrukcji. Lekki szkielet wymagał też użycia odpowiednich zamocowań i usztywnień, stąd duża liczba zewnętrznych odciągów, które niestety psuły czystą formę samego pawilonu.

Kolejne przykłady konstrukcji mobilnych¹⁸² mają mały ciężar pokrycia, co ułatwia ich transport, demontowanie lub częściowe ich składanie. Takimi obiektami są sceny, które wielokrotnie są wykorzystywane, ale w różnych miejscach. Zdarza się, że słynni wykonawcy zamawiają specjalnie zaprojektowane sceny dla cyklu koncertów – trasy promującej płytę. W takim przypadku konstrukcja sceny i zadaszenia pełni również rolę scenografii.

Interesującym przykładem mobilnej sceny był pawilon muzyczny Carlos Moseley dla Opery Metropolitan i Filharmonii Nowojorskiej. Konstrukcja była wielokrotnie wykorzystywa-

na w latach 1990–2004. W ciągu zaledwie dwóch godzin możliwe było ustawienie sceny wraz z zadaszeniem na platformach 5 samochodów. Aby maksymalnie przyspieszyć proces przygotowania, część urządzeń była na stałe umieszczona na platformach samochodowych¹⁸³. Koncepcję architektoniczną przygotowała pracownia FTL Architects. Napięta membrana pełniła funkcję zadaszenia, ekranu akustycznego i jednocześnie ekranu dla wizualizacji.



Il. 50. Pawilon muzyczny Metropolitan Opera w Nowym Jorku

Innym przykładem sceny jest struktura, która była wykorzystywana na trasie „Lato Zet i Dwójki” w 2012 roku. Konstrukcja wykonana ze stalowego, przestrzennego szkieletu pod-



Il. 51. Scena „Lato Zet i Dwójki” w 2012 roku w Łodzi

¹⁸¹ Samuel Flora, *Le Corbusier in Detail*. Architectural Press, Elsevier, Amsterdam 2007, p. 27.

¹⁸² Adam Z. Pawłowski, Piotr Trębacz, *Konstrukcje mobilne*. Architektura-Murator, 10/97.

¹⁸³ <http://www.detail-online.com/inspiration/music-pavilion-in-new-york-109527.html> (20-09-2016).

trzymywała systemy oświetleniowe i nagłośnienie. Dla nadania scenografii charakterystycznej formy została przysłonięta pasami białej tkaniny. Napięte membrany tworzyły rodzaj skóry – błony pokrywającej organiczne formy. Po koncercie konstrukcja była całkowicie demontowana i transportowana w kolejne miejsce.

Jeśli jest mowa o konstrukcjach mobilnych w architekturze, to najczęściej chodzi o obiekty, w których tylko jakiś segment ulega przesuwaniu, obracaniu lub zwijaniu. Szytywne elementy konstrukcji, jak ściany lub dach, mogą przemieszczać się dzięki specjalnie przygotowanym mechanizmom. Natomiast wiotka membrana pozwala na zmianę kształtu przez zwijanie lub fałdowanie, nie tracąc przy tym szczelności pokrycia, np. tak jak w parasolach. Jeśli zadaszenie ma chronić podczas opadów, to woda powinna być zbierana, aby nie zlewała się wzdłuż krawędzi brzegowych. Najprostszym rozwiązaniem jest stosowanie formy leja – odwróconego stożka. Centralny słup spełnia wtedy jednocześnie funkcję podpory



Il. 52. Parasole w Medynie

i rury odprowadzającej wodę. Przykładem takich parasoli były zadaszenia zaprojektowane przez Freja Otto na koncerty grupy Pink Floyd w 1977 roku. Przy projekcie uczestniczył wtedy Bodo Rasch¹⁸⁴. Wieloletnie doświadczenie zaowocowało w 2010 roku przygotowanym przez pracownię SL-Rasch¹⁸⁵ w pełni zautomatyzowanym zadaszeniem w Medynie (Arabia Saudyjska). 250 sterowanych parasoli o wymiarach 25×25 m pozwala regulować zacienienie otwartej przestrzeni w pobliżu meczetu.



Il. 53. Zadaszenie dziedzińca fortu w Kufstein

W Austrii nad dziedzińcem fortu w Kufstein wykonane jest zadaszenie z fałdowaną membraną. Projekt przygotowali architekci z pracowni Kugel+Rein¹⁸⁶. Aby minimalnie ingerować w historyczną strukturę zabudowań obronnych, zaproponowano układ pierścieniowo-ciężnowy. Do 15 pionowych słupów rozpartych zewnętrznym pierścieniem przymocowane są promieniste ciężna górne i dolne. Wszystkie ciężna łączą się na środku. Po dolnych ciężnach przesuwają się wózki, do których zamocowana jest membrana. Forma napiętej membrany jest zbliżona do czaszy bar-

¹⁸⁴ Frei Otto, Bodo Rasch, *Finding form. Towards an architecture of the minimal*. Edition Axel Menges, Munich 1995.

¹⁸⁵ <http://www.sefar.com/data/docs/en/7238/AS-PDF-Architecture-Exterior-Medina-sunshades-EN.pdf?v=1.3> (29-12-2016).

¹⁸⁶ *Faltbares Dach für Festungsarena Kufstein*. Detail 12/2011.

dzo płaskiej kopuły. Zadaszenie to powstało w 2006 roku i jest podobne do stosowanych na stadionach, np. we Franfurcie lub w Warszawie.



Il. 54. Zadaszenie Pawilonu Wenezuelskiego w Hanowerze

Innym rozwiązaniem jest stosowanie sztywnych paneli ze stałe napiętą membraną. Przykładem jest stadion w Gelsenkirchen, w którym dach jest otwierany dzięki zastosowaniu paneli przesuwanych po szynach. Podczas ruchu nie dokonuje się zmiana kształtu napiętej membrany. W przedstawionym wcześniej (il. 30) centrum sportowo-rozrywkowym Vistalegre w Madrycie jest podnoszony dach. Stałe napięcie membrany uzyskane jest dzięki wykorzystaniu konstrukcji pneumatycznej. W przypadku pawilonu Wenezueli na Expo 2000 w Hanowerze membrana napięta była na wygiętych, kratownicowych dźwigarach. Sztywne panele otwierały się i zamykały jak płatki tropikalnego kwiatu. Dzięki temu regulowano ilość promieniowania docierającego na tarasy budynku. Niewielki ciężar paneli z napiętą membraną pozwalał na obracanie ich wokół przegubowego zamocowania. Ruch

odbywał się dzięki sterowanym siłownikom hydraulicznym. Projekt wykonał Fruto Vivas ze współpracą Freia Otto¹⁸⁷.

3.7. Nowe idee

Obecne metody projektowania i wykonywania elementów membran są już na tyle powszednie, że pozwalają na wielokrotne powtarzanie poszczególnych elementów. Stosowane są sprawdzone formy i detale połączeń. Przykła-



dem takiego wykorzystania membran jest zewnętrzna osłona elewacji Narodowej Biblioteki Króla Fahda w Riadzie (Arabia Saudyjska). Powtarzalny moduł, dzięki komputerowym metodom, stał się elementem, z którego budowana jest forma. Tak jak kiedyś cegła podkreślała jedność struktury, faktury i barwy, tak w tym przypadku moduły membran nawiązują do lokalnej kultury, chronią przed słońcem a jednocześnie rzeźbią ortogonalną bryłę budynku. Projekt w 2014 roku zrealizowała niemiecka pracownia Gerber Architekten¹⁸⁸. Projektowanie struktur membranowych wymusiło potrzebę powstania programów komputerowych służących obliczeniom wytrzymałościowym oraz modelowaniu napiętych powłok.

¹⁸⁷ Charo García-Diego, Jose Ignacio Llorens, Hubertus Pöppinghaus, *El pabellón de Venezuela en la Expo 2000 de Hannover*, Informes de la Construcción, vol. 53 No. 473, mayo/junio 2001, p. 11-26.

¹⁸⁸ Peter Popp, *Plastische Raumwirkung: Nationalbibliothek in Riad*, <http://shop.detail.de/de/einzelhefte/detail-12-2013-planen-und-bauen-als-prozess.html> (22-07-2016).



Il. 56. Zadaszenie tarasu w Londynie

Skutkiem ciągłego rozwoju oprogramowania jest to, że obecnie stosowane programy komputerowe pozwalają i inspirują do tworzenia form, których nie można było uzyskać metodami tradycyjnymi. Przykładem jest zadaszenie tarasu Architectural Association w Londynie. Autorami projektu są: Michael Hensel, Achim Menges¹⁸⁹, Michael Weinstock. Zadaszenie powstało w 2010 roku. Dzięki wykorzystaniu modeli komputerowych została zaprojektowana przestrzenna sieć ciągnowa, do której zamocowane są moduły z napiętymi membranami. Przez modyfikowanie położenia punktów zamocowania i zmianę napięcia sieci uzyskano najbardziej optymalną formę. Częściowo ażurowe zadaszenie zapewnia osłonę tarasu przed promieniowaniem słonecznym oraz przed uciążliwym w tym miejscu wiatrem.

Programy komputerowe pozwalają modyfikować moduły przez zmianę określonego parametru. Można uzyskiwać formy zbliżone do siebie o delikatnych różnicach. Można też z mniejszych segmentów budować formy większe. Gdyby próbować modelować indy-



Il. 57. Pawilon Burnhama w Chicago

widualnie każdy segment, to byłoby to zbyt pracochłonne, aby osiągnąć efekt całości. Przykładem może być miękka forma kokonu, która została poddana przekształceniom geometrycznym. Przez zmianę parametrów krzywizny powierzchni uzyskana została forma miękka, swobodna, a zarazem geometrycznie uźebrowana. Projekt Pawilonu Burnhama, wybranego w drodze konkursu, wykonała Zaha Hadid. Pawilon ten powstał w Chicago w 2009 roku, dla upamiętnienia 100-lecia wprowadzenia planu urbanistycznego. Miał być symbolem nowoczesności i zmian, jakie zaszły w architekturze miasta Chicago¹⁹⁰.



Il. 58. Tymczasowy pawilon w Nodzie

¹⁸⁹ Achim Menges, *AA Membrane Canopy in London*, Detail 5/2010, p. 454-456.

¹⁹⁰ <http://www.archdaily.com/33110/burnham-pavilion-zaha-hadid> (24-08-2009).

¹⁹¹ *Temporary pavilion in Noda*, Detail 10/2012, p. 1086-1088.

¹⁹² Tensegrity – struktury prętowo-ciężnowe pierwsze zastosowania jako systemy konstrukcyjne przez Snelsona i Buckminstera Fullera.

Zupełnie nowy, niespotykany do tej pory sposób wykorzystania membrany zastosowano w tymczasowym pawilonie w Nodzie koło Tokio. Projekt przygotował Kazuhiro Kojima¹⁹¹. Nowość polega na zintegrowaniu membrany ze sztywnymi prętami-rozporami, tak jak współpracują cięgna z prętami w strukturach tensegrity¹⁹². W membranie zostały wykonane kieszenie, w które wsunięte są pręty, dzięki temu podpierają membranę i jednocześnie same opierają się na niej. Pręty położone są równolegle i tworzą zazębiające się pasy podtrzymujące membranę. Napięta membrana lokalnie przyjmuje podwójną krzywiznę, a w miejscach, gdzie znajdują się zamocowania do prętów wypychana jest na zewnątrz. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskano formę zbliżoną do sklepienia beczkowego, forma walcowa w środkowej części ma większą średnicę.

Membrany obecnie poza bardzo wyrafinowanymi realizacjami są również stosowane w bardzo prostych rozwiązaniach. Dzięki temu, że można je wykonać w łatwy, szybki i tani sposób, mogą być stosowane w miejscach, gdzie wystąpiły katastrofy. Dają schronienie w budownictwie awaryjnym w postaci prostych namiotów, ale też pozwalają na stawianie odmiennych form¹⁹³.

Przedstawiona ewolucja wykorzystania struktur membranowych w architekturze obrazuje istotne zmiany, jakie dokonały się przez ostatnich kilkadziesiąt lat. Można wyróżnić kilka przyczyn, które wyraźnie przyspieszyły rozwój w projektowaniu i realizowaniu:

1. Pojawienie się nowych materiałów – najpierw tkaniny z włókien naturalnych, później z włókien sztucznych – poliestrowych, następnie z włókien szklanych pokrytych

PTFE, oraz jednorodna folia ETFE bez anizotropowych właściwości tkaniny.

2. Zmiana metod projektowania – kiedyś tradycja i wieloletnie doświadczenie, później eksperymenty z modelami fizycznymi, a teraz modele komputerowe.
3. Opracowanie procedur i programów obliczeniowych – początkowo poszukiwanie kształtu, określanie obciążeń i naprężeń, wyznaczanie wykrojów, a obecnie symulacja odkształceń przy zmieniających się obciążeniach, symulacja zmian obciążeń przy zmieniającym się kształcie, programy optymalizujące.

Poza tym widoczny jest rozwój sposobów wykorzystania energii słonecznej. Pierwotnie zadaszenia miały chronić przed promieniowaniem. Później, dzięki zastosowaniu materiałów przepuszczających światło dzienne, możliwe stało się jego częściowe wykorzystanie. Kolejnym etapem było stosowanie rozwiązań, które pozwalają regulować przezroczystość materiału. Osiągnięto to dzięki nadrukowi na folii i regulowaniu położenia wewnętrznych warstw wewnątrz pneumatycznych poduszek. Ostatnimi osiągnięciami są elastyczne ogniwa fotowoltaiczne, które można mocować bezpośrednio do napiętej membrany. Dzięki temu powierzchnia napiętej powłoki jest źródłem energii elektrycznej. Ciągłe prowadzone są prace nad poszukiwaniem nowych materiałów, takich, które mają większą izolacyjność termiczną, ale nie tracą przepuszczalności światła dziennego. Takim materiałem są aerozele – rodzaj spienionego silikonu. Niestety ich cena jest zbyt wysoka, aby można było szerzej stosować.

Niektóre osiągnięcia są istotne dla rozwoju, ale nie wpływają na zmianę zasad kształtowania struktur membranowych. Właściwie to zasady te nie zmieniały się, bo wynikają z ich natury.

¹⁹³ Małgorzata Brych, *Realizacja celów humanitarnych dzięki nowym rozwiązaniom technologicznym*, Czasopismo Techniczne z. 18. Architektura z. 8-A, Kraków 2010, s. 73-80.

Można powiedzieć, że odkrycie tych zasad przez Freia Otto i jego współpracowników spowodowało prawidłowe podejście do kształtowania membran, a wszelkie problemy i błędy wynikają z nieumiejętnego ich stosowania.

4. RODZAJE ZADASZEŃ MEMBRANOWYCH

4.1. Formy napiętej membrany


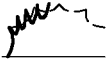







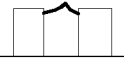




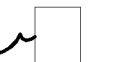
W literaturze przedmiotu najczęściej przedstawiane są przykłady konkretnych rozwiązań, mocno różniących się między sobą, natomiast mało jest opracowań, w których próbuje się poszukiwać wspólnych zasad kształtowania. Przy czym nie chodzi tu o metody obliczeniowe uzyskania poszczególnych powierzchni, ale o samą formę jaką mają napięte membrany. Ich klasyfikację można dokonać jedynie przez analizę porównawczą, ponieważ nie są typowymi powierzchniami geometrycznymi. W tym przypadku narzędzia matematyczne sprowadziłyby analizę do zagadnień dalekich od formy architektonicznej.

Chyba najbardziej ogólny podział struktur membranowych zaproponowała Marijke Mollaert¹⁹⁴. Jest to podział, który został określony na podstawie roli, jaką pełnią struktury tekstylne. Jednym kryterium jest stopień ograniczenia przestrzeni: zamyka, nie zamyka lub pozwala na dostosowywanie przymknięcia. Drugim kryterium jest wzajemna relacja pomiędzy membraną a resztą budynku. Podział ten przedstawiony jest w tabeli 1.

Zbliżony podział zaproponowała Sylvie Krüger¹⁹⁵. Dzieli struktury tekstylne w zależności od położenia w przestrzeni, na takie które pełnią rolę:

Tabela 1

Rodzaje struktur membranowych

	Zamknięta	Zmienna	Otwarta
Samodzielna			
Powłoka zewnętrzna			
Powłoka wewnętrzna			
Między budynkami			
Osłona elewacji			

Źródło: opracowane na podstawie Marijke Mollaert

¹⁹⁴ Marijke Mollaert, *Tensile Membrane Buildings and Building Components*, in VUB, TensiNet Symposium, *Designing Tensile Architecture*, 19-20 September 2003, Brussel, p. 11.

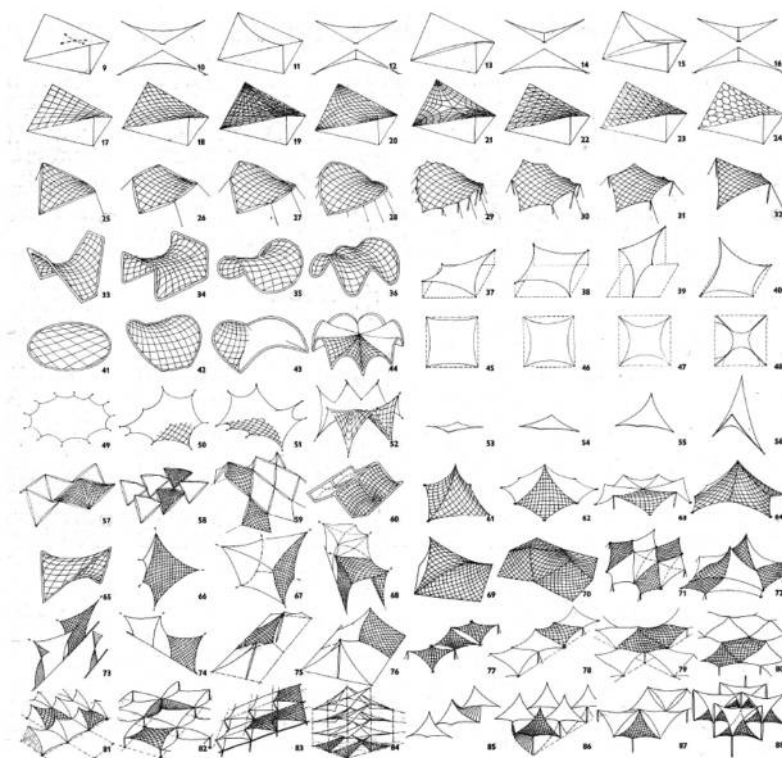
¹⁹⁵ Sylvie Krüger, *Textile architecture – Textile Architektur*, Jovis, Berlin 2009.

- a) przegrody pionowej:
- osłona zewnętrzna,
 - ściana kurtynowa,
 - przegroda wewnętrzna,
 - wydzielające wewnętrzne pomieszczenie *room in room*,
- b) przegrody poziomej:
- baldachim,
 - ruchomy dach,
 - parasol,
- c) przegrody przestrzennej:
- namiot,
 - konstrukcja pneumatyczna.

Mimo, że przedstawiony podział, a także cała publikacja dotyczy struktur tekstylnych, to wśród nich znajdują się również membrany wykonane z folii. Istotny w tym przypadku jest sposób wykorzystania napiętej powłoki

aniżeli pojęcie materiału tekstylnego. Przedstawione wcześniej podziały są bardzo ogólne i brak jest w nich zależności dotyczących formy membrany lub sposobu jej zamocowania. Natomiast ułatwiają określanie, do jakiej grupy zaliczyć przedstawione w kolejnych rozdziałach przykłady.

Jeżeli chodzi o formę membrany to pierwszy i podstawowy podział jest na: struktury, których napięcie uzyskiwane jest przez naciągnięcie wzdłuż krawędzi brzegowych oraz struktury, których napięcie otrzymywane jest przez ciśnienie powietrza, czyli na takie, które mają powierzchnie antyklastyczne i synklastyczne. Nawet publikacja Freia Otto z 1973 roku¹⁹⁶ była podzielona na dwa tomy. Pierwszy dotyczy konstrukcji pneumatycznych a drugi, jak to zostało nazwane, konstrukcji napiętych¹⁹⁷.



Il. 59. Przykłady form uzyskane z sieci linowych i membran według Freia Otto

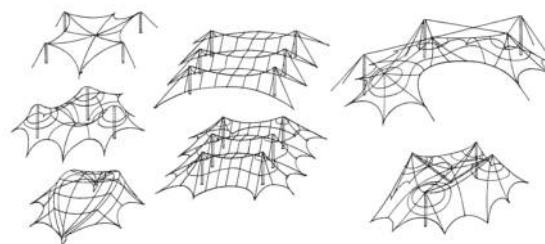
¹⁹⁶ Freia Otto, *Tensile Structures*, *op.cit.*

¹⁹⁷ *Ibidem*, vol. 1. *Pneumatic structures*, vol. 2. *Basic concepts and survey of tensile structures*.

Dalszy podział form membranowych wynika z tego, czy są pojedynczymi płacami czy powstają z połączenia kilku płatów, stąd też ich pozorna złożoność. Na wstępie konieczne jest określenie, z jakich części składa się dany układ. Dopiero później można określać kształt poszczególnych membran. Na il. 59 przedstawiony jest autorski rysunek Freia Otto, na którym wskazuje proste formy napiętej membrany lub sieci linowej. Następnie przedstawia jak te formy można łączyć dla uzyskania złożonych układów.

Płaty poszczególnych membran oddzielone są elementami brzegowymi, służącymi do ich zamocowania. Elementy te stanowią jednocześnie konstrukcję podporową, a występujące w nich siły powodują napięcie membrany, czyli definiują jej kształt. Wielkości sił wewnętrznych wynikają z obliczeń, natomiast rodzaj podpór, kształt, układ oraz odległości pomiędzy nimi współtworzą formę architektoniczną. W zadaszeniach membranowych bardzo widoczne są części konstrukcji, dlatego muszą być wyjątkowo umiejętnie dobrane, aby współgrały z formą obiektu.

W opisach powierzchni występujących w zadaszeniach membranowych stosowane są terminy: punkty wysokie i punkty niskie. Punkty wysokie to miejsca, w których membrana jest podparta i położona wyżej niż sąsiadujące fragmenty powierzchni. Zwykle są to narożniki danej membrany lub punkty umieszczone na krawędzi brzegowej. Czasami są to dodatkowe punkty umieszczone wewnątrz powłoki. Natomiast punkty niskie to miejsca, w których membrana jest bezpośrednio zakotwiona do fundamentów lub za pomocą cięgien naciągana w dół.



Il. 60. Typowe formy przedstawione przez Heino Engela

Heino Engel¹⁹⁸ w swojej publikacji dotyczącej systemów konstrukcyjnych dzieł, jak to nazywał „struktury namiotowe” na podstawie sposobu zamocowania i rodzaju konstrukcji podporowej, a nie ze względu na formy napiętej membrany. Oczywiście jest to ze sobą ściśle związane, chociaż niektóre formy można uzyskać, stosując różne metody zamocowania. Engel wyróżnił 5 typów:

- z zewnętrznymi podporami, prosta powierzchnia siodłowa,
- z pofalowaną powierzchnią, zewnętrzne podpory i kotwienia,
- z wewnętrznymi podporami,
- z dodatkowym wewnętrznym kotwieniem,
- z łukami podporowymi.

Inny podział zaproponował Michael Seidel¹⁹⁹, który uzależnił ów podział od sposobu podparcia:

- a) podparte w punkcie,
 - z wewnętrznymi punktami wysokimi,
 - z grzbietami i dolinami,
 - markizy (z przedstawionego schematu wynika, że chodzi o formę opartą na czworoboku zamocowanym w narożnikach),
- b) podparte liniowo,
- c) podparte powierzchniowo za pomocą konstrukcji pneumatycznych.

¹⁹⁸ Heino Engel, *Structure Systems*, Hatje Cantz, Germany 1997, p. 86-111.

¹⁹⁹ Michael Seidel, *Tensile Surface Structures, A practical Guide to cable and Membrane Construction*. Ernst & Sohn, Berlin 2009, p. 118.

Podobną klasyfikację przedstawił Michał Pelczarski²⁰⁰, dzieląc struktury membranowe na podstawie systemów konstrukcji podporowych na trzy grupy podpierane: konstrukcjami sztywnymi (słupy, ramy, łuki), konstrukcjami ciągnowymi oraz konstrukcjami pneumatycznymi. W szczegółowym podziale przedstawił też grupę membran, które wiszą swobodnie oraz płaskie naprężone.

Jeszcze inny podział występuje w niektórych programach komputerowych, w których wyznaczane są modele powierzchni membran. Na początku procesu modelowania wybierany jest rodzaj sieci z węzłami: o układzie prostokątnym lub promienistym (ortogonalnym – radialnym). Czasami nazywany jest siodłowym i stożkowym. Po wybraniu któregoś z rodzajów sieci określane są położenie i stopień swobody poszczególnych węzłów. Układ promienisty jest jakby zawiniętą i zamkniętą siecią prostokątną, kiedy jedna krawędź brzegowa sieci jest połączona z krawędzią przeciwną. Powstaje wtedy układ zbliżony do walca lub stożka, mający jedynie krawędzie górną i dolną (wewnętrzną i zewnętrzną).

Stosując takie rozumowanie, podział powierzchni występujących w zadaniach membranowych można uprościć do trzech zasadniczych grup:




- powierzchnie wieloboczne,
- powierzchnie zamknięte,
- powierzchnie złożone.

Powierzchnie, w których występują dodatkowe punkty lub krawędzie, gdzie membrana zamocowana jest do konstrukcji lub mają otwory nazwano złożonymi. Krawędzie brzegowe, które definiują kształt powierzchni można geometrycznie sprowadzić do trzech przypad-

ków. W tabeli 2 schematycznie przedstawiono elementy mogące stanowić krawędź poszczególnych paneli.

Tabela 2

Elementy definiujące
krawędzie pojedynczej membrany

Schemat	Sposób
 odcinek	zamocowanie do elementu prostego, sztywnego, np. wieńca lub ramy
 łuk	zamocowanie do sztywnego łuku, np. wycinka okręgu, elipsy, paraboli
 ciągno	zamocowanie do elementu wiotkiego

Źródło: opracowanie własne

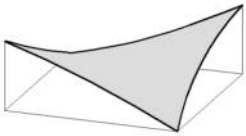
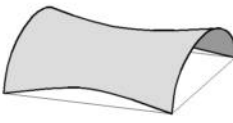

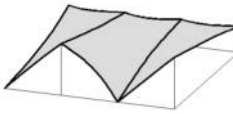
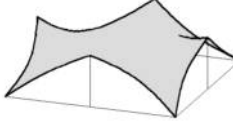
Istnieje nieskończona liczba wariantów, które mogą powstać z dowolnego deformowania, powielania lub łączenia przedstawionych typów. Dla precyzyjnego określenia kształtu występującej powierzchni, w dalszych analizach użyto klasyfikację zbliżoną do zaproponowanej przez Heino Engela. Podział ten przedstawiono w tabeli 3.

Kształt powierzchni danej membrany nie jest ściśle określoną powierzchnią geometryczną, dlatego zastosowano pewne uproszczenie. Na przykład użyty termin „forma siodłowa”, w dwuwyzrazowym zwrocie podkreśla, że chodzi o kształt danej membrany, najczęściej wydzielonej części, która tylko przypomina znany twór geometryczny. Zrezygnowano ze stosowania przedrostka „pseudo-”, „niby-” lub przyrostka „-awy”, jak to jest stosowane w chemii,

²⁰⁰ Michał Pelczarski, *Attempt of classification of types of membrane structures*. [in:] *International Seminar of IASS Polish Chapter Lightweight Structures In Civil Engineering*. J.B. Obrębski, Częstochowa 2004, p. 169-174.

²⁰¹ Heino Engel, *op.cit.*, p. 51-57.

Tabela 3
Typowe formy membran

Nazwa	Schemat
Forma siodłowa	
Forma kolebkowa	
Forma stożkowa	
Forma fałdowa	
Forma wieloboczna	

Źródło: opracowanie na podstawie Heino Engel²⁰¹

natomiast podjęto decyzję używania zwrotów dwuwyrzowych. Na przykład termin „forma stożkowa” nie oznacza powierzchni stożkowej: obrotowej, rozwijalnej, prostokreślnej itd. Raczej jest to forma zbliżona do stożka, wykazująca pewne cechy, które powodują, że kojarzy się nawet osobom niezwiązanym z projektowaniem.

Forma siodłowa to kształt, który uzyskiwany jest przez odpowiednie rozmieszczenie zewnętrznych punktów podporowych. Najprostszym przykładem jest czworobok z dwoma punktami leżącymi po przekątnej, położonymi wysoko i dwoma pozostałymi, położonymi nisko. Układ ten może być zamocowany w większej liczbie punktów, ale ich wysokość

powinna być tak dobrana, aby nadal tworzył podobną formę. Geometrycznie kształt oparty na czworoboku przestrzennym jest zbliżony do paraboloidy hiperbolicznej. Ponadto przypomina czworoboczne żagle i często jest tak nazywany²⁰². Niestety prowadzi to do złego rozumienia zasady kształtowania formy poszczególnych płatów w zadaszeniach membranowych. Zdarza się, że niektórzy projektanci próbują uzyskiwać formy oparte na trójkątach, zamocowanych w trzech narożach. Uzyskiwana wtedy jest powierzchnia płaska, niezdolna przeciwstawić się dynamicznym obciążeniom wiatru, bardzo szybko wpadająca w drgania tzw. flater²⁰³. Podobnie może się stać w przypadku płaskiego czworoboku. Żagle nie mają stałej konstrukcji przenoszącej zewnętrzne obciążenia. Żeglarz decyduje i zmienia położenie linek tak, aby uzyskać właściwą siłę poruszającą żaglówką. Poza tym napięty żagiel ma formę powierzchni synklastycznej, jak w konstrukcjach pneumatycznych. Membrana zastosowana w zadaszeniach nie może aż tak mocno się odkształcać, a poza tym nie ma potrzeby, aby zmieniała swoje położenie. Dlatego celowo używana jest nazwa forma siodłowa, tak jak to jest w języku angielskim *saddle*. Kolejna forma, chociaż kształtem jest zbliżona do poprzedniej, powstaje przez napięcie membrany pomiędzy dwoma łukami. Została nazwana formą kolebkową. W języku angielskim używana jest nazwa *arch*. Można by to przetłumaczyć na formę łukową, ale bardziej sugerowałoby to element płaski, a nie przestrzenny. Sklepienie kolebkowe jest wycinkiem powierzchni walcowej, czyli powierzchni prostokreślnej, rozwijalnej. Natomiast w przypadku form uzyskiwanych z napiętych membran powierzchnie są o przeciwnej krzywiznie, jak to

²⁰² Wolfgang Rudolf Witrin, *Architektura pod żaglami, konstrukcje membranowe*. Budownictwo fachowe, nr 3, 2001, s. 14-19.

²⁰³ flater (ang. *flutter*) – łopotanie, nadmierne i niekontrolowane dynamiczne odkształcanie membrany.

już zostało wcześniej wyjaśnione. Powierzchnia taka nie jest powierzchnią rozwijalną, gdyż nie można jej uzyskać przez deformację płaskiego elementu bez nacinania i sklejania.

Forma fałdowa uzyskiwana jest w wyniku połączenia kilku osobnych paneli lub wprowadzenia dodatkowych cięgien tworzących wyraźne wewnętrzne krawędzie na powierzchni membrany. Nie chodzi tu o krawędzie brzegowe, ale o krawędzie, w których następuje załamanie powierzchni. Krawędzi położone wyżej od przylegających fragmentów membrany nazywane są grzbietowymi. W przypadku gdy położone są niżej, to nazywane są krawędziami koszowymi albo, tłumacząc z angielskiego, krawędziami dolinowymi. W przypadku krawędzi koszowych ważne jest zapewnienie szczelności pokrycia, gdyż wzdłuż nich spływa duża ilość wody deszczowej. Wewnętrzne wygięte krawędzie powodują, że przylegające fragmenty membrany nie są płaskie, ale mają podwójną krzywiznę. Nie jest to też układ składający się z połączonych osobnych form siodłowych, gdyż cięgno łączące sąsiednie panele wygięte jest w innej płaszczyźnie. Formy fałdowe można podzielić na takie, które tworzą układy zbliżone do równoległych lub promienistych.


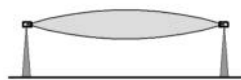

Ostatni rodzaj to forma wieloboczna. Łączy ona cechy form siodłowej i fałdowej oraz ma więcej wierzchołków położonych na różnych wysokościach. Zwykle miejsca zamocowania membrany umieszczone są na przemian – wysoko i nisko. Mimo mocno powyginanej krawędzi brzegowej forma ta najczęściej ma prawie płaski środek. Poza tym jest zbliżona do form fałdowych, ale nie ma wyraźnych krawędzi wewnętrznych – ani grzbietowych, ani koszowych.

Osobną grupę struktur tworzą membrany, których napięcie jest uzyskiwane dzięki różnicy

ciśnienia powietrza. Ciśnienie to powoduje, że membrana przyjmuje formę powierzchni o dodatniej krzywiznie Gaussa (powierzchni synklastycznej). Można je podzielić na trzy podstawowe typy, co schematycznie jest przedstawione w tabeli 4. W zależności od kształtu linii brzegowej i przygotowanego wykroju membrana jest wypychana na określoną wysokość. Aby ograniczyć tę wysokość stosowane są dodatkowe liny lub siatki o układach ortogonalnych lub radialnych. Wypukłej formie nadają one charakterystyczne zagłębienia i jednocześnie wzmacniają powłokę, ponieważ przejmują część sił rozciągających.

Tabela 4

Typy struktur pneumatycznych

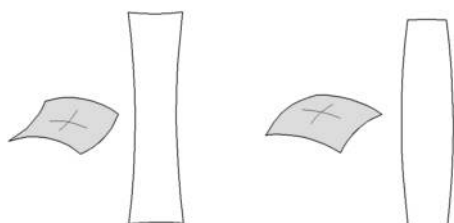
Schemat	Opis
	jednowłokowe, podtrzymywane powietrzem – typu hala
	dwuwłokowe, napinane powietrzem – typu poduszka lub wielokomorowy materac
	z komorami nośnymi np. w formie zamkniętych rękawów

Źródło: opracowanie własne

Władysław Borusiewicz²⁰⁴ podkreśla, że w przypadku struktur jednowłokowych konieczne jest przebywanie w przestrzeni o podwyższonym ciśnieniu, czyli wchodząc do wnętrza trzeba pokonać różnicę ciśnienia za pomocą różnego rodzaju rozwiązań technicznych, np. słuz powietrznych. Natomiast różnica ciśnienia wynosi zaledwie o 2,5-3,5 hPa, a to wystarczy do prawidłowego napięcia po-

²⁰⁴ Władysław Borusiewicz, *op.cit.*, s. 372.

włoki, ponieważ działa ono na dużej powierzchni. Struktury z komorami nośnymi ze względu na mniejszą powierzchnię, na którą działa ciśnienie powietrza, wymagają odpowiednio większego ciśnienia, aby utrzymać powłokę w stanie napiętym.



Il. 61. Schematyczny kształt brytów

Na il. 61 przedstawiony jest schematyczny kształt brytów występujących w powierzchniach antyklastycznych i synklastycznych. W pierwszym przypadku pas materiału zwęża się w środkowej części, a w drugim poszerza. Potwierdza to, że powierzchnie napiętych membran nie są powierzchniami rozwijalnymi, a próba uzyskania ich z prostokątnych płatów skazana jest na niepowodzenie.

4.2. Rodzaje podpór – stelaż

Napięta membrana nie może być samodzielną strukturą. Zawsze wymaga dodatkowych elementów, które służą do jej zamocowania, podparcia i odpowiedniego napięcia. Dzięki nim membranie nadawany jest odpowiedni kształt – o podwójnej krzywiznie. Są to różnego rodzaju słupy, ramy, liny oraz osprzęt mocujący. W przypadku zadaszeń, które są częścią budynku, konstrukcję główną stanowią: fundamenty, ściany i stropy. Konstrukcja ta może być wykonana z dowolnego materiału i dowolnych elementów. Natomiast konstrukcję służącą bezpośrednio do mocowania membrany

można nazwać stelażem, gdyż służy nie tylko podparciu, ale uzyskaniu określonego napięcia, dzięki któremu usztywnia wiotką membranę. Należy zwrócić uwagę, że słowo podpora, w przypadku struktur membranowych, może być źle rozumiane. Membrana nie tylko powinna być podparta od dołu, aby ją utrzymać na określonej wysokości, ale też musi być również zabezpieczona przed poderwaniem przez wiatr. W niektórych przypadkach konieczne są takie elementy, które ją napinają przez naciskanie od góry lub naciągają w dół. Poza tym napięcie membrany generuje bardzo duże siły poziome i nie wszystkie elementy konstrukcji mogą je przenieść.

Dla membrany istotne są miejsce przyłożenia siły oraz jej zwrot i kierunek. Zarówno słup, jak i cięgno może nadawać membranie podobny kształt. Sztywny słup lub zastrzał może wypychać membranę z jednej strony, ale podobny efekt można uzyskać, stosując cięgno, które będzie ciągnąć membranę z drugiej strony. W dodatku cięgno, dzięki temu, że podobnie jak membrana jest wiotkie, może lepiej z nią współpracować. Dzięki przemieszczaniu się razem z powłoką powoduje bardziej równomierny rozkład naprężeń w membranie. Szerzej o zasadach projektowania konstrukcji cięgowych w publikacjach Szymona Pałkowskiego²⁰⁵.

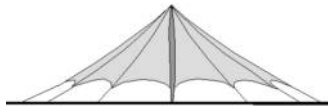
Heino Engel²⁰⁶ w swojej klasyfikacji przedstawił, że punkty wysokie powierzchni mogą być uzyskane za pomocą:

- podpór wewnętrznych,
- podpór zewnętrznych,
- podwieszonych punktów,
- wiszących słupów.

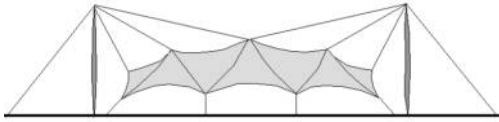
Wytrzymałość tkaniny jest wielokrotnie mniejsza od elementów ją utrzymujących, dlatego

²⁰⁵ Szymon Pałkowski, *Konstrukcje stalowe, wybrane zagadnienia obliczania i projektowania*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010, s. 67-85.

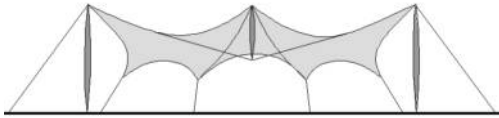
²⁰⁶ Heino Engel, *op.cit.*, p. 58.



Il. 62. Podpora wewnętrzna



Il. 63. Podwieszane punkty

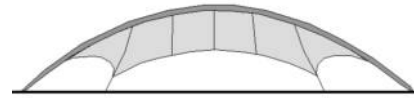


Il. 64. Wiszący słup

konieczne są elementy pośrednie, zwiększające długość lub powierzchnię zamocowania. Zbyt duże, skupione obciążenie może doprowadzić do rozdarcia membrany. Poza tym włóknista struktura tkaniny powoduje, że ma ona mniejszą wytrzymałość na rozdarcie niż na rozciąganie. W przypadku materiału uszkodzonego

lub celowo naciętego obciążenie jest przenoszone tylko przez kilka pojedynczych nitek. Bardzo istotne jest stosowanie takich połączeń, aby obciążenia były przenoszone równomiernie przez całą powłokę, a w przypadku wystąpienia nawet małych uszkodzeń, powinny być natychmiast reperowane.

Podpory liniowe, które służą do zamocowania membrany wzdłuż całej krawędzi bardziej równomiernie przenoszą obciążenia. Poza tym dzięki temu, że są wygięte np. łuk jednocześnie nadają krzywiznę napiętej membranie.



Il. 65. Podpora łukowa

Na il. 66 przedstawiono podział sposobów zamocowania membrany. Istotne jest również to, czy element mocujący może przemieszczać się wraz z powłoką. Podmuchy wiatru powodują powstanie obciążeń dynamicznych i to o znacznych wartościach, dlatego stosowanie sztywnych podpór nie jest wskazane, lepiej współpracują podpory podatne, które przemieszczają się wraz z powłoką. Prawidłowo zaprojektowana struktura membranowa,



Il. 66. Podział sposobów zamocowania membrany

mająca podwójną krzywiznę, pod wpływem zewnętrznych obciążeń odkształca się, ale po ich ustąpieniu powraca do swojego pierwotnego położenia. Podwójna krzywizna powoduje, że niezależnie od kierunku działania obciążenia wzrasta rozciąganie membrany, a po ustąpieniu powraca ona do stanu równowagi. Jeśli krzywizna jest niewielka, to łopotanie może się nasilać i doprowadzić do wyrwania powłoki ze sztywnej konstrukcji lub uszkodzić inne elementy konstrukcji.

Membrana powinna być równomiernie naprężona we wszystkich kierunkach, aby prawidłowo utrzymywać kształt. Można to osiągnąć tylko wtedy, gdy powłoka jest mocowana wzdłuż wszystkich krawędzi brzegowych. Z praktyki montażowej wynika, że łatwiej jest napiąć membranę używając większej liczby elementów łączących niż próbować, na etapie wykonania, uzyskać idealny kształt. Łatwiej jest wtedy zlikwidować fałdy i wyregulować napięcie. Fałdy na membranie nie tylko wizualnie psują efekt gładkiej, delikatnie wygiętej powierzchni. Świadczą też o nieprecyzyjnym wykonaniu membrany, ale przede wszystkim są skutkiem niewłaściwego rozkładu naprężeń, niezgodnego z kierunkami włókien w tkaninie. Ulega ona wtedy szybszemu zniszczeniu, przedarcie, zabrudzeniu itp. Jednak użycie mniejszej liczby elementów łączących lub bardziej ukrytych czyni rozwiązanie bardziej finezyjnym.

Niezależnie od rodzaju elementu konstrukcyjnego lub sposobu zamocowania tkanina powinna być zabezpieczona przed rozdarciem wzdłuż wszystkich krawędzi brzegowych. Najprostszym sposobem jest podwinięcie brzegu. W żaglach już od setek lat stosowane było obszywanie krawędzi tzw. liklinką – wykonane z naturalnych włókien. Obecnie stosowane



Il. 67. Brzeg membrany wzmocniony taśmą keder

wane jest zawijanie brzegu wokół linki wykonanej z włókien poliestrowych, nazywanej keder²⁰⁷. Linka lub wałek z tworzyw sztucznych nie jest napięta, ale stanowi jedynie wypełnienie, zwiększające grubość zakończenia. Dla przyspieszenia prac wykończeniowych często pojedyncza tkanina zgrzewana jest z gotową taśmą brzegową z zatopioną linką. Powstałe w ten sposób pogrubienie brzegu jest wykorzystywane do mocowania z innymi elementami konstrukcji. W przypadku gdy membrana jest mocowana bezpośrednio do cięgna, to w tunel powstały z zawinięcia tkaniny wsuwana jest lina wraz z okuciem.

Membrana w pierwszej kolejności mocowana jest do stałych elementów konstrukcji. W drugiej zaś do elementów, które pozwalają na zmianę napięcia, aby można było je później regulować. Oznacza to zatem, że jeden kierunek jest – „stały”, a drugi – „zmienny”. Szwy, ze względu na to, że są wykonane z podwójnej tkaniny są mniej rozciągliwe. Poza tym, bryty cięte są w kierunku zbliżonym do włókien osnowy, co daje im większą sztywność, niż w kierunku wątku. To wszystko powoduje, że szwy najczęściej położone są w kierunku „stałym”. Przykładem mogą być powłoki oparte na dwóch łukach, w których szwy biegną od łuku

²⁰⁷ Keder – linka lub taśma brzegowa służąca wzmocnieniu brzegu membrany.

do łuku. Inny przykład to formy stożkowe lub lejowe, w których szwy biegną od wewnętrznego pierścienia do zewnętrznych krawędzi (od wierzchołka do podstawy). Nie wszystkie sposoby zamocowania membrany pozwalają na zmianę. Dużo większą swobodę i regulację można uzyskać przez stosowanie elementów wiotkich zamiast sztywnych. Długość liny można zmienić przez skręcenie lub rozkręcenie śruby rzymskiej. Trudniej jest wydłużyć belkę lub słup, chyba że wcześniej przewidział to projektant. Na pewno nie można płynnie zmienić wygięcia łuku lub średnicy pierścienia. Dlatego często stosowane są łączniki pośrednie, które pozwalają na drobne korekty zamocowania. Innym sposobem jest stosowanie fartuchów, wykonanych z dodatkowego pasa tkaniny. Spełniają one przede wszystkim funkcję elementu uszczelniającego połączenie, aby woda nie przedostawała się na drugą stronę w miejscu łączenia membrany. Dzięki temu można również próbować zasłonić nieprecyzyjne połączenia. Oczywiście o kunszcie danego wykonawcy świadczą wielkość połączeń i ich precyzja. Najlepszy efekt uzyskuje się, kiedy połączenia są niewidoczne.

Bryty wycinane są na podstawie wykrojów. Obecnie wystarcza wersja elektroniczna wykroju, gdyż wykorzystywane są plotery, które służą do precyzyjnego cięcia tkaniny. Plotery takie pozwalają na cięcie brytów o szerokości produkowanej tkaniny, najczęściej poniżej 2,5 m, natomiast długość sięga do 10 m, a czasami więcej. Przygotowane bryty łączone są za pomocą maszyn HF (*high frequency*), czyli wykonywane jest połączenie przez docisk dwóch elementów i zagrzanie ich do ściśle określonej temperatury za pomocą fal o wysokiej częstotliwości. Połączenia takie często

nazywane są szwami, ze względu na tradycyjne nazewnictwo występujące w języku polskim, mimo że obecnie tkanin technicznych nie łączy się przez szycie. Dziurawienie igłą i przeciąganie nitki nie dawałoby odpowiedniej szczelności, wytrzymałości, a poza tym byłoby bardziej pracochłonne.

Odpowiednio przygotowany panel, ze wzmocnionymi brzegami za pomocą taśmy keder oraz z miejscami do przeciągnięcia linek, czyli rękawami brzegowymi, jest gotowy do transportu na budowę. Czasami w fabryce wzdłuż krawędzi brzegowych mocowane są okucia, które używane są do zamocowania membrany do konstrukcji podporowej. Aby proces budowania przebiegał sprawnie, musi być wcześniej przygotowany. Montaż wykonywany jest na dużej wysokości, a znaczne wymiary poszczególnych paneli powodują mocne obciążenie ciężarem własnym. Jeśli jest to możliwe, do rękawów wprowadzane są wcześniej liny brzegowe. Adam Sierzan²⁰⁸ wymienia najczęściej stosowane metody napinania powłoki i od razu wskazuje najczęściej popełniane błędy montażowe. Potwierdza to potrzebę doświadczonych firm, które są w stanie prawidłowo zrealizować zamierzenia architekta.



Il. 68. Panel membrany przygotowany do zamocowania na stadionie w Lublinie

²⁰⁸ Adam Sierzan, *Architektura tekstylna*. Budownictwo fachowe, nr 4/2000, s. 25-27.

Podczas transportu membrana musi być zabezpieczona, aby nie uszkodziły jej ostre elementy. Chodzi tu o elementy zewnętrzne, jak części pojazdu, dźwigu, np. hak, czy części wewnętrzne, czyli okucia, które są już połączone z membraną. Dlatego membrana jest delikatnie zwijana i pakowana w dodatkowy materiał ochronny (najczęściej jest to jakiś rodzaj folii). Podobnie musi być ona rozpakowana na miejscu montażu. Przy sprzyjających warunkach pogodowych, przede wszystkim przy braku wiatru, można prowadzić montaż membrany. Pod wpływem podmuchu wiatru duża powierzchnia nienaprzężonej membrany może spowodować poderwanie lub zrzucenie montażu z konstrukcji. Jeśli jest to możliwe, to najlepiej umieścić zapakowaną membranę na konstrukcji. Nie zawsze jest przygotowane lub dostępne bezpieczne miejsce, aby rozwijać ją na ziemi. Podczas rozwijania może też dojść do uszkodzenia membrany o elementy konstrukcji, dlatego wtedy konieczne są dodatkowe siatki lub taśmy, które pozwolą na rozwinięcie i umieszczenie we właściwym miejscu. Podczas mocowania membrana musi być naprzężana stopniowo, bez użycia dużych sił, aby nie doprowadzić do jej rozerwania. Dobrze

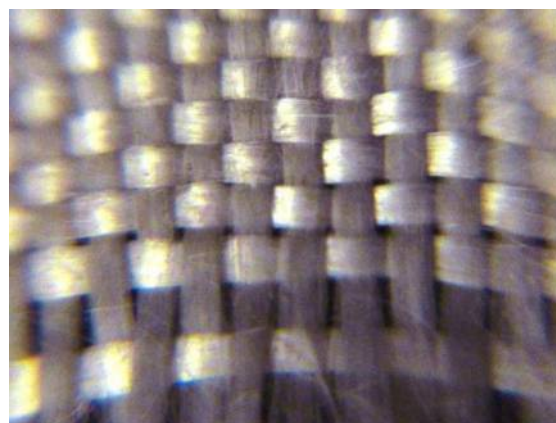


Il. 69. Montaż membrany w amfiteatrze w Żywcu

jest, jeśli ma odpowiednie wystające elementy lub otwory, które można wykorzystać do jej naciągnięcia. W ostatniej kolejności następuje regulacja naprężenia wstępnego. Zmieniana jest długość lin przez skręcenie śrub rzymskich lub nakrętek na okutych ciągnach brzegowych.

4.3. Materiał membrany

Właściwości materiału budowlanego wpływają na wygląd rozwiązania architektonicznego lub decydują o jego wymiarach, ale nie mają wpływu na formę. Natomiast w przypadku struktur membranowych decydują również o jej kształcie. Wynika to ze specyficznych właściwości materiału, z którego jest wykonana powłoka. Najczęściej struktury te wykonywane są z tkaniny technicznej, czasem z folii lub ze specjalnej siatki. Jeszcze mniej istotny dla architekta jest proces powstawania materiału, ale ułatwia zrozumienie zasad, jakimi należy kierować się, projektując formę obiektu z napiętą membraną.



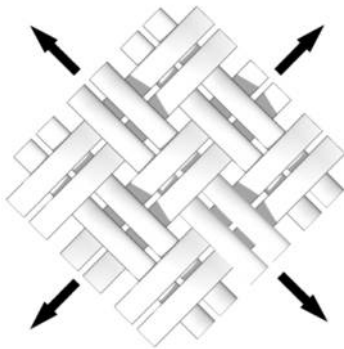
Il. 70. Włókna tkaniny bazowej

Tkanina powstaje w procesie przeplatania nitki naciągniętej osnowy²⁰⁹ z prostopadle biegnącymi nitkami wątku²¹⁰. Następnie tkanina bazowa pokrywana jest dodatkowymi war-

²⁰⁹ Osnowa – nitki biegnące wzdłuż produkowanej tkaniny, bardziej naprężone podczas produkcji co powoduje, że tkanina ma w tym kierunku większą wytrzymałość.

²¹⁰ Wątek – nitki wplecione w poprzek tkaniny, mają nieco mniejszą wytrzymałość na zrywanie.

stwami dla zwiększenia trwałości i nadania jej odpowiednich parametrów. W zależności od sposobu przeplatania, kolejności oraz ilości nitki powstaje określony splot. Najprostszym jest splot płócienny, ale w membranach częściej używany jest splot „panama”, w którym dwie nitki osnowy przeplatane są dwiema nitkami wątku. Dzięki temu tkanina jest gęsta, a nitki są bardziej wyprostowane. Proces przeplatania powoduje, że włókna są delikatnie wygięte, a to przy rozciąganiu powoduje ich prostowanie i wydłużenie materiału. Napięta membrana przenosi siły rozciągające, ale nie powinna zachowywać się jak sprężyna. Przede wszystkim wewnętrzna struktura samego materiału powinna być zgodna z kierunkami sił działającymi na membranę, tak jak to jest przedstawione na il. 71. Poza tym konstrukcja podporowa powinna umożliwiać równomierne napięcie tkaniny oraz umożliwiać korygowanie go po pewnym czasie.



Il. 71. Kierunki sił rozciągających w tkaninie

Podczas przygotowania wykrojów niezbędne jest określenie głównych kierunków układu nitki w membranie oraz układu szwów, według których dzielona jest powłoka na bryty. Kierunek działania sił rozciągających musi być zgodny z układem nitki, w przeciwnym razie nitki zaczynają się przemieszczać, deformować, a zewnętrznym skutkiem tego jest fałdowanie membrany. Najbardziej jest to widoczne przy obciążeniu skośnym do układu nitki w tkaninie.

W obliczeniach wytrzymałościowych przypisywane są właściwości materiału oraz przewidywane obciążenie wiatrem i śniegiem. Wielkością trudną do określenia jest elastyczność materiału. Producenci tkaniny podają wielkości otrzymywane z badań laboratoryjnych, na podstawie testów na rozciąganie. Tkanina często ma różne wartości, w zależności od kierunku włókien – inne są wzdłuż włókien osnowy, a inne wzdłuż włókien wątku. Wycinane bryty nie są prostokątami, więc współczynniki są wartością wypadkową. Najbardziej wiarygodne wydają się badania próbek materiału metodą dwuosiową. Oznacza to, że próbka jest jednocześnie i równomiernie rozciągana w dwóch kierunkach, choć w zadaniach nie zawsze membrana jest rozciągana z tą samą siłą we wszystkich kierunkach. Materiał membrany ma tendencję do pełzania, czyli wydłużenia pod wpływem długotrwałego obciążenia. Inaczej mówiąc występuje relaksacja, czyli zmniejszenie naprężenia wynikającego z wydłużenia materiału. Jego wielkość zależy od rodzaju materiału, przy czym bardziej widoczna jest dla tworzyw sztucznych (włókna poliestrowe). Aby temu zapobiec, stosuje się kompensację, czyli celowo zmniejsza się wymiar danego brytu, aby po wydłużeniu spowodowanym obciążeniem, uzyskać właściwy wymiar końcowy. Taki, który pasuje do konstrukcji podporowej, aby powłoka była równomiernie napięta, bez żadnych fałd. Stosowanie kompensacji powoduje, że po kilku cyklach obciążeniowych uzyskiwane jest właściwe naprężenie i w miarę stałe wymiary. Prawidłowo zaprojektowana membrana musi mieć tak dobrany sposób zamocowania, aby po pewnym czasie można było dokonywać korekty naprężenia, ale aby nie było to zbyt częste.

Programy komputerowe precyzyjnie określają wykroje, dzieląc przestrzenny model na płaskie bryty. Następnie automatycznie wycinany jest

ich kształt z płaskiego pasa tkaniny technicznej. Ważne jest takie podzielenie powłoki, aby uzyskać małą liczbę szwów. Poszczególne bryty powinny mieć maksymalnie proste formy, a ich szerokość nie powinna być większa niż wymiary produkowanej tkaniny. Linie szwów nie powinny być złożone, bo może to utrudniać wycięcie, a następnie łączenie. Ogranicza się przy tym ilość odpadów. Sam kierunek szwów na powłoce powinien być tak dobrany, aby woda nie zatrzymywała się na połączeniach, tylko spływała z górnych brytów na dolne.

Pierwsze struktury membranowe wykonywane były z naturalnych włókien roślinnych. Powodowało to nasiąkanie tkaniny pod wpływem wilgoci, zwiększało jej masę i przedostawanie się wody na drugą stronę. Pomiedzy włóknami rozwijały się niszczące ją grzyby, a większa masa mogła doprowadzić do zerwania materiału. Stosowanie impregnacji przez podgumowanie jeszcze bardziej zwiększało masę powłoki i obciążenie całej konstrukcji. Obecnie stosowane membrany mają strukturę wielowarstwową²¹¹. Poza tkaniną bazową stosowane są dodatkowe warstwy pokrywające i wykończeniowe dla poprawy właściwości. Mimo to o takich cechach jak:

- wytrzymałość na rozciąganie,
- stabilność wymiarów,
- wydłużenie,
- przezroczystość,

decyduje rodzaj tkaniny bazowej.

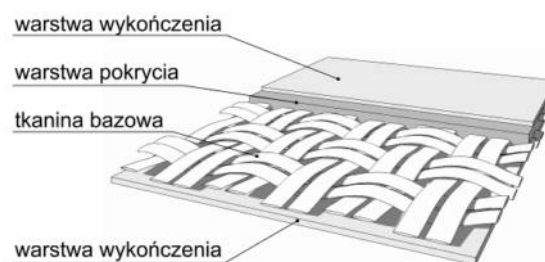
Natomiast rodzaj pokrycia decyduje o:

- szczelności,
- odporności na światło i wodę,
- przezroczystości,
- odporności na przetarcie,
- możliwości łączenia.

Dodatkowo istotna jest właściwa współpraca tkaniny bazowej i pokrycia, która decyduje o:

- odporności na rozdarcie,
- odporności ogniowej,
- przyczepność pokrycia.

Tkanina bazowa wykonywana jest z włókien poliestrowych (PES) i włókien szklanych, dzięki temu membrana jest lekka i trwała. Oba materiały mocno różnią się między sobą. Włókna poliestrowe są lekkie, wytrzymałe i elastyczne, ale nie są odporne na promieniowanie ultrafioletowe. Natomiast włókna szklane mają większą wytrzymałość na rozciąganie i wysoką temperaturę, ale za to są bardziej kruche i mniej elastyczne. Tkanina z włókien poliestrowych pokrywana jest polichlorkiem winylu (PCW), który zwiększa szczelność materiału, wypełnia przerwy pomiędzy włók-



Il. 72. Struktura wielowarstwowej membrany

nami oraz chroni je przed promieniowaniem ultrafioletowym. Dla zapewnienia lepszych parametrów membrany pokrywane są one dodatkowymi warstwami wykończeniowymi: akrylem, lakierem ochronnym z polifluorkiem winylidenu (PVDF) lub lakierem z dwutlenkiem tytanu (TiO_2), które nadają powłoce właściwości samoczyszczące²¹². Tkanina z włókien szklanych pokrywana jest politetrafluoroetylenem (PTFE) lub silikonem, co daje jej

²¹¹ Adam Zagubień, *Materiały tekstylne stosowane w konstrukcjach namiotowych*. Materiały budowlane nr 11, 2003, s. 76.

²¹² Eberhard Schnunck, Hans Jochen Oster, Rainer Barthel, Kurt Kiessl, *op.cit.*, s. 218-227.

większą przezroczystość²¹³. Ponieważ temperatura topnienia PTFE wynosi 327°C, więc jedynie może być stosowana na włókna szklane, których temperatura topnienia jest wyższa. Klasyfikacja ogniowa zalicza tkaninę z włókien szklanych jako niepalną, a z włókien poliestrowych pokrytych PCW jako trudno palną, nierozprzestrzeniającą ognia. Politetrafluoroetylen (PTFE) ma wyjątkowe właściwości chemiczne, praktycznie nie łączy się z innymi związkami, co czyni go materiałem, do którego nie przywiera brud, a opady deszczu powodują splukiwanie kurzu. Niestety większa trwałość materiału wiąże się z większymi kosztami, nie tylko samego materiału, ale też sposobów jego łączenia i zamocowania. Wolfgang Witrin²¹⁴ szacuje, że koszty realizacji konstrukcji z membraną z włókien szklanych pokrytych PTFE przekraczają dwukrotnie podobną kon-

strukcję wykonaną z membrany z włókien poliestrowych pokrytych PCW.

Najnowszym materiałem jest tkanina z włókien ePTFE pokrytych fluoropolimerem. Materiał ten jakby łączy cechy obu wcześniejszych, a dodatkowo ma o wiele większą przepuszczalność światła, dochodzącą do 38%²¹⁵.

W tabeli przedstawione są wytrzymałości na rozciąganie i rozdarcie niektórych materiałów, zastosowanych między innymi w przedstawionych zadaszeniach. Należy tu zauważyć, że wytrzymałość na rozciąganie podawana jest dla paska materiału o szerokości zaledwie 5 cm. Jaromir Pepliński²¹⁶ dla porównania napisał, że pas membrany o szerokości 1 m może utrzymać blok betonu o objętości 6,5 m³. Natomiast dowolnej szerokości membrana po nacięciu prostopadle do kierunku obciążenia przenosi obciążenie kilkakrotnie mniejsze.

Tabela 5

Porównanie danych dotyczących wytrzymałości materiałów membranowych

Włókna	Rodzaj materiału	Rozciąganie [N/50 mm]	Rozdarcie [N]
poliestrowe pokryte PCW	Ferrari Precontraint 1202 Fluor-top T2	5600/5600	800/650
	Mehler FR 650-2	2800/2700	300/270
	Mehler Technologies Valmex® FR 1000 typ III – Mehatop F	6000/5500	900/800
	Mehler Technologies Valmex® FR 1400 typ IV – Mehatop F	7500/6500	1200/1200
szklane pokryte PTFE	Saint Gobain Sheerfill II	7000/6000	500/500
	Verseidag Duraskin b 18059	8000/7000	500/500
ePTFE pokryte fluoropolimerem	Sefar Architecture Tenara 4T40HF	4000/4000	798/752

Źródło: opracowanie własne na podstawie kart udostępnionych przez producentów

²¹³ Karsten Moritz, *Membranwerkstoffe im Hochbau*. Detail 6/2000, p. 1050-1054.

²¹⁴ Wolfgang R. Witrin, *Architektura pod żaglami, konstrukcje membranowe*. Budownictwo fachowe, nr 3, 2001, s. 15.

²¹⁵ <http://www.tenarafabric.com/4t40.html> (13-03-2014).

²¹⁶ Jaromir Pepliński, *Membrany dookoła świata*. Zawód architekt 4/2011, s. 64-66.

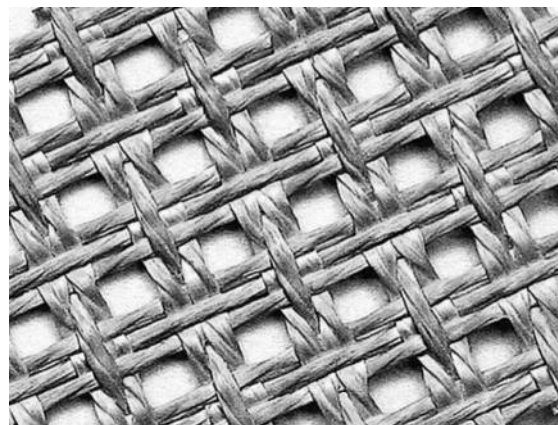
Nawet niewielkie lokalne rozdarcie może być początkiem dalszego, bardzo szybkiego, procesu niszczenia całej membrany, dlatego tak ważne jest dla gospodarza obiektu niezwłoczne naprawianie wszelkich uszkodzeń.

Innym materiałem, z którego wykonywane są struktury membranowe jest folia ETFE (etyleno-tetrafluoroetylen). Nie ma struktury włóknistej, dlatego ma podobne właściwości we wszystkich kierunkach. Mimo to, aby zapewnić jej właściwe napięcie, powinna być zamocowana ze wszystkich stron, z podobnym naprężeniem wstępnym. W przypadku folii napięcie najczęściej uzyskiwane jest przez wykorzystanie ciśnienia powietrza. Wypełniana jest wewnętrzną przestrzeń wielowarstwowych poduszek. Napompowanie niezgodne z przewidywanym podczas wyznaczania wykrojów też może powodować powstawanie fałd w pobliżu krawędzi.

Folia ETFE jest materiałem wiotkim, tak jak inne rodzaje membran, ale jego wytrzymałość na rozciąganie jest mniejsza. W związku z tym powłoki mogą mieć rozpiętości od kilku do kilkunastu metrów. Największą zaletą tego materiału jest jego przepuszczalność światła, sięgająca 95%, przy bardzo małej masie własnej²¹⁷. Folia może być podobna do szkła, ale za to jest kilkadziesiąt razy lżejsza. Najczęściej wykorzystywana jest w formie wielobocznych poduszek lub rękawów o dowolnej długości, dlatego konieczna jest stosunkowo gęsta konstrukcja wsporcza. Architekt może pozwolić sobie na swobodę w jej kształtowaniu, ale dzięki odpowiednio dobranemu układowi konstrukcji podtrzymującej. Natomiast forma napiętej folii wynika z wielkości ciśnienia powietrza pompowanego do wnętrza poduszki.

Dużą zaletą folii ETFE są jej właściwości chemiczne, nie ulega korozji, czyli stopniowemu niszczeniu oraz odporna jest na promie-

niowanie ultrafioletowe. W dodatku sama przepuszcza promieniowanie ultrafioletowe, czego nie można powiedzieć o szkłe. Materiał ten, podobnie jak PTFE, nie łączy się z innymi związkami i nie przywiera brudu, a ewentualny kurz splukiwany jest przez wodę deszczową. Poza tym folia ma bardziej gładką powierzchnię niż tkanina. Dzięki temu nie wymaga kosztownego mycia, jak to jest w przypadku szkła. Podczas próby rozciągania wydłuża się prawie trzykrotnie, co powoduje, że widoczne jest działanie obciążenia. W razie potrzeby można zapobiec ich skutkom. Nie można tego przewidzieć w przypadku szkła. Nadmierne obciążenie nie jest widoczne aż do momentu gwałtownego i nieodwracalnego pęknięcia materiału.



Il. 73. Siatka elewacyjna stadionu we Wrocławiu

Trzeci rodzaj materiału stosowanego w strukturach membranowych to ażurowe siatki. Najczęściej są stosowane jako osłony elewacyjne. Wykonywane są z poliestrowych nitok lub metalowych drutów. Dla zwiększenia przejrzystości stosowane są specjalne sploty, o dużej odległości pomiędzy nitkami. Nie są narażone na takie obciążenia jak pozostałe rodzaje membran, ponieważ ażurowy materiał nie gromadzi wody i nie stawia takiego oporu dla wiatru. Poza tym pionowe położenie przy ścianie ogranicza siłę wiatru. Nadrukowane siatki

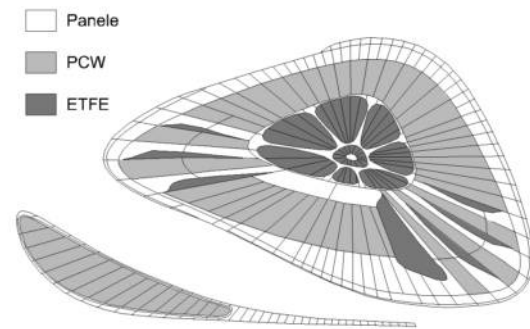
²¹⁷ Frank Kaltenbach, *Translucent Materials: Glass, Plastics, Metals*, Edition Detail, 2004, p. 65.

stosowane są jako reklamy wielkoformatowe, czasami przysłaniające elewacje całych budynków. Częściowo ograniczają dopływ światła, ale też chronią wnętrze przed przegrzaniem. Ażurowość materiału pozwala też na widok na zewnątrz obiektu oraz uzyskiwanie ciekawych efektów przy wieczornym podświetleniu. Przy braku podwójnej krzywizny nawet mocno napięte siatki, zwłaszcza o większych wymiarach, mogą przemieszczać się przy wietrze i uderzać o elewację. Dlatego sposób zamocowania i napięcia jest również istotny tak jak przy innych rodzajach konstrukcji.



Il. 74. Stalowa siatka elewacyjna Pawilonu M w Hanowerze

Niezależnie od zastosowanych materiałów charakterystyczną cechą membran jest to, że są wiotkie i wymagają odpowiedniego ukształtowania i napięcia. W przypadku kiedy tkanina usztywniana jest przez zastosowanie np. żywicy epoksydowej, nie można zaliczać jej do struktur membranowych, chociaż te materiały są coraz częściej łączone. W miejscach, gdzie niezbędna jest większa trwałość stosowane są sztywne panele. Natomiast w miejscach, w których potrzebne jest zwiększone przepuszczanie światła stosowana jest folia ETFE.



Il. 75. Plan mobilnego pawilonu Chanel

Przykładem takiego obiektu, w którym pozornie zastosowano membranę, a w rzeczywistości są to trzy różne materiały jest mobilny pawilon Chanel zaprojektowany przez Zahę Hadid²¹⁸. Na il. 75 zostały zaznaczone miejsca, gdzie znajduje się membrana wykonana z włókien poliestrowych pokrytych PCW oraz miejsca, gdzie znajduje się folia ETFE. Pozostałe elementy dachu i ścian są wykonane ze sztywnych paneli w białym kolorze i o wysokim połysku.

4.4. Zalety i wady materiałów

Informacje dotyczące właściwości stosowanych materiałów zostały ograniczone do minimum ze względu na główny cel dotyczący kształtowania napiętych membran. Architekt projektując zadaszenie membranowe, musi jednak, poza doбором właściwej formy, uwzględniać ograniczenia wynikające z przepisów dotyczących bezpieczeństwa: konstrukcji, pożarowego i użytkowania obiektu, a wybierając określony materiał budowlany zobowiązany jest sprawdzić czy ma odpowiednie atesty.

W tabeli 6 przedstawione zostały główne cechy materiałów występujących w strukturach membranowych te, które powinny być brane

²¹⁸ Jan Knippers, Jan Cremers, Markus Gabler, Julian Lienhard, *Atlas Kunststoffe + Membranen - Werkstoffe und Halbzeuge Formfindung und Konstruktion*, Edition Detail, Munchen 2010, p. 249.

pod uwagę przy podejmowaniu decyzji o ich zastosowaniu. Należy zaznaczyć, że niektóre cechy dotyczą tylko określonych rodzajów materiału, z którego wykonana jest membrana. Inne występują dla tkaniny technicznej, a inne dla folii. Poza tym poszczególne cechy mogą być jednocześnie zaletą i wadą zastosowania określonego materiału. Przedstawione cechy są bardzo ogólne, wynikającą nawet ze stereotypów postrzegania materiału, jakim jest membrana. Natomiast pominięto właściwości fizyczne i chemiczne, które są mierzalne i bardziej szczegółowo pozwalają na porównanie membrany z innymi materiałami.

Architekt potrzebuje argumentów, aby uzasadnić swoją propozycję zanim inwestor zdecyduje się na określone rozwiązanie. Główną cechą, która tu nie została wymieniona jest możliwość nadawania im dowolnej formy. Teoretycznie architekt ma dużą swobodę w kształtowaniu zadaszeń membranowych, pozwalają mu na uzyskanie odmiennych form przestrzennych, ale wymagają także odpowiedniej wiedzy dotyczącej zasad kształtowania.

Przedstawione w tabeli cechy zostały zebrane na podstawie opinii, z którymi zetknął się autor.

Tabela 6

Zalety i wady materiałów membranowych

Cechy ogólne		
Zalety	Cecha	Wady
pozwalają na realizowanie olbrzymich obiektów	lekkie, o małej gęstości	wymagają odpowiedniego zamocowania, aby nie były podrywane przez wiatr
pozwalają na stosowanie w ruchomych elementach		wymagają odpowiedniego połączenia, aby podczas przemieszczania nie traciły na szczelności
pozwalają uzyskać dużą rozpiętość ze względu na dużą wytrzymałość w porównaniu do masy	wytrzymałe na rozciąganie	w porównaniu z innymi materiałami budowlanymi są dużo słabsze
pozwalają na zwijanie lub fałdowanie pokrycia bez utraty szczelności (z włókien poliestrowych)	wiotkie, o braku sztywności	brak wytrzymałości na ściskanie i zginanie wymaga odpowiedniego ukształtowania i napięcia, aby nie ulegały przemieszczeniom pod wpływem obciążeń
pozwalają na realizację obiektów tymczasowych o krótkim okresie użytkowania	mniej trwałe	wymagają wymiany pokrycia, co zwiększa koszty użytkowania, powoduje to, że traktowane są jako gorsze, mniej szlachetne, chociaż inne materiały również wymagają odnawiania
pozwalają zaoszczędzić energię dzięki wykorzystaniu światła dziennego	przepuszczają światło	wymagają dodatkowych przysłon dla zapewnienia zaciemnienia
pozwalają zaoszczędzić energię na klimatyzację w pomieszczeniach zamkniętych, sprawdzają się nawet w przestrzeni otwartej	odbijają promieniowanie słoneczne	wymagają umiejętnego mycia, mogą powodować odbicia i oślepiac

cd. tabeli 6

pozwalają ograniczyć widok przez powłokę, wgląd do wnętrza lub na zewnątrz	nieprzezroczyste (tkanina techniczna)	powodują ograniczanie widoku przez powłokę, wgląd do wnętrza lub na zewnątrz
pozwalają na widok przez powłokę	przezroczyste (folia ETFE)	udostępniają widok przez powłokę, mogą wymagać dodatkowych zasłon
wyglądają atrakcyjnie, wyróżniają się spośród innych materiałów budowlanych	jasne, błyszczące, gładkie, efektowne	brudzą się i wymagają umiejętnego mycia (te o gorszych parametrach)
pozwalają na stosowanie w zadaszniach i ścianach, nie wymagają dodatkowych izolacji przeciwwilgociowych, pozwalają na szczelne zamknięcie przestrzeni	nie przepuszczają wody i powietrza	utrudniają wentylację i gromadzą wilgoć
pozwalają na wymianę ciepła przez przegrodę	przewodzą ciepło	powodują straty ciepła zamkniętych ogrzewanych pomieszczeń
pozwalają na tworzenie ekranów kierujących strumień akustyczny, przy właściwym ukształtowaniu mogą poprawiać akustykę przestrzeni	częściowo odbijają dźwięki	mogą powodować odbijanie przypadkowych dźwięków i powodować powstawanie szumu
pozwalają na częściowe odbieranie dźwięków, może to zachęcać do uczestniczenia w imprezie	przepuszczają dźwięki	nie zatrzymują niskich dźwięków, co powoduje wydostawanie się hałasu
pozwalają na szybkie stawianie tymczasowych obiektów lub tylko osłon, w miejscach katastrof	proste do wykonania	postrzegane są jako elementy nietrwałe, prowizoryczne
pozwalają na wyróżnienie obiektu, dodatkowo detale techniczne nadają bardziej nowoczesny wygląd	nowoczesne	wymagają wyjątkowej umiejętności łączenia z innymi elementami architektonicznymi
stwarzają pozory, że mają inne właściwości niż są w rzeczywistości	pozornie miękkie, delikatne, elastyczne	nie są właściwie postrzegane przez projektantów i użytkowników
nawiązują do historii i tradycyjnych symboli, np. namiotów w krajach Bliskiego Wschodu i Północnej Afryki	tradycyjne, historyczne	wymagają umiejętności łączenia ich z niektórymi formami architektonicznymi, czasami po prostu nie pasują
Na etapie projektowania		
Wydają się bardzo atrakcyjne ze względu na to, że rzadziej występują	kosztowne, mało popularne	wymagają wyspecjalizowanych obliczeń wytrzymałościowych
pozwalają na zastosowanie najnowszych metod i narzędzi projektowania architektonicznego	nowe technologie projektowania parametryczne	wymagają najnowszych metod i narzędzi projektowania architektonicznego
mogą częściowo samodopasować się do konstrukcji i wyrównać powstałe deformacje	nieliniowe	powodują trudne do określenia odkształcenia i przemieszczenia

cd. tabeli 6

Na etapie budowania		
pozwalają na przygotowanie gotowych elementów i szybki montaż	szybkie w realizacji	traktowane są jako ostatni, nieistotny etap budowy, co powoduje często niepotrzebne problemy
Na etapie użytkowania		
zalety tego materiału dostrzegane są dopiero po wielu latach, kiedy inne materiały musiały być wymienione na inne, wtedy okazuje się, że poniesione koszty były uzasadnione	kruche, delikatne (z włókien szklanych)	wymagają delikatnego użytkowania gdyż mogą ulec uszkodzeniu
podczas pożaru samoistnie i szybko powstają otwory, przez które wydostaje się dym	topią się w wysokiej temperaturze, (z włókien poliestrowych)	nieodporne na wysoką temperaturę
mogą być łączone z elastycznymi ogniwami fotowoltaicznymi	produkują energię	pokrycie ogniwami ogranicza przepuszczalność światła
Na etapie rozbiórki		
łatwy i szybki demontaż, ułatwiony transport pozostałości	lekkie mała masa	czasami wymagają dodatkowych konstrukcji ze względu na występujące napięcie membrany
materiał do ponownego wykorzystania, recycling, folia ETFE prawie 100%	ekologiczne	jedynie przez wyspecjalizowane firmy

Źródło: opracowanie własne

5. STAŁE ZADASZENIA W POLSCE



Il. 76. Lokalizacja wybranych obiektów z zadaszeniami membranowymi w Polsce

Jak to już zostało wcześniej zaznaczone, do badań wybrano 39 przykładów: 19 amfiteatrów, 9 stadionów i 11 innych obiektów. Przede wszystkim są to zadaszenia miejsc, gdzie przebywają widzowie imprez kulturalnych lub sportowych. Mało jest obiektów związanych z wypoczynkiem i spożywaniem posiłków oraz kilka jest przykładów związanych z transportem, a dokładnie miejscem oczekiwania na pociąg lub autobus.

Dla porównania poszczególnych obiektów przygotowane zostały plany zadaszeń, wszystkie w tej samej skali 1:1000. Niestety wielkość niektórych obiektów, zwłaszcza stadionów, powoduje, że nie jest możliwe przedstawienie ich w całości. W takich przypadkach wybrano jedynie reprezentatywne fragmenty lub powtarzalne moduły. Dzięki zastosowaniu tej samej

skali możliwe jest porównanie wielkości poszczególnych paneli. Wszystkie plany są zorientowane, na ilustracjach pokazano sposób ustawienia danego zadaszenia względem stron świata. Przedstawione rysunki nie są typowymi planami zagospodarowania terenu, są to raczej schematy ukazujące sposób zamocowania membrany. Stałe obiekty kubaturowe zostały nieco uproszczone, natomiast membrany uszczegółowiono, pokazując sposoby zamocowania. Podparcie membrany elementami sztywnymi takimi jak: belki, ramy, łuki i pierścienie zostało oznaczone linią grubą ciągłą. Natomiast zamocowanie membrany elementami wiotkimi, jak ciągną brzegowe lub grzbietowe, zostało oznaczone linią grubą punktową. W niektórych zadaszeniach występują linie koszarowe, w których znajdują się ciągną napi-

nające. Dla rozróżnienia ich od ciągów grzbietowych oznaczono je linią grubą kreskową.

5.1. Amfiteatry

Najwięcej zrealizowanych obiektów z zadaszeniami membranowymi na terenie Polski to szeroko rozumiane amfiteatry. Warunki atmosferyczne w naszym kraju sprzyjają w organizowaniu imprez plenerowych w okresie letnim. Najwięcej tego typu wydarzeń organizowanych jest w miejscowościach wypoczynkowych, w których przebywa więcej turystów. Większość amfiteatrów „pamięta” czasy minionej epoki i tylko niektóre z nich mają zadaszenia. Często są to prowizoryczne konstrukcje o małej wartości architektonicznej. Poza tym obecne rozwiązania systemowe budowy ru-

chomych scen estradowych pozwalają na organizowanie bardzo dużych imprez bez jakichkolwiek stałych elementów budowlanych. Właściciele terenów rekreacyjnych muszą brać również pod uwagę stałe koszty utrzymywania obiektów. Zniechęca to potencjalnych inwestorów do budowania lub modernizowania istniejących amfiteatrów.

Opisane w dalszej części monografii obiekty przedstawione są w kolejności powstawania. Pozwala to na prześledzenie rozwoju w projektowaniu i budowaniu. Doświadczenia zdobyte podczas realizacji poszczególnych obiektów umożliwiały wprowadzanie korekt w następnych projektach, a nowe materiały budowlane stawały się coraz bardziej dostępne.

5.1.1. Nieistniejące zadaszenie Opery Leśnej w Sopocie

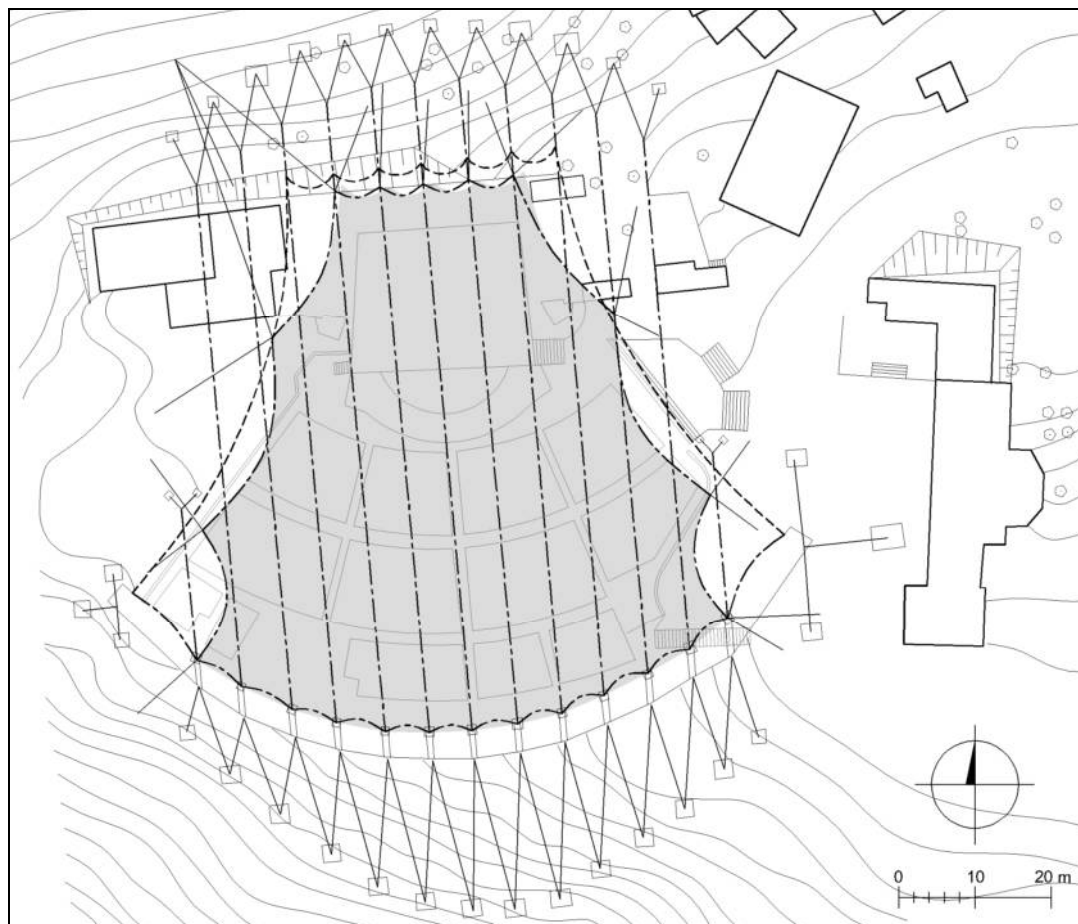
Lokalizacja:	Sopot, ul. Moniuszki 12,
Projektant:	Stefan Listowski, Janusz Kowalski, Eugeniusz Suliński,
Oddanie:	1964

Pierwszym przykładem jest zadaszenie Opery Leśnej w Sopocie, które zostało wykonane w 1964 roku. Amfiteatr powstał już w 1909 roku²¹⁹. Położony jest w naturalnym zagłębieniu, pomiędzy morenami Trójmiejskiego Parku Krajobrazowego, nieco odsunięty od centrum miasta. Od samego początku miał bardzo dobrą akustykę. Zadanie to było rozwieszane jedynie w okresie letnim i przez wiele lat stanowiło niedościgły wzór. Widownia miała 4 335 miejsc siedzących²²⁰. Mimo obaw, które pojawiały się podczas projektowania, zadanie to nie pogorszyło akustyki amfiteatru. Zamocowane na stałe liny pozwala

ły na zwijanie i rozwijanie powłoki. Specjalnie przygotowana konstrukcja podporowa umożliwiała zdejmowanie membrany na okres zimy. Niestety zadanie uległo poważnemu uszkodzeniu już w tym samym roku, w którym powstało. Podczas gwałtownej sierpniowej wichury membrana została rozerwana w kilku miejscach. Konieczne były całkowita wymiana materiału powłoki oraz korekta systemu podtrzymującego. Wprowadzono wtedy dodatkowe boczne punkty mocujące, które zwiększyły krzywiznę. Poza tym, zmniejszono powierzchnię zadania przez zwiększenie wycięć bocznych. Na il. 77 przedstawiono różnicę

²¹⁹ *Opera Leśna - Obiekty - Bałtycka Agencja Artystyczna BART*, <http://bart.sopot.pl/obiekty/opera-lesna> (10-01-2014).

²²⁰ Danuta Kochanowska, *Gdańskie dachy powłokowe*. Architektura 1/1965.



Il. 77. Plan nieistniejącego zadaszenia Opery Leśnej w Sopocie

między wersją pierwszą (bez wycięć) a wersją drugą (mniejszą). Pierwsza membrana wykonana była z impregnowanej tkaniny z włókien bawełnianych. Po kilku latach wymieniono materiał membrany na lżejszy ze względu na obawy o wytrzymałość konstrukcji podporowej. Drugim materiałem była tkanina z nici poliamidowych. Coroczny proces rozwieszania i chowania membrany pozwalał gospodarzowi obiektu na naprawy drobnych uszkodzeń. Ze względu na rangę organizowanych w amfiteatrze imprez i transmisje telewizyjne, zadaszenie stało się pierwowzorem wielu późniejszych zadaszeń. Do modernizacji obiektu, która rozpoczęła się w 2009 roku, było to największe zadaszenie membranowe w Polsce. Jego wielkość, po korekcie, wynosiła 4 250 m², przy

rozpiętości 90 m. Od 1992 roku membrana była wykonana z włókien poliestrowych²²¹ pokrytych PCW w barwnych pasach. Intensywne kolory wyróżniały obiekt wśród leśnej zieleni. Natomiast podczas imprez barwne pasy czasami konkurowały ze scenografią i trzeba je było zasłaniać. Charakterystyczny, siodłowy kształt zapewniał dobrą akustykę. Zadaszenie Opery Leśnej stało się wzorem dla zadaszenia sezonowego amfiteatru w Połczynie Zdroju i zadaszenia nad widownią amfiteatru w Ustroniu.

Konstrukcja zadaszenia oparta była na układzie równoległych lin zamocowanych do prostych słupów kratownicowych. Dzięki temu podczas transportu membrana nie zmieniała swojej szerokości. Za słupami znajdowały się

²²¹ Paweł Kłosowski, *Projektowanie przekryć z tkanin technicznych*. Politechnika Gdańska, <http://www.pom.piib.org.pl/attachments/article/166/Konspekt.pdf> (9-12-2015).



Il. 78. Widok nieistniejącego zadaszania Opery Leśnej w Sopocie

odciągi równoważące obciążenia poziome. Za widownią znajdowało się 15 słupów, które podtrzymywały 13, a później 11 lin nośnych oraz pomost roboczy, służący do transportu zwiniętej membrany. Podobnie za sceną znajdowało się 11 słupów ustawionych pomiędzy drzewami. Były prawie niewidoczne pomiędzy pniami drzew. Wszystkie urządzenia do transportu i napinania były ręczne. Po linach prze-

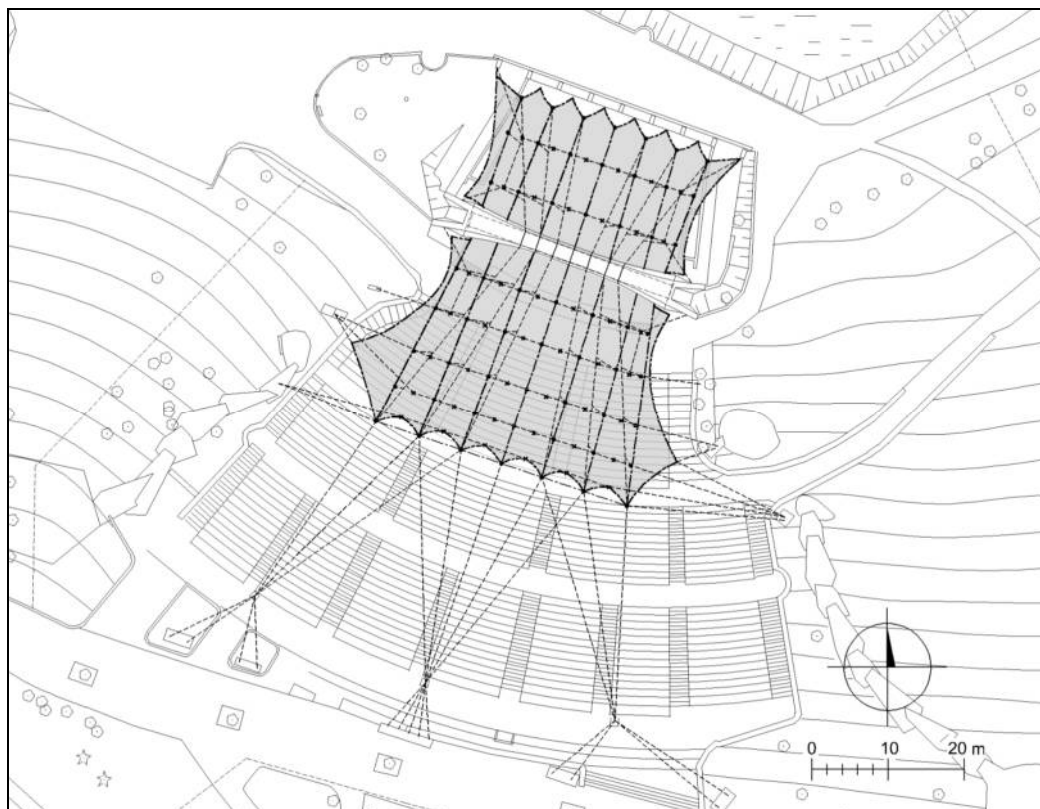
suwane były wózki służące do zamocowania membrany. Liny nośne odsunięte były od siebie na odległość $6,0 \div 6,2$ m, natomiast odległości pomiędzy wózkami wynosiły $2,0 \div 3,0$ m. Na środku znajdowało się aż 29 punktów, gdzie membrana była przymocowana do liny nośnej^{222, 223}. Główne obciążenia przenosiły liny, a powłoka już tylko niewielką część, ze względu na dużą liczbę zamocowań.

5.1.2. Zadaszenie Teatru Letniego w Szczecinie

Lokalizacja:	Szczecin, ul. Juliana Fałata 2,
Projektant:	Fiuk Firma Inżynieryjno-architektoniczna, Marcin Fiuk,
Konstrukcja:	Andrzej Rybarczyk, Roman Kisiel,
Wyk. membrany:	Zakład Konfekcji Technicznej Polnam w Częstochowie,
Oddanie:	2000

²²² Centralne Laboratorium Przemysłu Filcowego i Tkanin Technicznych w Łodzi, *Opracowanie technologii produkcji i WT na tkaninę, taśmę i nici z przędzy poliestrowej przeznaczonych na powłokę dachową Opery Leśnej w Sopocie*. 1967.

²²³ Zakład Konfekcji Technicznej Polnam, *Przekrycie teatru plenerowego „Opera Leśna” w Sopocie*. 1989.



Il. 79. Plan zadaszenia Teatru Letniego w Szczecinie

Drugi bardzo duży amfiteatr na Pomorzu to Teatr Letni w Szczecinie. Położony jest w malowniczym parku, którego historia sięga 1900 roku. Nieopodal obecnego amfiteatru znajduje się małe jezioro stanowiące atrakcję tego parku. Amfiteatr powstał na miejscu wcześniejszej prowizorycznej estrady. Charakterystyczna forma łupinowego zadaszenia z olbrzymim żelbetowym łukiem została zaprojektowana przez Zbigniewa Abrahamowicza²²⁴. Poza zadaszeniem sceny, koncepcja zakładała również ciekawie ukształtowaną widownię z elementami małej architektury, wykonanymi również z betonu. Na widowni przewidziano blisko 4 500 miejsc siedzących. Budowę prowadzono w latach 1973–1976, w czasach deficytu cementu, dlatego prace toczyły się bardzo powoli. Ostatecznie zreali-

zowano jedynie żelbetowy łuk bez zadaszenia, a na to miejsce wprowadzono niewielkie stalowe zadaszenie uzupełnione brezentowym. Na żelbetowych słupach zamocowane były urządzenia do napinania lin, a pomiędzy ramionami łuku zaprojektowany został ruchomy pomost służący do podnoszenia i utrzymywania ekranu kinowego^{225, 226}.

W 2000 roku ze względu na zły stan techniczny trzeba było wymienić zadaszenie. Zastąpiono je nowym, pierwszym w Polsce, stałym zadaszeniem membranowym. Autorem projektu był Marcin Fiuk. Wykorzystując istniejący żelbetowy łuk, projektant zaproponował podwieszenie membrany zamocowanej do złożonego przestrzennego układu lin. Zadaszenie zakryło stosunkowo dużą scenę (970 m²) i 1/3 widowni. Zaproponowano membranę

²²⁴ Amfiteatr w Parku Kasprowicza w Szczecinie, <http://architektura-w-szczecinie.blogspot.com/2013/07/amfiteatr-w-parku-kasprowicza-w.html> (26-05-2015).

²²⁵ Krótka historia szczecińskiego Teatru Letniego, <http://www.architekturakrajobrazu.info/przestrze-miejska/141/1994-krotka-historia-szczeciskiego-teatru-letniego> (3-05-2015).

²²⁶ Teatr Letni w Szczecinie, https://pl.wikipedia.org/wiki/Teatr_Letni_w_Szczecinie (26-05-2015).

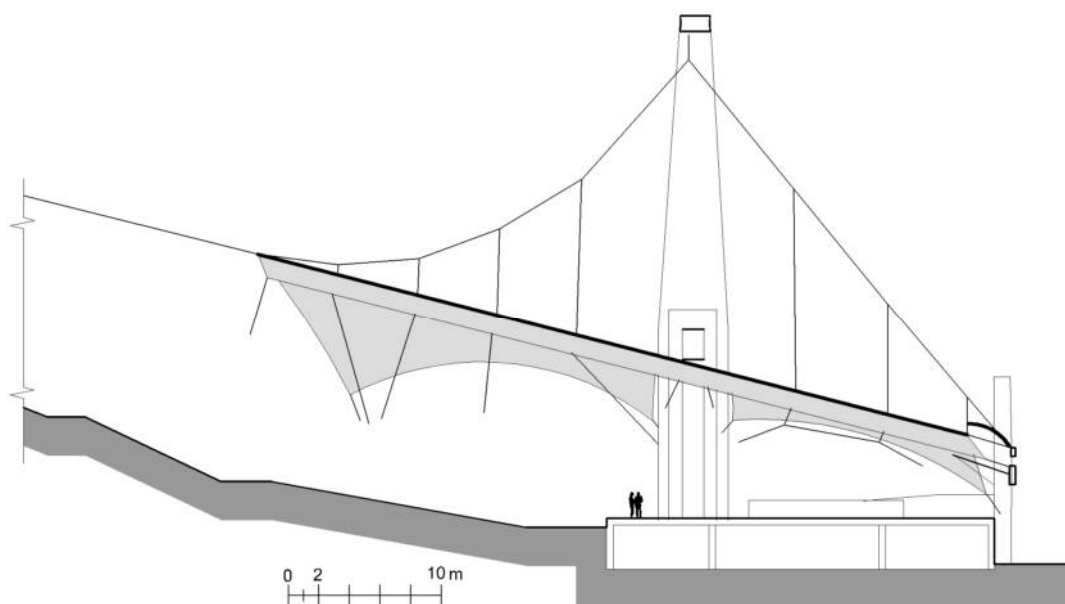


Il. 80. Widok zadaszenia Teatru Letniego w Szczecinie

w kształcie pofałdowanej pochyłej powłoki. Inspiracją, według architekta, było zadaszenie Centrum Sony w Berlinie. Poza zapewnieniem odpowiedniej wytrzymałości na obciążenia śniegiem i wiatrem jednym z najważniejszych aspektów było zapewnienie dobrej akustyki. Dobór właściwego pochylecia i samo ukształtowanie powłoki udało się wyjątkowo dobrze. Kształt powłoki uzyskano za pomocą na przemian położonych krawędzi grzbietowych i koszowych. Wzdłuż 7 krawędzi grzbietowych (górných) znajdują się liny nośne i punkty zamocowania do lin podtrzymujących. Natomiast krawędzie koszowe (dolne) powstały w wyniku zamocowania membrany do lin poprzecznych, napinających poszczególne pasy. Zamocowanie do lin poprzecznych, zabezpiecza przed podrywaniem powłoki przez wiatr. Mimo że zadaszenie jest wykonane z membrany, to nie ma charakterystycznych krzywizn, krawędzie wewnętrzne są proste. Występujące pomiędzy nimi panele są prawie płaskimi

pasami membrany. Sztywność zadaszenia zapewnia układ lin zewnętrznych, niezwiązanych bezpośrednio z membraną. Ciężna grzbietowe podwieszono są w 9 punktach do układu lin podtrzymujących. Dla zapewnienia właściwego naprężenia wstępnego każdy pas membrany zamocowano w 9 punktach. Długości poszczególnych linek łączących membranę z linami nośnymi lub napinającymi zostały tak dobrane, aby krawędzie grzbietowe były proste. Dzięki temu uproszczona została geometria zadaszenia i zaoszczędzono na materiale.

Ze względu na obawy o czystość powłoki zastosowano materiał nieprzepuszczający światła. Jest to jedyny polski przykład wśród omawianych w tej monografii, w którym przyjęto takie rozwiązanie. Chociaż większość imprez odbywa się przy sztucznym świetle, to brak częściowej transparentności nie jest aż tak istotny. Natomiast w ciągu dnia pod takim zadaszeniem jest wyraźnie ciemniej, co zwiększa wizualnie jego ciężar.



Il. 81. Przekrój przez zadaszenie Teatru Letniego w Szczecinie

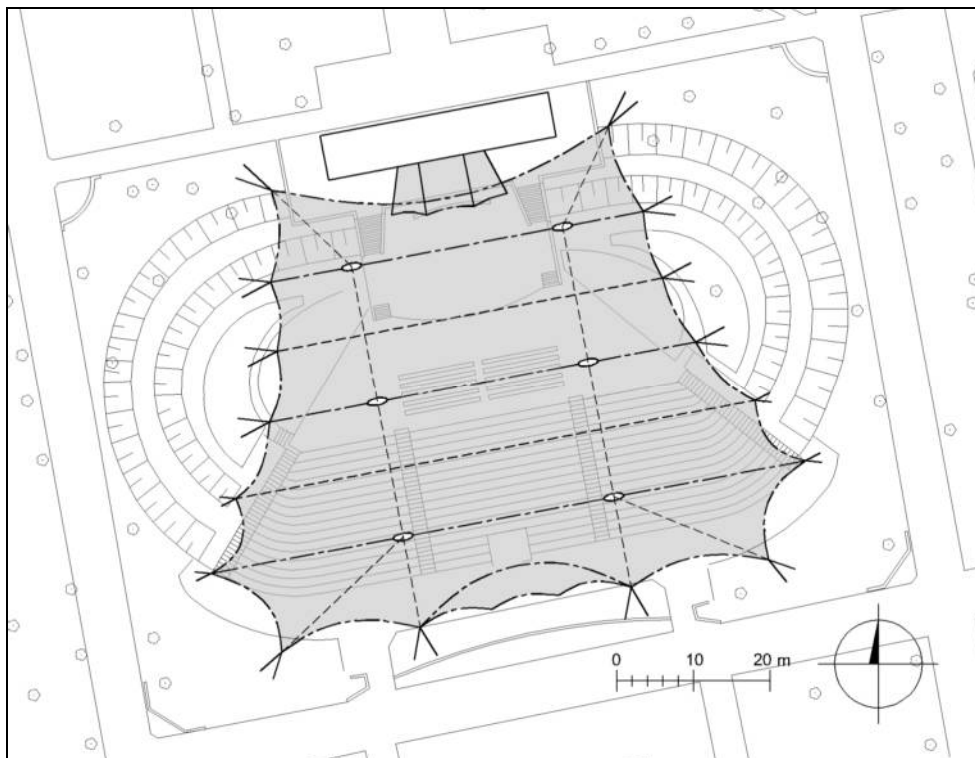
5.1.3. Amfiteatr w parku Sowińskiego w Warszawie

Lokalizacja:	Warszawa, ul. Elekcyjna 17,
Projektant:	A77 Pracownia Architektoniczna,
Konstrukcja:	Habest,
Wyk. membrany:	Canobbio, PS
Oddanie:	2002

Kolejnym przykładem, w którym stale wykorzystywane jest zadaszenie membranowe jest amfiteatr w parku Sowińskiego na Woli w Warszawie. Sam obiekt powstał już w latach 60. XX wieku, natomiast w 2002 roku został zadaszony. Koncepcję modernizacji amfiteatru wykonała pracownia A-77. Pod dachem znalazła się scena i cała widownia na 2 000 miejsc²²⁷. Mimo swoich wymiarów, amfiteatr jest dobrze wkomponowany w układ drzew, które go skutecznie przysłaniają. W tym czasie w Polsce nie było jeszcze firm realizujących tego typu zadaszenia, dlatego szukano wykonawcy za granicą. Najkorzystniejszą cenę za-

proponowała włoska firma Cannobio. Konstrukcja zadaszenia oparta jest na 6 słupach i 32 zakotwieniach. Zadaszenie ma formę połażowanej powłoki. Na przemian położone krawędzie grzbietowe i koszowe dzielą powłokę na 6 połaci. Duże różnice wysokości pomiędzy punktami, w których powłoka jest podparta, a krawędziami koszowymi powoduje, że wydaje się jakby to był układ 6 połączonych modułów. Różnice te powodują również, że poszczególne fragmenty są mocno pochylone i śnieg bardzo szybko zsuwa się po membranie do krawędzi koszowych.

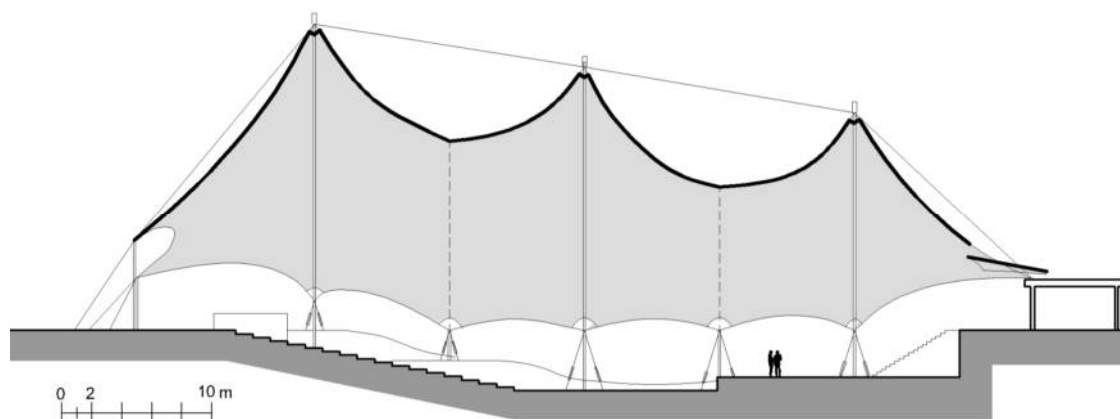
²²⁷ Amfiteatr w Parku Sowińskiego, <http://okwola.ehost.pl/amfiteatr/> (12-06-2013).



Il. 82. Plan amfiteatru w parku Sowińskiego w Warszawie



Il. 83. Widok zadaszzenia amfiteatru w parku Sowińskiego w Warszawie



Il. 84. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w parku Sowińskiego w Warszawie

Główna powłoka przygotowana za granicą została na miejscu uzupełniona dodatkowymi elementami. Mocne wycięcie powłoki, z tyłu widowni, zostało wypełnione przez wstawienie dodatkowego, prawie płaskiego elementu membrany. Nad tylną częścią sceny, a dokładnie pomiędzy budynkiem zaplecza a sceną wprowadzono dodatkowe, niezależne zadaszenie oparte o dach budynku. Obie korekty wynikały z konieczności ochrony przed zacinającym deszczem. Widać w tym przykładzie, że zastosowane profesjonalne metody obliczeniowe pozwoliły na optymalne ukształtowanie powłoki. Ciężna grzbietowa i koszowa mają widoczne wygięcie, a rozpięta pomiędzy nimi membrana nie jest płaska. Krawędzie brzego-

we zadaszenia znajdują się stosunkowo nisko, co powoduje, że zadaszenie dobrze chroni z boków, mimo że nie ma ścian. Membrana wykonana jest z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Mimo zakładanego, jedynie sporadycznego, obciążenia śniegiem²²⁸ zadaszenie nie było ani razu demontowane na zimę. Prowadzona bieżąca kontrola, prawidłowe utrzymanie i mycie obiektu powodują, że jest on w dobrym stanie technicznym. Elementy mocowania membrany i cięgien są stosunkowo proste technicznie. Widoczne są mechanizmy służące np. do naprężania cięgien, co powoduje, że całość wygląda może mało nowoczesnie, ale na pewno jest sprawna i łatwa w obsłudze.

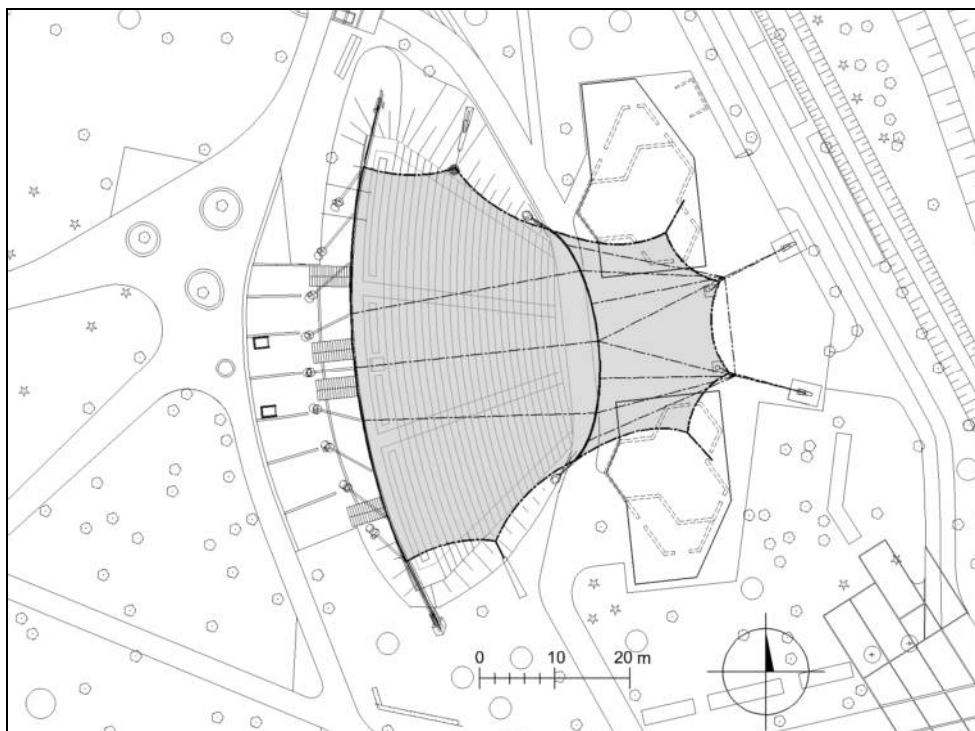
5.1.4. Amfiteatr w Ustroniu

Lokalizacja:	Ustroń, Parkowa,
Projektant:	Pracownia Architektoniczna Gałkowski + Partnerzy, Marcin Gałkowski,
Konstrukcja:	Pracownia Inżynierska PROJEKT, Marian Krężel,
Wyk. membrany:	HP Gasser A.G.
Oddanie:	2003, 2010

Amfiteatr w Ustroniu położony jest w Parku Miejskim, w niewielkiej odległości od promenady nad rzeką Wisłą, w sąsiedztwie linii kole-

jowej. Miejscowość stanowi turystyczną atrakcję Beskidu Śląskiego, głównie odwiedzaną przez mieszkańców aglomeracji śląskiej.

²²⁸ Struktura nośna zadaszenia powłokowego Amfiteatru w Parku im. gen. J. Sowińskiego, <http://okwola.ehost.pl/amfiteatr/> (10-01-2013).



Il. 85. Plan zadaszenia amfiteatru w Ustroniu

Władze gminy zaproponowały modernizację amfiteatru z podziałem na dwa etapy. Pierwszy obejmował realizację zadaszenia nad samą widownią, ponieważ scena już miała metalowe zadaszenie. Konkurs ogłoszony przez gminę Ustroń przewidywał wykonanie lekkiego zadaszenia membranowego. Zaproponowane warunki konkursu prawdopodobnie nawiązywały do zadaszenia Opery Leśnej w Sopocie. Koncepcję wygrała pracownia Marcina Gałkowskiego. Podczas projektowania, jak podkreśla autor koncepcji, forma zadaszenia ewoluowała. Od początku jednak była oparta na dwóch łukach. Zmieniały się warianty, wielkość, ustawienia i pochylenia łuków. Podobnie podczas konsultacji z wykonawcą analizowane były wielkości bocznych wycięć, ale przede wszystkim zmieniane było położenie środkowych punktów kotwiących, czyli miejsc, w których membrana jest naciągana w dół^{229, 230}. Zadaszenie zostało zrealizowane w 2003 roku.

Było to pierwsze w Polsce, o takich wymiarach, zadaszenie membranowe. Wykonane zostało przez firmę ze Szwajcarii. Konstrukcja oparta została na dwóch stalowych łukach. Tylny łuk, za widownią, ma rozpiętość 70 m. Przedni łuk, nad sceną, ma natomiast rozpiętość 35 m. Oba łuki są odchyłone od siebie i nawiązują do sprawdzonego układu hali w Raleigh w Stanach Zjednoczonych, zaprojektowanej przez Macieja Nowickiego. Odległość pomiędzy wierzchołkami łuków wynosi 32 m. Aby układ był stabilny, tylny łuk został podparty stalowymi prętami, które przy dużym obciążeniu od śniegu pracują jak odciały, a w przypadku niekorzystnych podmuchów wiatru – jak zastrzały. Same łuki wykonane są z giętych rur. Aby zwiększyć wytrzymałość łuków, ale jednocześnie zastosować gięte rury, zaproponowano łuki dwugąździowe z przewiązką. W tym czasie nie było możliwości wykonania giętych łuków o większej średnicy,

²²⁹ Marcin Gałkowski, *Membrana*. Architektura & Biznes 9/2003.

²³⁰ *Amfiteatr w Ustroniu*. Architektura-Murator 7/2004.



Il. 86. Widok zadaszenia amfiteatru w Ustroniu

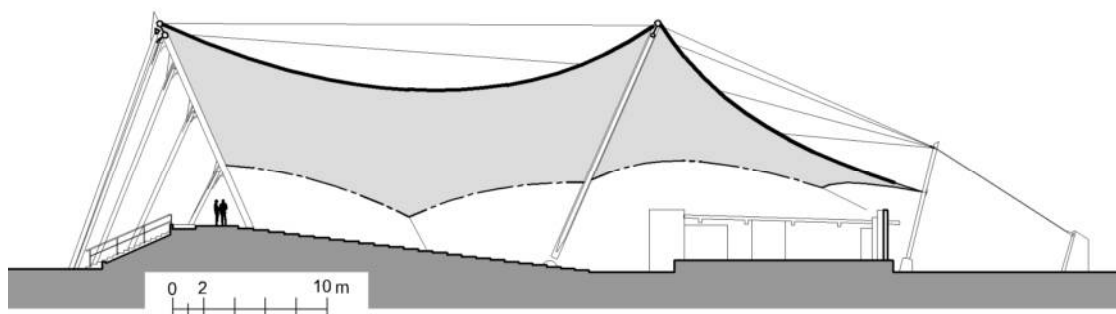
chyba że spawanych odcinkami z prostych rur. Taki wariant został odrzucony przez projektantów już na samym początku. Przedni łuk pełni funkcję napinającą całą membranę. Oparty jest na przegubowych połączeniach. Za łukiem, nad sceną, znajdują się odciąg, które dają możliwość zwiększania napięcia. W praktyce okazało się, że ciężar samego łuku jest na tyle duży, że wystarcza do uzyskania odpowiedniego naprężenia układu. Ciężna w okresie letnim są wyraźnie zluźwane, natomiast przy obciążeniu śniegiem są zabezpieczeniem przed niewłaściwym pochyleniem łuku. Pomiędzy łukami znajdują się dodatkowe ciężna, które zwiększają bezpieczeństwo układu. Gdyby doszło do pęknięcia membrany, ciężna przejmą obciążenie i nie dopuszczą do przewrócenia łuków.

Membrana rozpięta pomiędzy łukami ma kształt pojedynczej powierzchni siodłowej. Duże różnice wysokości i mocno wygięte łuki powodują, że powłoka jest prawidłowo

ukształtowana. Dodatkowy naciąg pomiędzy łukami zabezpiecza membranę przed podrywaniem przez wiatr i nadaje jej przeciwną krzywiznę. Membrana pomiędzy łukami nie ma żadnych dodatkowych wzmocnień. Wykonana jest z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Poniżej membrany znajduje się dodatkowa lina, która przy bardzo dużym obciążeniu śniegiem tworzy wyraźny grzbiet.

Początkowo obawiano się o wytrzymałość i trwałość membrany, dlatego do drugiego etapu modernizacji amfiteatru przystąpiono dopiero po kilku latach. Wymieniono widownię pod zadaszeniem membranowym. Obecnie liczy ona 2 650 miejsc²³¹. Przebudowano budynki zaplecza, rozebrano stare, metalowe zadaszenie nad sceną i przedłużono zadaszenie membranowe nad scenę. Wykorzystano wcześniejsze miejsca kotwienia odciągów do zamocowania membrany nad sceną. Zadaszenie to jest rozwieszane przez cały rok, co na terenach podgórskich, przy obciążeniu śniegiem, jest

²³¹ Gałkowski i Partnerzy, Projekt budowlany. Przebudowa Amfiteatru i Parku Zdrojowego w Ustroniu. 2006.



Il. 87. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w Ustroniu

nie lada wyzwaniem. Wykorzystana biała, półprzezroczysta tkanina chroni przed nagrzananiem w ciągu dnia, a wieczorem, od dołu, stanowi interesujące tło dla wizualnych efektów

osiągniętych podświetleniem. Obecnie powierzchnia tego zadaszenia wynosi 1 700 m². Drugi etap przebudowy zakończył się w lipcu 2010 roku.

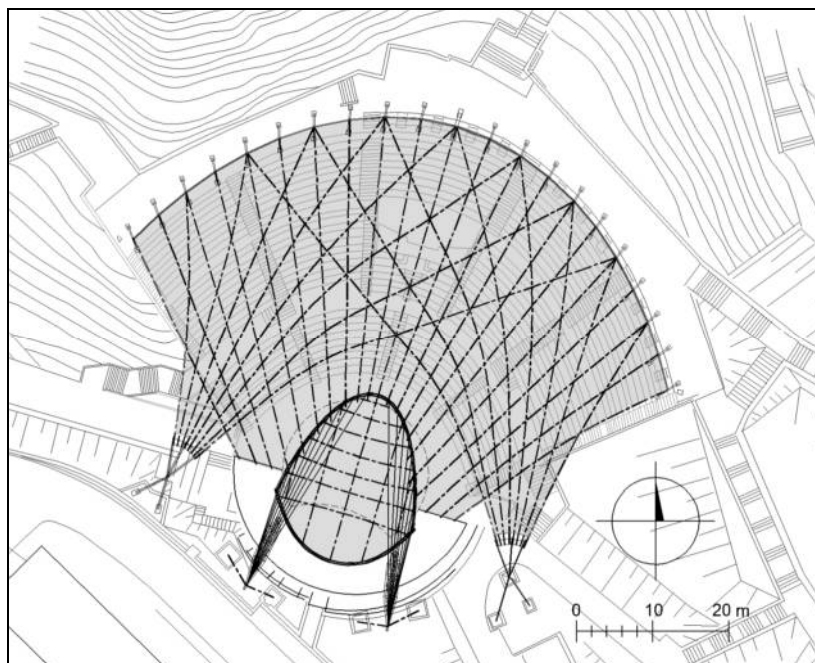
5.1.5. Amfiteatr w Płocku

Lokalizacja:	Płock, ul. Rybaki 15,
Projektant:	Modern Construction Systems, Wojciech Rzyński,
Konstrukcja:	Modern Construction Systems, Henryk Nowacki,
Wyk. membrany:	Sport halls,
Oddanie:	2008

Amfiteatr w Płocku znajduje się u podnóża starego miasta. Wkomponowany jest w prawobrzeżną skarpy wiślaną. Pierwszy amfiteatr powstał w miejscu dawnego osuwiska gruntu już w latach 60. XX wieku. Naturalne zagłębienie i ciekawy widok na rzekę czyniły go bardzo atrakcyjnym. Jednak zmieniające się warunki gruntowe, wynikające z podnoszącego się poziomu wód w Wiśle, spowodowały obawę o dalszą erozję skarpy. Jedną z przyczyn podniesienia lustra wody była budowa zapory we Włocławku. Konieczne były prace wzmacniające skarpy w kilku miejscach. Jednym

z najbardziej niebezpiecznych miejsc było zagłębienie u podnóża hotelu. Powstała koncepcja wzmocnienia skarpy przez przebudowę istniejącego amfiteatru²³². Chodziło o to, żeby odciążać górną część skarpy i dociążyć dolną. Poza tym wprowadzenie stałych kotwi gruntowych na głębokość 30 m oraz wierconych pali żelbetowych miało ustabilizować podłoże. Projektanci z firmy Modern Construction Systems z Poznania zaproponowali lekką konstrukcję ciągnową, którą zamocowano do tych pali. Aby maksymalnie odciążać konstrukcję, zaproponowano użycie najlżejszego pokrycia,

²³² Modern Construction Systems, Projekt wykonawczy. Umocnienie Skarpy Wiślanej na odcinku od Hotelu Starzyński do Katedry wraz z budową Amfiteatru w Płocku. 2003.



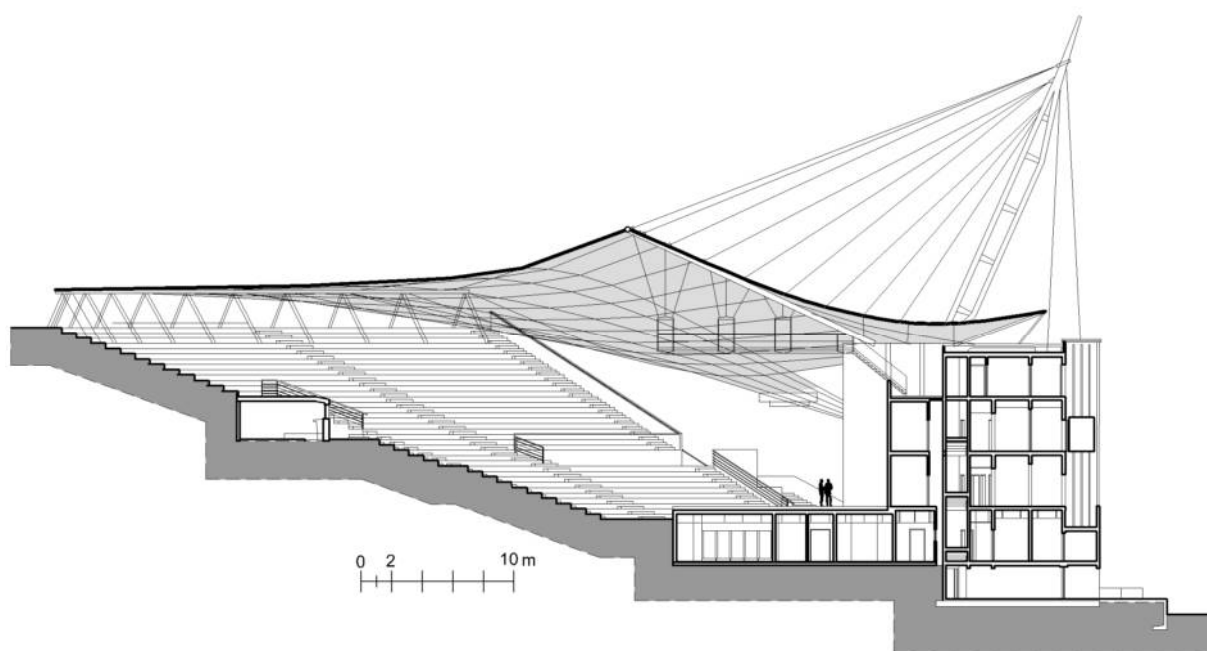
Il. 88. Plan zadaszenia amfiteatru w Płocku

czyli membrany. Dzięki temu powstało zadaszenie o rozpiętości prawie 60 m bez stalowych dźwigarów. Konstrukcję główną stanowi nietypowa siatka cięgnowa, o trójkierunkowym układzie cięgien. Wszystkie cięгна zamocowane są z jednej strony do zewnętrzne-

go półpierścienia, umieszczonego za widownią, z drugiej strony cięгна promieniste mocowane są do łuku parabolicznego i żelbetowej konstrukcji budynku sceny. Pozostałe cięгна, podzielone na dwie grupy, zamocowane do dwóch niskich słupów z odciągami. Słupy te,



Il. 89. Widok zadaszenia amfiteatru w Płocku



Il. 90. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w Płocku

położone są symetrycznie po obu stronach sceny. W tych miejscach powłoka jest położona najniżej. Odległości pomiędzy zamocowaniem cięgien do pierścienia zewnętrznego wynoszą około 4,5 m. Membrana zamocowana jest stosunkowo gęsto i nie ma obawy o wytrzymałość materiału. Forma dachu przypomina niesymetryczny, ścięty stożek, który uzyskano wykorzystując zewnętrzny półpierścień i wewnętrzny łuk paraboliczny. Dla osiągnięcia odpowiedniej wysokości, górny łuk został podwieszony do stalowych pylonów o wysokości 32 m ponad poziomem sceny. To przeniesienie obciążenia na pylony zgodne było z ideą dociążenia podstawy skarpy. Podobnie działa żelbetowa konstrukcja pięciokondygnacyjnego budynku zaplecza sceny. Konieczność zastosowania prawie pionowych odciągów wymogła mocne pochylenie pylonów. Często odciąg, w podobnych konstrukcjach wystają daleko poza zarys budynku. W tym przypadku budynek przylega do drogi, dlatego było to jedyne rozwiązanie.

Wysokie, stalowe pylony stały się przyczyną problemów realizacyjnych całego zadaszenia. Pylony wykonano jako trójgałęziowe, z przewiązkami. Problematicznym miejscem okazało się zamocowanie cięgien do pylonów. Obawa, że nośność pylonów jest niewystarczająca spowodowała wstrzymanie budowy i konieczność wzmocnienia głowic. W tym celu konieczne było rozebranie całej konstrukcji dachu i zdjęcie już zamocowanej membrany. Ponowne mocowanie membrany, wcześniej zdjętej, nie dało już właściwej jakości połączeń. Stąd zła sława i ciągłe problemy ze szczelnością zadaszenia²³³.

Membrana amfiteatru wykonana jest z tkaniny poliestrowej pokrytej PCW. W sumie zadaszone zostało około 2 500 m². Zadaszenie kończy się na niewielkiej wysokości, dzięki czemu dosyć szczelnie przykrywa przestrzeń widowni. Obecna widownia otaczając okrągłą scenę, mieści 3 500 miejsc. Ciekawie zrealizowana forma zadaszenia organicznie łączy ukształto-

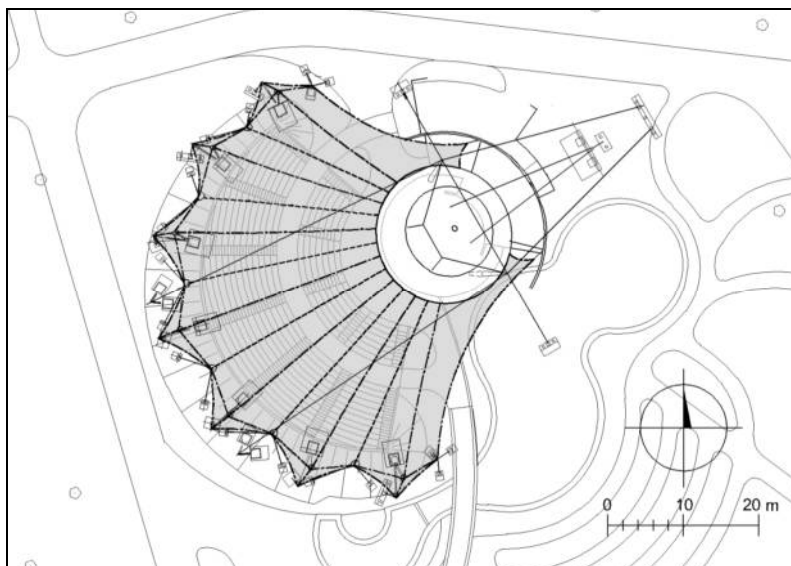
²³³ Hubert Woźniak, *Ekspresowa naprawa amfiteatru*, <http://plock.wyborcza.pl/plock/1,35681,3990745.html> (15-03-2007).

wanie terenu z przystanią na rzece przez wprowadzenie wysokich masztów, lin i napiętej pomiędzy nimi membrany. Atrakcyjny wi-

dok na rzekę ze starego miasta, uzupełniony został nowoczesnymi elementami ażurowej konstrukcji.

5.1.6. Amfiteatr Bemowo w Warszawie

Lokalizacja:	Warszawa, ul. Raginisa, park Górczewska
Projektant:	Studio Architekt, Juliusz Marcinkowski, TiM Rynek Architekci, Tomasz Rynek
Konstrukcja:	Sławomir Rynek,
Wyk. membrany:	Jordahl & Pfeifer
Oddanie:	2008



Il. 91. Plan zadaszenia amfiteatru Bemowo w Warszawie

Amfiteatr jest całkowicie nowym obiektem. Powstał w mało zadrzewionym Parku Górczewska w warszawskiej dzielnicy Bemowo. Otwarte tereny parku pomiędzy blokami mieszkalnymi są miejscem wypoczynku dla mieszkańców. W jego centralnej części powstała ciekawa kompozycja urbanistyczna. Składa się z amfiteatru, niewielkiego zbiornika wodnego, ścieżek i pergoli. Lustro wody dodatkowo podkreśla wyjątkową formę architektoniczną amfiteatru. Wykorzystanie zadaszenia

membranowego pozwoliło na przekrycie całej widowni (na 960 miejsc) i sceny. Koncepcję architektoniczną tego obiektu wykonały pracownice Studio Architekt Juliusz Marcinkowski i TiM Rynek – Architekci z Warszawy. Amfiteatr został oddany w 2008 roku²³⁴.

Klasyczny układ okrągłej sceny i półokrągłej widowni został zadaszony podobnym układem membran. Nad sceną znajduje się stalowy pierścień, od którego promieniście odchodzą 7 ramion, połączonych modułów, podpartych

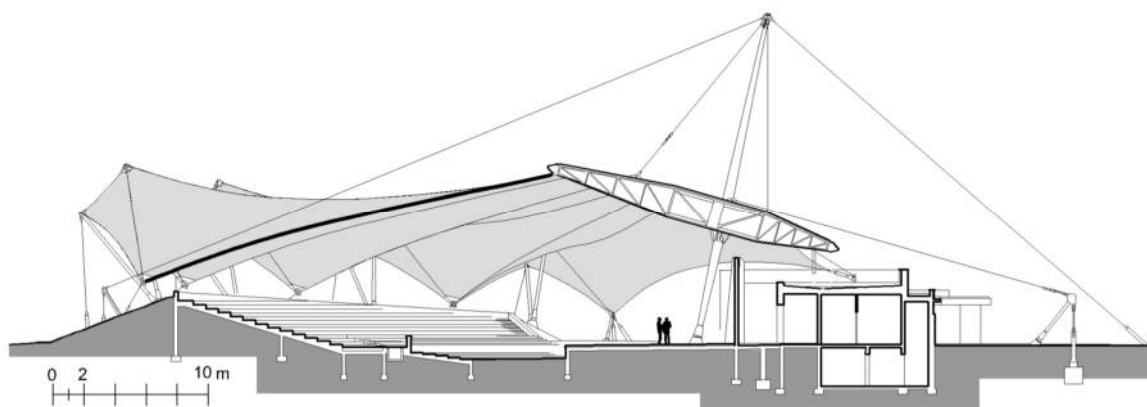
²³⁴ *Amfiteatr na Bemowie*, http://www.inzynierbudownictwa.pl/wydarzenia,relacje,artykul,amfiteatr_na_bemowie,1096 (28-04-2008).



Il. 92. Widok zadaszenia amfiteatru Bemowo w Warszawie

słupami opartymi o koronę widowni. Powtarzalne moduły przypominają połączone namioty. Od centralnego pierścienia, podwieszono na dwóch słupach, odchodzi układ cięgien, tworzących na przemian krawędzie grzbietowe i koszowe. Cięgna grzbietowe opierają się o zewnętrzne słupy, a cięgna koszowe kotwione są bezpośrednio w gruncie. Aby przedłużyć powłokę dachu, wprowadzone zostały ukośne zastrzały. Pozwoliło to też na zbliżenie miejsc zakotwienia odciągów, które zwykle daleko wystają poza obrys dachu. W tym przypadku odciągi prawie pionowo wchodzą w grunt.

Krawędź zewnętrzna zadaszenia jest położona na niewielkiej wysokości, co powoduje, że uzyskano bardzo dobrą ochronę przed wiatrem i deszczem. Duże różnice pomiędzy krawędziami grzbietowymi i koszowymi powodują, że spora część powłoki ma duże pochylenie. Nie można tego powiedzieć o centralnej części, w pobliżu pierścienia. Sam pierścień ma bardzo gęsty, promienisty układ kratownic i pokryty jest tradycyjnym dachem. Poza cięgnami, które bezpośrednio służą do zamocowania membrany, ponad zadaszeniem znajdują się dodatkowe, które stabilizują układ



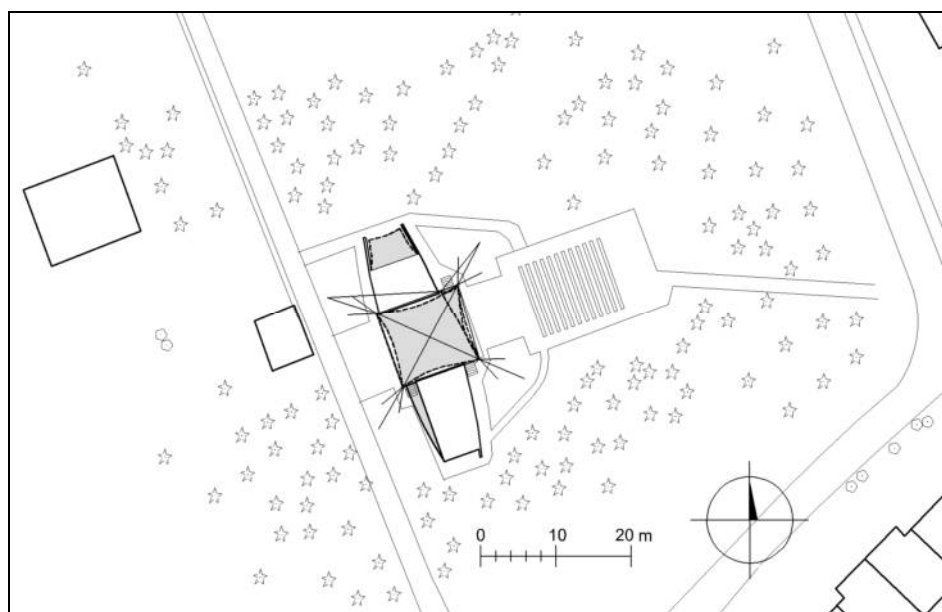
Il. 93. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru Bemowo w Warszawie

wszystkich słupów. Długości poszczególnych paneli sięgają 26 m. Wykorzystano tkaninę z włókien poliestrowych pokrytych PCW w kolorze piaskowym. Półprzezroczystość materiału powoduje, że pod zadaszeniem w ciągu dnia jest jasno, natomiast zastosowany kolor membrany sprawia, że światło ma wyraźnie żółtą barwę²³⁵.

Wyjątkowo rzeźbiarska forma zadaszenia amfiteatru wyróżnia się w otwartej przestrzeni parkowej. Skala obiektu jest dostosowana do miejsca i potrzeb mieszkańców. Kolor membrany dobrze komponuje się z zielonym otoczeniem.

5.1.7. Muszla koncertowa w Rowach

Lokalizacja:	Rowy, ul. Słoneczna,
Projektant:	CKK Architekci, Anna Król,
Konstrukcja:	
Wyk. membrany:	Alu-Tent,
Oddanie:	2009

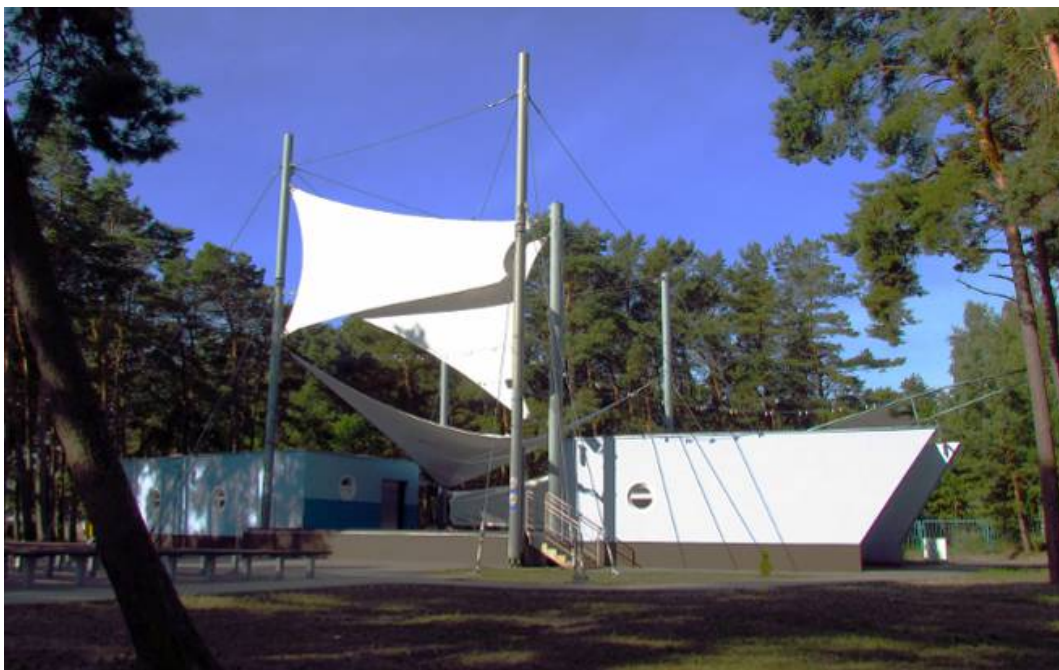


Il. 94. Plan zadaszenia nad muszlą koncertową w Rowach

Miejscowość Rowy położona jest bezpośrednio nad morzem w pobliżu jeziora Gardno. Duża liczba turystów sprzyja inwestowaniu w obiekty kulturalne. W 2009 roku pracownia CKK Architekci z Gdyni zrealizowała koncepcję obiektu pełniącego funkcję sceny wraz z zapleczem dla wykonawców i pomieszcze-

niami sanitarnymi. Muszla wraz z układem ławek zlokalizowana jest na niewielkiej polanie, wśród nadmorskich sosen. Całość w dosłowny sposób nawiązuje do kształtu żaglowca z nadbudówkami. Aby uzyskać wydłużony kształt kadłuba scenę zlokalizowano pomiędzy budynkiem zaplecza a sanitariatami dla widzów.

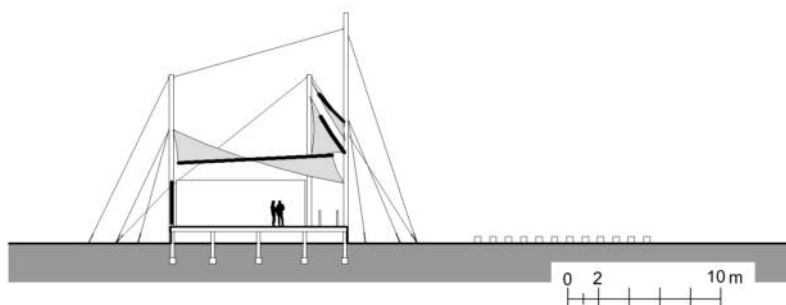
²³⁵ Amfiteatr Bemowo w Parku Górczewska, http://www.bemowo.waw.pl/bemowo/inwestycje/inwestycje_zrealizowane_2006_/amfiteatr_bemowo_w_parku_gorczy,154/ (14-11-2010).



Il. 95. Widok zadaszenia nad muszlą koncertową w Rowach

Wokół kwadratowej sceny o wymiarach 10×10 m ustawionych jest pięć stalowych masztów z odcciągami. Wysokość masztów z przodu sceny wynosi 15 m, a z tyłu 11 m²³⁶. Zadaszenie sceny ma klasyczną formę siodłową. Dwa punkty wysokie w narożach po przekątnej i dwa punkty niskie w pozostałych narożach zamocowane są do masztów. Poza główną membranę pełniącą funkcję zadaszenia w obiekcie zastosowano jeszcze 5 innych dodatkowych powłok. Dwie, czworoboczne ułożone są prawie pionowo, wysoko ponad przednią część sceny. W zasadzie pełnią funkcję

dekoracyjną, mogą jedynie chronić widzów przed oślepieniem przez słońce w godzinach popołudniowych. Z tyłu sceny rozpięta jest kolejna membrana, którą w narożnikach przy-mocowano do dwóch tylnych słupów oraz na środku do podłogi sceny. Pionowa membrana nie ma krzywizny – jest zupełnie płaska. W celu zabezpieczenia przed naporem wiatru, wykonano ją z ażurowej siatki. Poza widocznymi z daleka membranami, nad wejściem do pomieszczeń sanitarnych znajduje się dodatkowe małe zadaszenie. Ukryte jest za ścianami bocznymi, przypominającymi dziób dwukadłu-



Il. 96. Przekrój przez zadaszenie nad muszlą koncertową w Rowach

²³⁶ CKK Architekci, *Projekt budowlano-wykonawczy. Muszla koncertowa w Rowach*. 2008.

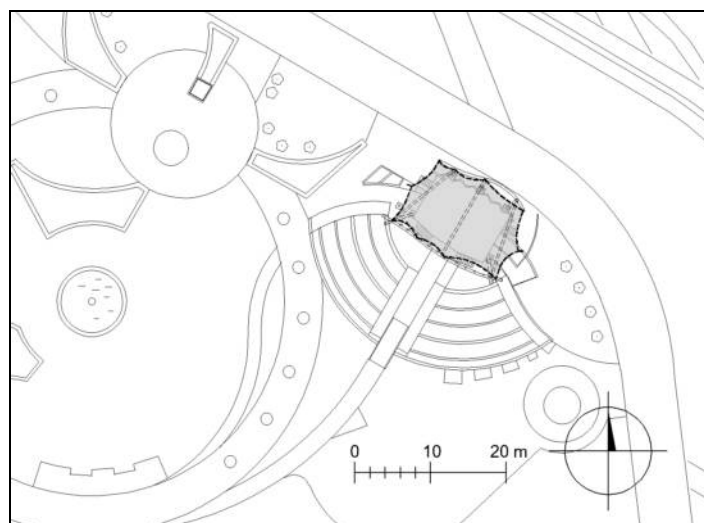
bowej łodzi. Zadaszenie jest płaskie, pochyłone w kierunku budynku do rynny znajdującej się na krawędzi. Podobne, jeszcze mniejsze, płaskie zadaszenie znajduje się nad wejściem do pomieszczeń wykonawców. Zamocowane jest wzdłuż ściany oraz do brzegowej ramy, ma nachylenie od budynku.

Mimo że cała forma obiektu nawiązuje do sylwetki żaglowca, to membrana pełniąc funkcję zadaszenia sceny ma typową formę.

W sezonie zimowym 2010/2011 (drugim roku użytkowania) zaistniała konieczność zrzucania śniegu. Przy okazji zadaszenie zdjęto i przesużono. Po ponownym zamocowaniu początkowo widoczne były ślady przeciążenia membrany, które po kolejnej regulacji naprężeń zostały zniwelowane. Od tego czasu powłoka zdejmowana jest na zimę, chociaż zaprojektowano ją jako całoroczną.

5.1.8. Zadaszenie stałej sceny plenerowej w Ełku

Lokalizacja:	Ełk, ul. Kilińskiego,
Projektant:	Pracownia Projektowa Projekt Plus, Dariusz Jackowski,
Konstrukcja:	Pracownia Projektowa Projekt Plus,
Wyk. membrany:	TAS,
Oddanie:	2009



Il. 97. Plan zadaszenia sceny w Ełku

W centralnej części miasta znajduje się plac imienia Jana Pawła II. W 1999 roku odbyła się w tym miejscu uroczysta msza, którą poprowadził papież. Od tego czasu plac ten stopniowo się zmienia. Najpierw powstał pomnik upamiętniający obecność Jana Pawła II, następnie zostały wprowadzane elementy małej architektury: klomby z kwiatami, ławki,

utwardzone ścieżki. Często w tym miejscu organizowano uroczystości religijne, dlatego postanowiono wybudować podwyższenie ze stałym zadaszeniem. Żeby nie wprowadzać konkurencji dla dużo większego amfiteatru, znajdującego się w innej części miasta, zaprojektowano jedynie małą scenę bez stałej widowni²³⁷.

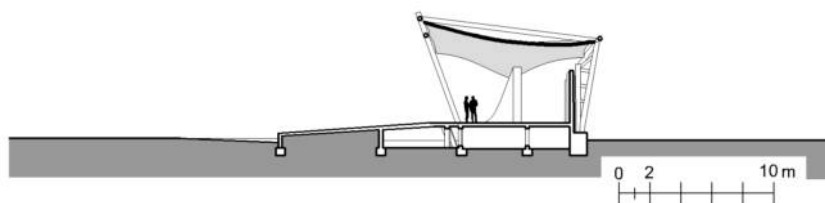
²³⁷ Pracownia Projektowa Projekt Plus, *Projekt architektoniczno-budowlany. Projekt budowy stałej sceny plenerowej na placu Jana Pawła II*. 2009.



Il. 98. Widok sceny plenerowej w Elku

Koncepcję architektoniczną wykonała pracownia Projekt Plus z Elku. Po wschodniej stronie placu, z boku pomnika papieża, w 2010 roku powstała plenerowa scena wraz z zadaszeniem. Niewielkie wyniesienie poziomu sceny ponad teren oraz małe obniżenie stworzyło rodzaj stopni. Pochylnia zlokalizowana z przodu pozwala na wejście procesji podczas uroczystości. Pod podłogą zmieścił się niewielki magazyn sprzętu i urządzenia do zasilania pobliskiej fontanny. Zadanie początkowo miało mieć kształt wygiętej powłoki, zgodnej z kształtem stalowej ramy znajdującej się w przedniej części sceny. Kształt ten wywodzi się z przekształconego, chrześcijańskiego znaku ryby. Jednak sposób formowania membrany podczas

realizacji musiał zostać zmieniony. Wprowadzono dodatkowe miejsca, w których powłokę napięto w dół, aby uzyskać przeciwną krzywiznę. Do tego celu wykorzystane zostały żelbetowe ściany. Siły wynikające z działania napiętej powłoki wymusiły wprowadzenie poziomych rozpór pomiędzy ramami. Poza tym, aby nie wprowadzać dodatkowych odciągów (dla usztywnienia całego układu), tylna rama została wzmocniona przez zastrzały. Membrana nie jest mocowana bezpośrednio do ramy, tylko w kilku punktach przez ciężarne brzegowe. Dzięki temu uzyskała kształt zbliżony do typowego siodła. Membranę wykonano z białego materiału, z włókien poliestrowych pokrytych PCW.



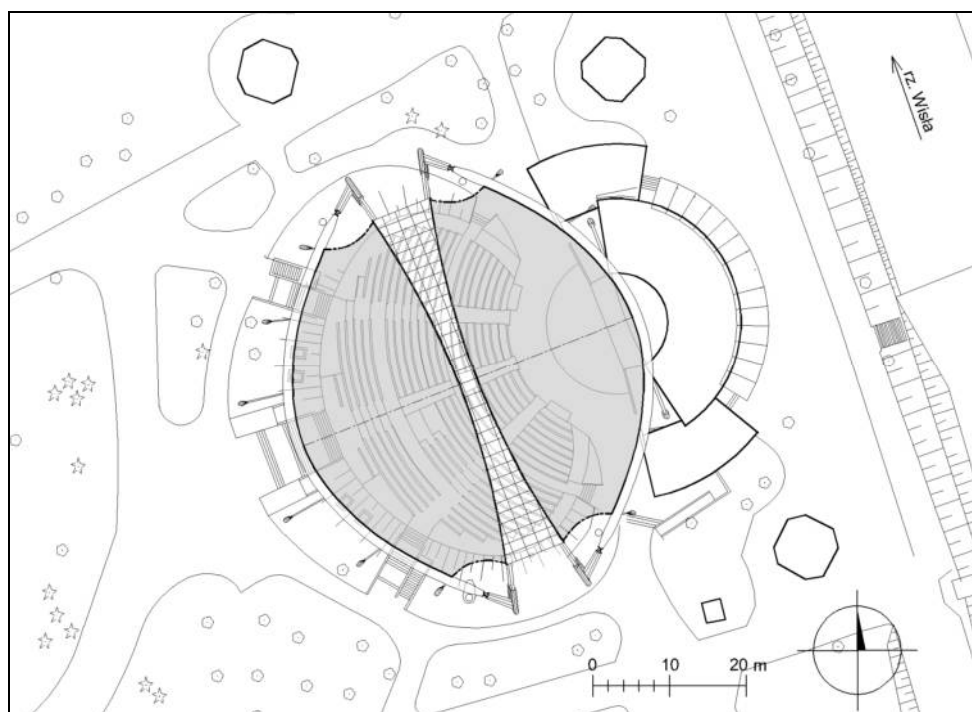
Il. 99. Przekrój sceny plenerowej w Elku

Zadaszenie stanowi lekką formę w otwartej przestrzeni miejskiej. Jak się z czasem okazało, scena stała się inspiracją dla lokalnych, niezobowiązujących wydarzeń kulturalnych, a nawet zajęć sportowo-rekreacyjnych. Zachęca do

tego pełna dostępność zadaszenia. Zastanawiająca jest w tym przypadku próba zharmonizowania układu całego placu. Wydaje się, że pomnik patrona zaczyna być nieco w cieniu nowego zadaszenia.

5.1.9. Amfiteatr w Wiśle

Lokalizacja:	Wisła, Plac B. Hoffa 3,
Projektant:	Color Inwestprojekt, Witold Linscheid,
Konstrukcja:	Pracownia Inżynierska Projekt, Marian Krężel,
Wyk. membrany:	HP Gasser A.G. Membranbau,
Oddanie:	2010



Il. 100. Plan zadaszenia amfiteatru w Wiśle

Miejscowość Wisła leży w południowej części województwa śląskiego, w Beskidzie Śląskim. Już w 1964 roku odbył się tam festiwal folklorystyczny pod nazwą: Tydzień Kultury Beskidzkiej. Obecnie festiwal ten odbywa się w kilku miejscowościach, ale amfiteatr w Wiśle jest nadal jednym z najważniejszych. Stary amfiteatr z żelbetową paraboliczną muszlą wymagał unowocześnienia.

Koncepcję modernizacji całego amfiteatru wraz z zadaszeniem wykonała pracownia CoLoR Inwestprojekt z Katowic. Zakładała ona zadaszenie modernizowanego amfiteatru za pomocą konstrukcji z drewna klejonego, pokrytego poliwęglanami²³⁸.

W wyniku przetargu, ostatecznie zrealizowane zostało zadaszenie oparte na stalowych łukach i rozpiętej pomiędzy nimi membranie. Do-

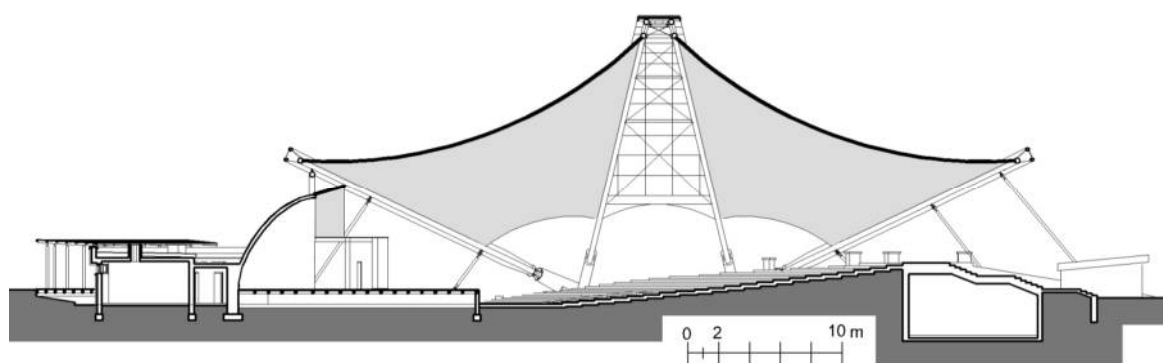
²³⁸ Architektoniczne Biuro CoLoR Inwestprojekt, *Projekt budowlany, tom I – część ogólna + zagospodarowanie terenu*. 2007.



Il. 101. Widok zadaszenia amfiteatru w Wiśle

świadczanie wykonawcy przy realizacji zadania membranowego w sąsiedniej miejscowości pozwoliło na obniżenie kosztów²³⁹. Amfiteatr w Wiśle jest obecnie najwyższym w Polsce stałym zadaniem membranowym. Znajduje się na wysokości 430 m n.p.m. Decyduje to o przewidywanej wielkości obciążenia śniegiem. Główna część zrealizowanej konstrukcji nośnej opiera się na czterech, stalowych łukach o rozpiętości 58 m. Dwa łuki środkowe pochylone są ku sobie,

a pomiędzy nimi znajduje się szklany świetlik. Dwa dodatkowe łuki położone są prawie płasko. Spełniają one funkcję niejako pierścienia bocznego. Konstrukcja przypomina sprawdzony układ znany z hali wystaw w Katowicach, zwanej popularnie „kapeluszem”. Tylko, że tam zamiast membrany pomiędzy łukami rozpięta jest sieć linowa. W omawianym amfiteatrze oba łuki dolne, a właściwie przedni i tylny, podparte są zastrzałami. Tylny łuk podparty jest sześcioma ukośnymi zastrzałami.



Il. 102. Przekrój przez zadanie amfiteatru w Wiśle

²³⁹ Pracownia Inżynierska Projekt s.c., *Projekt architektoniczno-budowlany zadania amfiteatru w parku im. Stanisława Kopczyńskiego w Wiśle*. 2009.

Natomiast przedni, zamiast środkowych zastrzałów ma dodatkowy łuk umieszczony nad żelbetową muszlą sceniczną. Ze względu na wielkość i obciążenia łuki zostały wykonane jako wielogałęziowe (środkowe – dwugałęziowe, a boczne – trójgałęziowe z przewiązkami). Pozwoliło to na wykonanie ich z elementów giętych. Pomiędzy łukami środkowymi a dolnymi rozpięte są dwie membrany. Długość brytów w membranie dochodzi do 24 m bez dodatkowych podparć. Membrana mocowana jest bezpośrednio do sztywnych łuków podporowych. Jedynie wzdłuż krótkich boków pomiędzy łukami wprowadzone jest ciągnio brzegowe. Po kilku latach użytkowania zadaszenia wprowadzono dodatkową membranę. Przy intensywnym deszczu i silnych podmuchach od strony wschodniej na scenę dostawała się woda. Dlatego postanowiono przedłużyć żelbetową muszlę za pomocą membra-

ny. Wprowadzony został niewielki łuk, służący jedynie zamocowaniu tkaniny. Aby uzyskać odpowiednie naprężenie, zaprojektowane zostały dodatkowe rozpory znajdujące się pomiędzy łukiem a żelbetową muszlą. Zlokalizowano je ponad powłoką, co powoduje, że od strony widowni nie są widoczne.

Środkowy świetlik wprowadza większą ilość światła dziennego niż membrana, chociaż zastosowana powłoka też jest jasna. Pomiędzy świetlikiem a membraną występuje przerwa, a dokładnie są to otwory pomiędzy przewiązkami gałęzi łuków. Pozwala to na wentylowanie przestrzeni pod membraną.

Obiekt jest cały czas dostępny i często odwiedzany, ponieważ znajduje się w niewielkiej odległości od centrum miasta. Duża, zadaszona widownia sprzyja przebywaniu tam nawet przy niekorzystnej pogodzie.

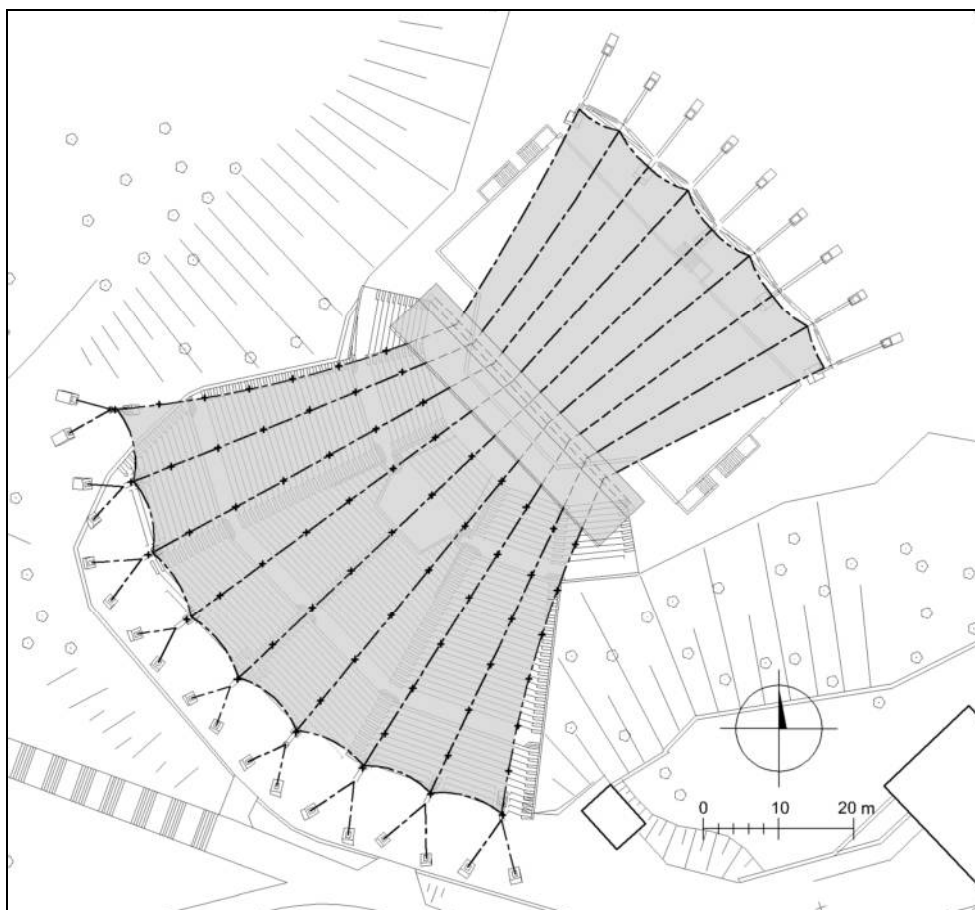
5.1.10. Amfiteatr na Kadzielni w Kielcach

Lokalizacja:	Kielce, aleja Legionów,
Projektant:	IMB Asymetria, Witold Gilewicz,
Konstrukcja:	k2 engineering, Andrzej Kowal,
Wyk. membrany:	Sport Halls sp. z o.o.
Oddanie:	2010

Jeden z najnowocześniejszych amfiteatrów w Polsce to zmodernizowany amfiteatr na Kadzielni w Kielcach. Znajduje się w głębokim wyrobisku, gdzie do połowy XX wieku trwała eksploatacja surowca do wypalania wapna. W odkrytych jaskiniach, położonych przy wyrobisku, występują ciekawe zjawiska krasowe. Dlatego obecnie cały ten teren jest rezerwatem geologicznym. W 1971 roku powstał tam amfiteatr, a od 1974 roku organizowane są tam słynne Harcerskie Festiwale Kultury Młodzieży Szkolnej. W 2010 roku, po gruntownej

przebudowie, amfiteatr został ponownie oddany do użytku. Architektoniczny konkurs na modernizację obiektu wygrała pracownia IMB Asymetria z Krakowa²⁴⁰. Projektanci starali się przede wszystkim wykorzystać otaczające skały jako scenografię. Dlatego nie przewidziano żadnych bocznych elementów osłonowych. Nawet przebudowane zaplecze dla wykonawców zostało ukryte pod sceną. Jedną z pierwszych koncepcji zakładała zadaszenie amfiteatru przy użyciu pneumatycznych poduszek. Ostatecznie zrealizowane zostało zada-

²⁴⁰ Witold Gilewicz, *Amfiteatr Kadzielnia*. Architektura Murator 8/2012, s. 52-53.



Il. 103. Zadaszenie amfiteatru na Kadzielni w Kielcach

szczenie membranowe składające się z dwóch części: stałej i ruchomej.

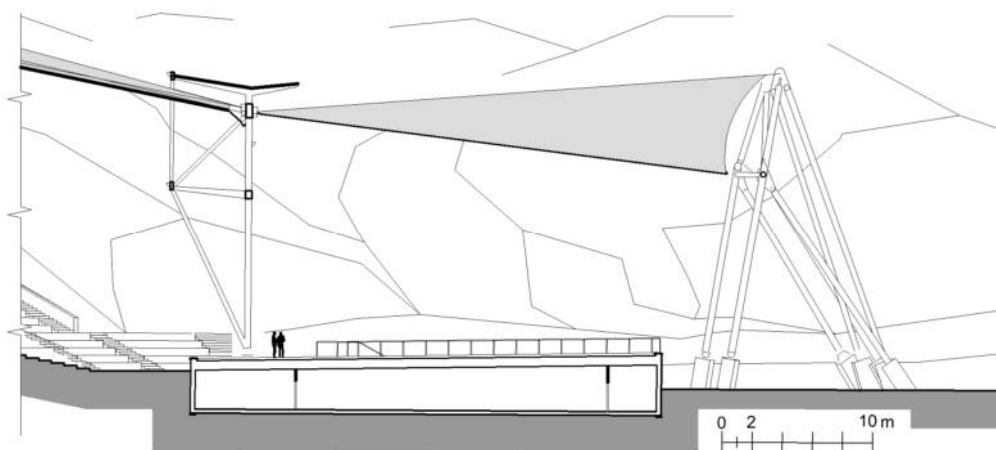
Widownia jest największą wśród przedstawianych amfiteatrów, ponieważ jest na 5 500 miejsc. Nad tą widownią zaprojektowano pierwszą w Polsce automatycznie zwijaną membranę. Pośrodku umieszczono olbrzymią stalową ramę, łączącą oba zadaszenia. Do jej górnej części zamocowany jest rodzaj garażu, czyli zadaszone miejsce na zwijaną membranę. Rama stanowi nowoczesny portal sceniczny. Oparta jest na dwóch przegubach i spełnia funkcję wahacza, równoważącego obciążenia obu zadaszeń. Z obu stron przymocowane są do niej ciężna nośne, co zapewnia stabilizację całego układu nośnego²⁴¹.

Zadaszenie nad sceną ma kształt połałdowanej powłoki z na przemian położonymi krawędziami grzbietowymi i koszowymi. Z jednej strony ciężna zamocowane są do ramy nad sceną, z drugiej do układu słupów i zastrzałów za sceną. Ciekawy układ elementów podporowych ograniczony został do 5 słupów i 9 zastrzałów zamocowanych przegubowo na fundamentach. Układ ten podtrzymuje 9 ciężien nośnych zadaszenia nad sceną. Słupy znajdują się tylko w miejscach, gdzie membrana jest położona niżej, przy krawędziach brzegowych i koszowych. Natomiast ciężna grzbietowe zamocowane są w miejscach położonych wyżej, uzyskanych z zastrzałów połączonych w rodzaj trójnogu. Rozpiętość ciężien nad sceną wynosi 35 m.

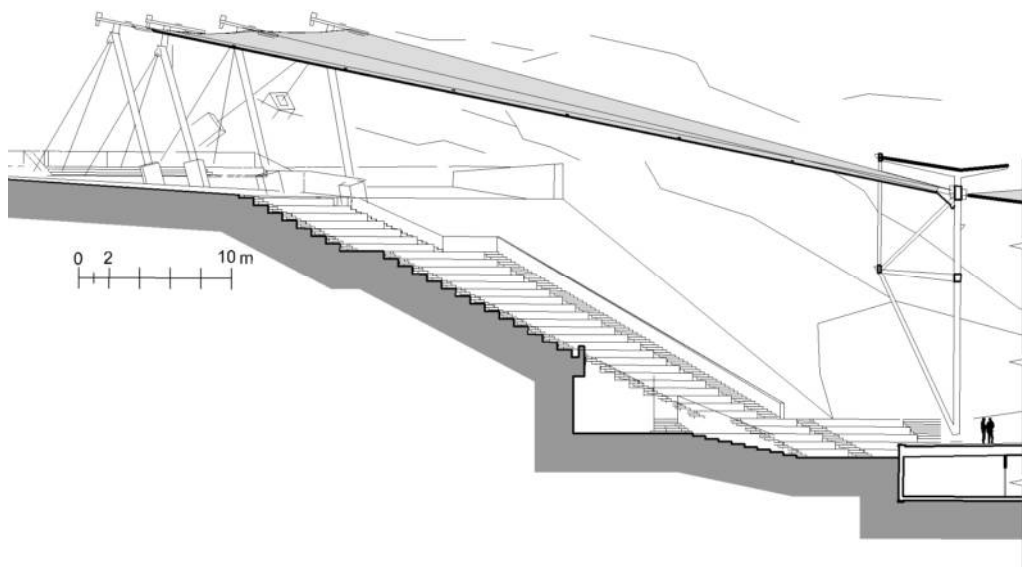
²⁴¹ Andrzej Kowal, *Kadzielnia Amphitheatre. A combination of retractable and permanent covering*. Tensinews nr 23, 09/2012, p. 4-5.



Il. 104. Widok zadaszenia amfiteatru na Kadzielni w Kielcach



Il. 105. Przekrój przez zadaszenie nad sceną amfiteatru w Kielcach



Il. 106. Przekrój przez zadaszenie nad widownią amfiteatru w Kielcach

Jeszcze ciekawsze rozwiązanie powstało nad widownią. Zastosowano, podobnie jak nad sceną, 9 cięgien nośnych, ale wyraźnie dłuższych, o rozpiętości 55 m. Podtrzymują one przesuwne wózki, do których przymocowana jest membrana. Za widownią znajduje się 9 słupów z podwójnymi odciągami i urządzeniami służącymi do zwijania i rozwijania membrany. Tylne słupy zakończono na podob-

nej wysokości, co powoduje, że rozwinięta powłoka jest prawie płaska. Pochylenie w kierunku sceny oraz wachlarzowy układ cięgien nadaje jej niewielką krzywiznę. Dodatkowo zróżnicowano wysokości punktów, w których cięgna przymocowane są do ramy nad sceną, ale jest to prawie niewidoczne. Naprężona membrana zamocowana jest do ruchomych wózków, poruszających się po cięgnach no-



Il. 107. Mechanizmy napędowe ruchomego dachu amfiteatru w Kielcach

śnych. Liczba tych cięgien, a raczej odległość pomiędzy nimi została tak dobrana, aby zwinięta membrana nie tworzyła zbyt wysokich fałd nad sceną, by mieściła się w garażu. Największe odległości pomiędzy cięgnami, z tyłu widowni, dochodzą do 10 m, a odległości pomiędzy punktami zamocowania cięgien do ramy, nad sceną, wynoszą około 7 m. Powłoka mocowana jest do 6 wózków ślizgowych poruszających się po każdym cięgnię, wykonano ją w całości, bez podziału na mniejsze panele ułatwiające montaż. Membrana znajdująca się nad sceną została podzielona na osobne panele, które łączone są na cięgnach górnych, nośnych.

Nad garażem znajduje się dodatkowe zadaszenie chroniące zwiniętą membranę i jednocześnie miejsce połączenia obu części. Co prawda pokrycie wykonane jest z tego samego materiału, czyli białej tkaniny, ale nie ma charakterystycznych cech zadaszeń membranowych. Tkanina w tym przypadku jest zupełnie płaska, pochylona do wewnętrznej rynny i gęsto zamocowana do prostych elementów podtrzymujących. Dzięki wykorzystaniu składanego dachu pominięto problem obciążenia śniegiem. Główne obciążenie dla membrany stanowi obciążenie wiatrem. Procesy rozwijania i zwijania odbywają się przy bezwietrznej pogodzie, aby nie doszło do zerwania nienaprężonej membrany. System sterowania ruchomym dachem składa się z wciągarek linowych, siłowników hydraulicznych oraz układu automatyki i kalibracji. Główne mechanizmy napędowe zamocowano przegubowo na głowicach słupów, za widownią. Dzięki zastosowaniu

takiego rozwiązania urządzenia dopasowują się do kierunku cięgien nośnych. Ze względu na zmieniający się rozkład obciążenia, podczas procesu składania membrany następuje też zmiana położenia poszczególnych cięgien. Mechanizmy te wykonują następujące zadania: (1) przesuwać linę napędzającą, czyli zwijają linę, do której przymocowane są punkty brzegowe membrany, (2) chwytają wózek końcowy, (3) siłowniki hydrauliczne naprężają membranę i ostatecznie (4) blokują membranę w pozycji końcowej. System automatyki kontroluje prędkość przesuwu poszczególnych urządzeń oraz wyrównuje siłę naprężania membrany. Cały układ dachu i system sterowania zostały opracowane przez Andrzeja Kowala z pracowni k2 engineering z Wrocławia. Na podkreślenie zasługuje fakt, że jest to w całości polska realizacja. Ze względu na duże wymiary zdecydowano się na przetestowanie modelu w tunelu aerodynamicznym. Testy były wykonane na etapie projektowania konstrukcji, aby sprawdzić rozkład obciążeń przy silnym wietrze^{242, 243}.

Dodatkową zaletą zastosowanego rozwiązania nad widownią jest to, że biała, płaska powierzchnia wolna jest od dołu od elementów konstrukcyjnych, a to pozwala na przedłużenie scenografii. Dzięki najnowszym urządzeniom wyświetlającym dowolne efekty wizualne, zwiększa się atrakcyjność widowiska. Bardziej złożona forma zadaszenia lub występowanie innych elementów konstrukcyjnych mogłoby kolidować z wyświetlanymi obrazami.

Zadaszenie jest rozwijane raz do roku na sezon letni, a przed zimą jest chowane do garażu.

²⁴² Andrzej Kowal, *Membranowo-linowa konstrukcja amfiteatru Kadzielnia, Cable membrane structure of Kadzielnia Amphitheatre*, [w:] *ZK2014 – Konstrukcje metalowe/Metal Structures* 2-4 lipca/July 2014, Kielce-Suchedniów, Poland.

²⁴³ Andrzej Kowal, *Kadzielnia Amphitheatre*, *op.cit.*

5.1.11. Zadaszenie sceny letniej Regionalnego Centrum Kultury w Kołobrzegu

Lokalizacja:	Kołobrzeg, ul. Solna 1,
Projektant:	mellon architekci, Miłosz Raczyński, Marek Sietnicki,
Konstrukcja:	Aigma, Grzegorz Maliszewski,
Wyk. membrany:	Kontent, Ryszard Koniewicz,
Oddanie:	2010



Il. 108. Plan zadaszenia sceny letniej w Kołobrzegu

W Kołobrzegu, w okresie letnim przebywa bardzo dużo turystów, dlatego organizowane są różnego rodzaju imprezy kulturalno-rozrywkowe. Najbardziej znany to Festiwal Piosenki Żołnierskiej, który organizowany był w latach 1968–1991. Obiekt przez lata poddawany był tylko drobnym modernizacjom.

W innej części miasta znajdowało się nieco zniszczone kino Kalmar. Obiekt poddano przebudowie, powstało w nim Regionalne Centrum Kultury. Tworzy je zespół sal kino-teatralnych, a przy nich letnia scena. Koncepcja przebudowy została przygotowana przez pracownię mellon architekci ze Szczecina. Nowoczesna forma zwartego kompleksu uzupełniona została kontrastującym zadasze-

niem membranowym. Powłoka chroni wielofunkcyjną przestrzeń: wydzieloną, podniesioną scenę i płaską widownię. Pod zadaszeniem przewidziano dodatkową konstrukcję, która umożliwia zamocowanie nagłośnienia i oświetlenia. Płaska widownia chętnie wykorzystywana jest jako nieformalne miejsce spotkań, niezależnie od pogody²⁴⁴.

Konstrukcja zadaszenia oparta jest na 12 słupach o różnej wysokości i cięgnach rozpiętych pomiędzy nimi. Dzięki temu powstała forma fałdowa, z na przemian położonymi krawędziami grzbietowymi i koszowymi. Poszczególne panele mają kształt wydłużonych trójkątów. Projektanci starali się uzyskać jak największą powierzchnię zadaszenia, przy mocno

²⁴⁴ *Centrum kultury w Kołobrzegu*. Architektura-Murator 11/2010, s. 70-76.



Il. 109. Widok zadaszenia sceny letniej w Kołobrzegu

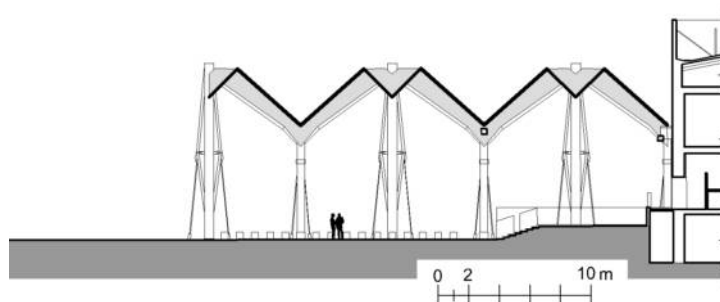
ograniczonym zarysie podpór. Przede wszystkim, dla bezpieczeństwa, starano się unikać ukośnych odciągów umieszczonych przy ciągach komunikacyjnych.

Zaproponowane rozwiązanie okazało się nie lada wyzwaniem podczas montażu. Zwykle w pierwszej kolejności membrana mocowana

jest do elementów stałych typu łuki lub rami.

W Kołobrzegu natomiast wszystkie krawędzie mocowane są na linach. Naprężenie dowolnego panelu powodowało przemieszczenia wszystkich pozostałych.

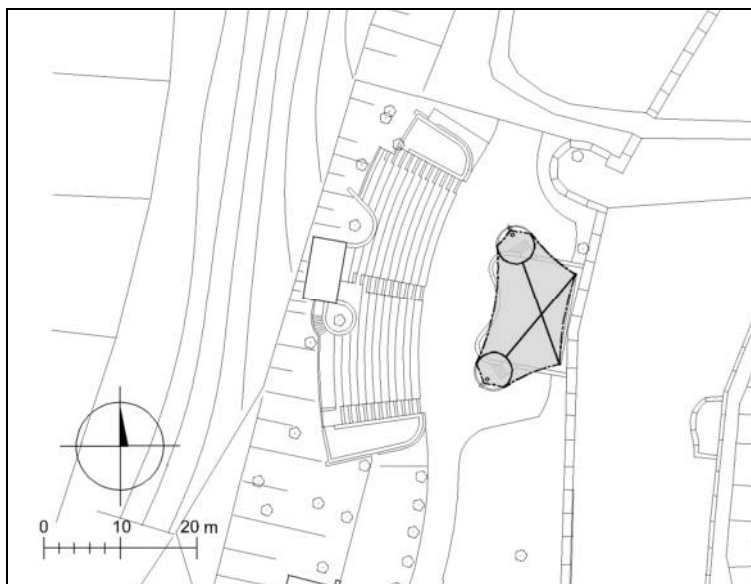
Membrana jest w kolorze białym, wykonana z włókien poliestrowych pokrytych PCW.



Il. 110. Przekrój przez zadaszenie sceny letniej w Kołobrzegu

5.1.12. Zadaszenie sceny amfiteatru w Łagowie

Lokalizacja:	Lokalizacja: Łagów, ul. Chrobrego,
Projektant:	Atelier Architektury, Paweł Potok,
Konstrukcja:	Atelier Architektury, Roman Sobociński,
Wyk. membrany:	TAS, Przemysław Klimkowski,
Oddanie:	2010



Il. 111. Plan zadaszenia sceny w Łagowie

Łagów znajduje się w województwie lubuskim. Położony jest na pofałdowanym terenie, pomiędzy jeziorami Trześniowskim i Łagowskim. Tereny wokół miejscowości tworzą Łagowski Park Krajobrazowy. Historia tej miejscowości sięga bardzo wcześnie, gdyż sprzyjająca lokalizacja zaowocowała powstaniem zamku Joannitów. U podnóża tego zamku, bezpośrednio przy zabytkowych murach, znajduje się miejsce organizacji najstarszego w Polsce festiwalu filmowego – Lubuskiego Lata Filmowego. Ze względu na duże ograniczenia konserwatorskie, wynikające z lokalizacji, zdecydowano się na lekką, ażurową konstrukcję z zadaszeniem membranowym. Koncepcję architektoniczną wykonała pracownia Atelier Architektury ze Świebodzina. Wykorzystano formy nawiązujące do pobliskich

drzew, a jednocześnie do architektury zamku. Poza sceną zmodernizowana została widownia i pojawiły się nowe budynki zaplecza. Obiekty wykonane z kamieni bardzo dobrze wpisują się w parkowy krajobraz. Nawiązują do pobliskich murów obronnych i unoszącej się nad całością wieży zamkowej. Przebudowę zakończono w 2010 roku²⁴⁵.

Konstrukcja sceny przede wszystkim podtrzymuje ekran kinowy, który znajduje się w jej tylnej części. Forma została tak dobrana, aby wiązka promieni z projektora, znajdującego się w budynku za widownią, bez przeszkód docierała do ekranu. Poza tym, stosunkowo szeroka widownia, w niewielkiej odległości od ekranu, mocno ogranicza możliwości zastosowania elementów podporowych.

²⁴⁵ Atelier Architektury Paweł Potok, *Projekt budowlany. Rewitalizacja Centrum Kultury i Sztuki Filmowej w Łagowie*, 2009.

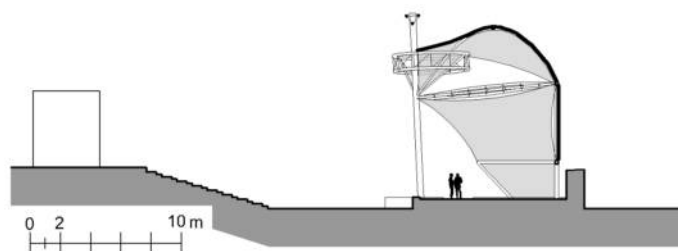


Il. 112. Widok sceny amfiteatru w Łagowie

Pierwotna koncepcja architektoniczna musiała zostać zmodyfikowana ze względu na decyzję o wykonaniu zadaszenia jako całorocznego. Wzrost przewidywanych obciążeń spowodował konieczność wprowadzenia dodatkowych elementów. Przede wszystkim konieczne było wprowadzenie poziomej rozporcy znajdującej się przed sceną, ponieważ napięcie membrany powoduje mocne obciążenie konstrukcji podporowej siłami poziomymi.

Główna część zadaszenia membranowego w planie zbliżona jest do trapezu. Dodatkowymi elementami podtrzymującymi membranę są przekątne łuki. Wykonano je z pojedynczych stalowych rur o średnicy 168 mm. Wygięty kształt łuków nadaje membranie odpow-

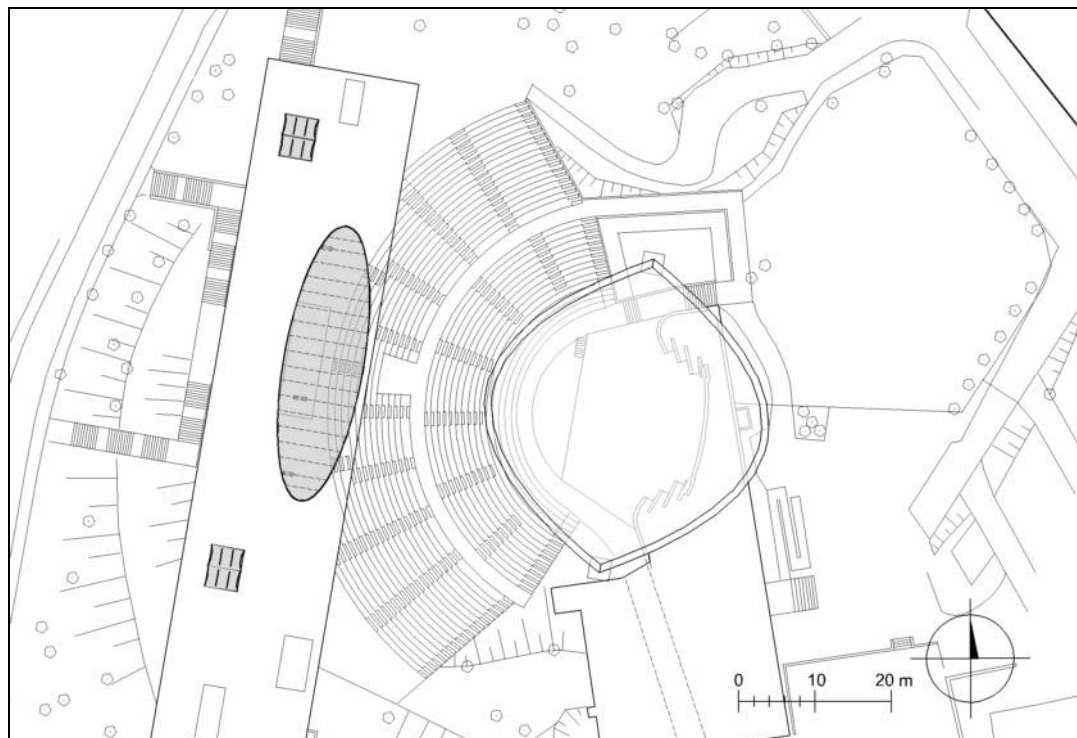
wiednią krzywiznę. Dodatkowymi elementami podtrzymującymi tkaninę są poziome pierścienie znajdujące się w przedniej części sceny. Dzięki temu zmniejszono rozpiętość pomiędzy narożnymi słupami. Pierścienie spełniają rolę wsporników zamocowanych na słupach. Zadaszenie, poza górną częścią bezpośrednio chroniącą przed opadami, ma jeszcze elementy boczne. Chronią one wykonawców przed podmuchami wiatru. Czworokątne elementy zamocowane są wzdłuż dwóch krawędzi (tylnej i dolnej) oraz w narożu po przeciwnej stronie. Ze względu na położenie punktu mocującego, membrana w tej części jest prawie płaska. Wygięte krawędzie brzegowe nie zwiększają krzywizny danego panelu.



Il. 113. Przekrój przez scenę amfiteatru w Łagowie

5.1.13. Zadaszenie w Amfiteatrze Tysiąclecia w Opolu

Lokalizacja:	Opole, ul. Piastowska 14a,
Projektant:	biuro 87a, Małgorzata Adamowicz-Nowacka, Marek Nowacki,
Konstrukcja:	Biuro Projektów Tyczyński Wojtas,
Wyk. membrany:	Alu-Tent, Ryszard Zieliński,
Oddanie:	2011



Il. 114. Plan amfiteatru w Opolu

Amfiteatr w Opolu powstał w latach 60. XX wieku. Położony jest w wyjątkowym miejscu na wyspie, w którym do 1931 roku znajdował się zamek piastowski. W 1979 roku wybudowano charakterystyczną stalową konstrukcję zadaszenia sceny. Ta wygięta, paraboliczna forma wraz z pozostałą po zamku Wieżą Piastowską i Urzędem Wojewódzkim w tle, stworzyły wizualną ikonę, nierozdzielnie związaną z Krajowym Festiwalem Piosenki Polskiej. Gdy przystąpiono do konkursu na przebudowę amfiteatru, zdecydowano, że istniejący układ musi pozostać bez zmian. Wybrano koncepcję pracowni 87a Architektury

z Opolą. Przebudowa objęła powiększenie i wzmocnienie dachu nad sceną, ale z zachowaniem wcześniejszej formy. Poza tym odnowiono widownię i wybudowano budynek obsługi widzów. W trakcie modernizacji zmniejszono wielkość widowni z 4 800 do 3 650 miejsc. Gotowy amfiteatr został oddany do użytku wiosną 2011 roku²⁴⁶.

Budynek obsługi widzów pełni rolę dwukondygnacyjnego tarasu: dolny – oszklonego foyer, a górny – tarasu widokowego z dodatkową lożą. Poza tym znajdują się tam punkty gastronomiczne i toalety. Z górnego tarasu rozciąga się wspaniały widok nie tylko na scenę, ale też

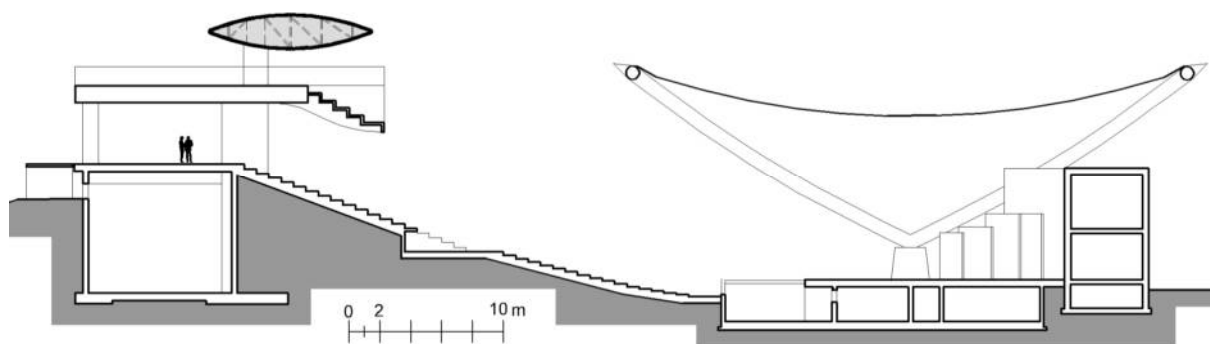
²⁴⁶ Biuro 87a, *Projekt budowlany przebudowy i rozbudowy Amfiteatru Tysiąclecia z przyłączami*. 2008.



Il. 115. Widok zadaszenia w amfiteatrze w Opolu

na panoramę miasta i rzekę Odrę. Taras z wprowadzonym dodatkowym zadaszeniem jest dobrze widoczny z nadrzecznych bulwarów. Architekci musieli zmierzyć się z problemem wprowadzenia nowego elementu, który pasowałby do całości. Zadaszenie znajdujące się nad tarasem widokowym ma kształt płaskiego, wydłużonego dysku. Jego wymiary wynoszą 10×30 m. Zadaszenie miało pełnić rolę akcentu, świecącego znaku, który z daleka zwracałby uwagę – zdecydowano się na zadaszenie membranowe. Układ konstrukcyjny zadaszenia składa się z dwóch powłok, górnej i dolnej, napiętych na stalowym przestrzennym ruszcie. Wzdłuż krawędzi bocznej biegnie

pierścień, do którego zamocowane są obie powłoki. Wewnętrzny ruszt jest dosyć gęsty, gdyż rozpiętości pomiędzy krawędziami podparcia dla membrany wynoszą zaledwie 2 m. Złożony układ nośny zadaszenia wynika z niesymetrycznego podparcia – wykorzystania wspomnianego ruszta. Dzięki temu zadaszenie prawie unosi się nad tarasem. Można porównać go do konstrukcji bardzo długiego skrzydła samolotu. Zastosowana błyszcząca membrana, dodatkowo podświetlona w nocy, daje niesamowity efekt. Czasami podczas koncertów odbicie światła jest zbyt duże i konieczne jest wygaszenie podświetlenia.



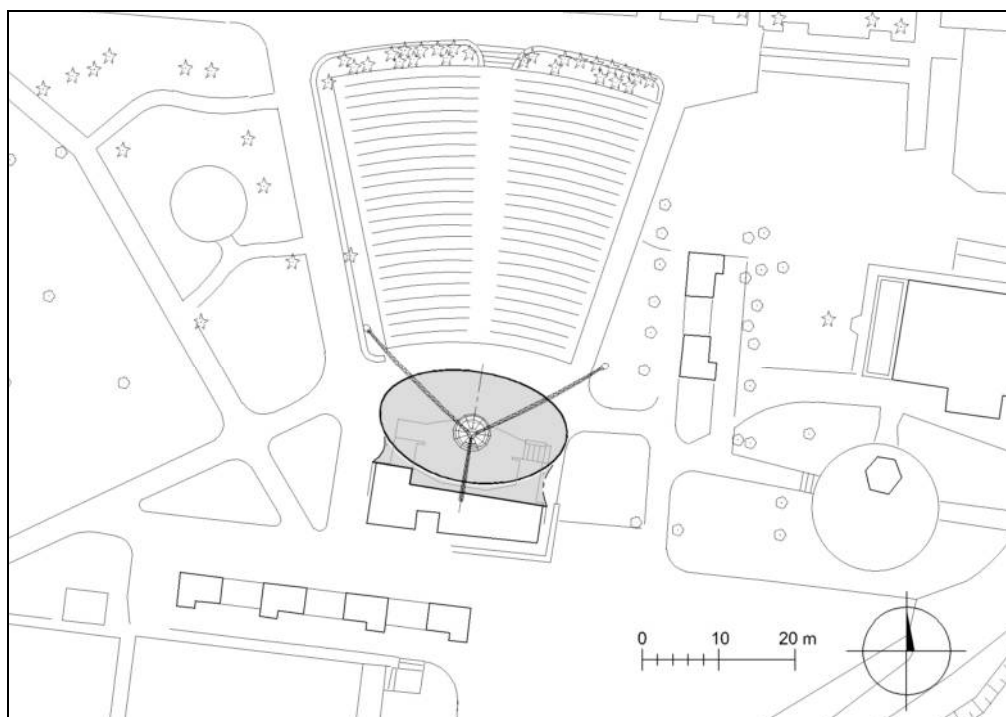
Il. 116. Przekrój przez zadaszenia w amfiteatrze w Opolu

Na tarasie znajdują się jeszcze dwie dodatkowe membrany, stanowiące zadaszenia otwartych klatek schodowych. Powłoki zamocowane są wzdłuż krawędzi bocznych do sztywnych sta-

lowych ram, a od czoła do cięgien. Poniżej znajdują się dodatkowe łuki, wypychające membranę w górę.

5.1.14. Zadaszenie sceny amfiteatru w Brennej

Lokalizacja:	Brenna, ul. Malinowa 2b,
Projektant:	Pracownia Inżynierska Projekt s.c., Marian Krężel,
Konstrukcja:	Pracownia Inżynierska Projekt s.c., Marian Krężel,
Wyk. membrany:	HP Geaser AG,
Oddanie:	2011



Il. 117. Plan zadaszenia sceny w Brennej

Brenna, podobnie jak Ustroń i Wiśla, położona jest w Beskidzie Śląskim. W okresie letnim w tych miejscowościach odbywa się festiwal o nazwie Tydzień Kultury Beskidzkiej. Występy regionalne już od wielu lat wymagały odpowiedniej sceny i widowni. W 2011 roku zmodernizowano istniejący amfiteatr, między innymi przez wprowadzenie stałego zadaszenia sceny. Wzorem sąsiednich miejscowości zdecydowano się na wybór zadaszenia membra-

nowego. Pracownia Projekt z Bielska-Białej, mając już doświadczenie z podobnymi zadaszeniami w Ustroniu i Wiśle, zaproponowała formę zbliżoną do stożkowej²⁴⁷.

Konstrukcję główną zadaszenia pełni kratownicowy trójnóg. Do niego podwieszony został środkowy pierścień. Przytrzymuje on przymocowaną do niego membranę. Ponad tym pierścieniem, o średnicy 4,20 m, umieszczony został ostrosłupowy, stalowy dach, który

²⁴⁷ Pracownia Inżynierska Projekt s.c., *Projekt architektoniczno-budowlany. Projekt zamienny zadaszenia sceny amfiteatru. Rozbudowa i modernizacja amfiteatru w Brennej Centrum.*

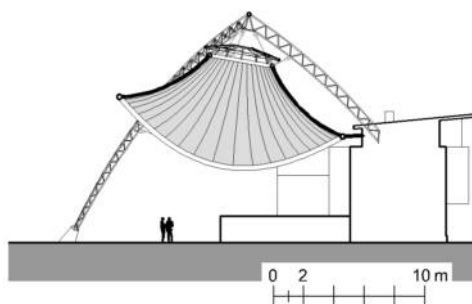


Il. 118. Widok zadaszenia sceny w Brennej

zamyka otwór, ale pozwala na wentylację przestrzeni pod zadaszeniem. Dolny pierścień, do którego zamocowana jest membrana, został wydłużony w poprzek sceny i obniżony na końcach. W ten sposób powstał element przestrzenny, wykonany z giętej rury. Efektem ostatecznym jest zadaszenie, którego forma jest najbardziej zbliżona do kapelusza z obniżonym rondem. Całość dodatkowo pochylono

10° od pionu w kierunku zaplecza tak, aby zapewnić lepszą ekspozycję sceny.

Od strony południowej zadaszenie połączone jest z przyległym budynkiem. Wykonano osobny panel membrany uzupełniający przestrzeń pomiędzy główną częścią zadaszenia a zapleczem. Powierzchnia całego zadaszenia wynosi 343 m^2 , a wymiary zewnętrznego pierścienia to $25 \times 15 \text{ m}$. Membrana wyko-



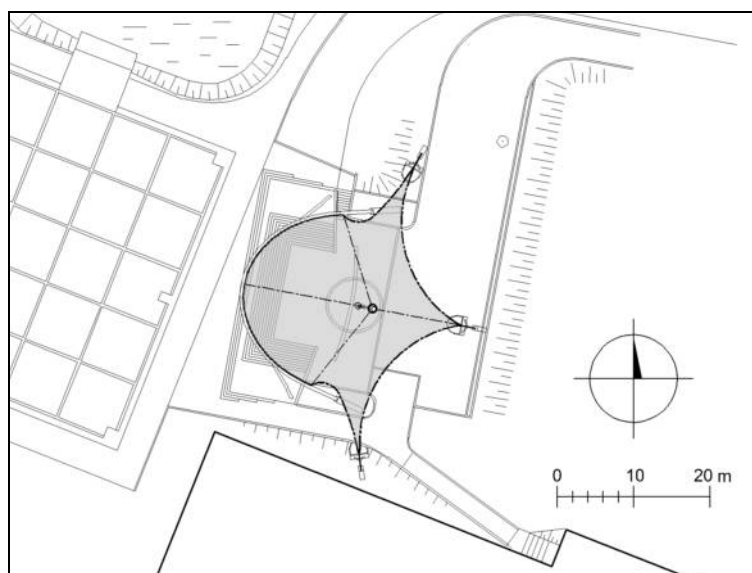
Il. 119. Przekrój przez zadaszenie sceny w Brennej

nana jest z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Dostyc duża średnica rury, z której jest wykonany dolny pierścień, powoduje, że pełni on dodatkową funkcję – bufora przytrzymującego wodę i śnieg. W najniższych punktach, po bokach sceny, zostały przewidziane otwory.

Forma rzygaczy z łańcuchami pozwala na spływanie wody deszczowej do studni chłonnych, wypełnionych kamieniami. Jest to chyba najprostsze i zarazem najlepsze rozwiązanie sposobu odprowadzenia wody z membrany.

5.1.15. Scena wielofunkcyjna w Węgierskiej Górcie

Lokalizacja:	Węgierska Górka, ul. XX lecia II RP
Projektant:	Wiewióra & Golczyk Architekci, Maciej Wiewióra, Magdalena Żuławska,
Konstrukcja:	Pracownia Inżynierska Projekt, Marian Krężel,
Wyk. membrany:	HP Gasser A.G. Membranbau,
Oddanie:	2012



Il. 120. Plan zadaszania sceny w Węgierskiej Górcie

Węgierska Górka znajduje się w południowej części województwa śląskiego, w Beskidzie Żywieckim. Miejscowość o tradycjach przemysłowych, obecnie przekształcana jest w ośrodek turystyczny. Podczas powodzi górny odcinek przepływającej rzeki Soły wielokrotnie powodował olbrzymie zniszczenia. Postanowiono więc uregulować i wykorzystać tereny przylegające do rzeki. W pobliżu centrum powstały bulwary nadrzeczne z układem obiektów sportowo-rekreacyjnych. Na początku wybudowano halę sportową, jedną z większych w województwie. W jej pobliżu powstał

plac, nazywany rynkiem, a wokół niego przewidziano kolejne atrakcje przeznaczone dla turystów.

Pomysł wybudowania stałego miejsca przeznaczonego do organizowania różnorodnych wydarzeń kulturalnych powstał wcześniej. Przewidywano, że koszty budowy amfiteatru będą zbyt wysokie jak na tę niewielką, górską miejscowość. Podjęto decyzję o rezygnacji z klasycznego układu ze stałą widownią, a zbudowano jedynie scenę ze stałym zadaszaniem. Koncepcja wykonana przez pracownię Wiewióra & Golczyk z Żywca została zreali-



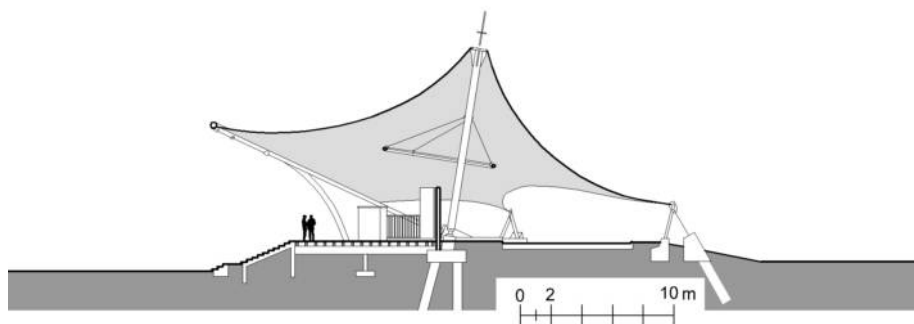
Il. 121. Widok zadaszenia sceny w Węgierskiej Górze

zowana w 2011 roku. Obiekt przylega do hali sportowej, zrezygnowano z dodatkowego zaplecza sceny. Duży plac przed sceną jest dowolnie aranżowany, w zależności od rodzaju imprezy. Stała widownia czasami ogranicza wielkość imprezy widowiskowej i przeszkadza podczas koncertów. Duża widownia z małą liczbą widzów wywołuje efekt nieudanej imprezy. Okazało się, że wybudowanie tylko podwyższonej sceny przy płaskim placu bardzo dobrze sprawdza się we wszystkich sytuacjach. Obiekt stał się ulubionym miejscem, nawet spontanicznych wydarzeń, ponieważ nie ma żadnych ograniczeń dotyczących możliwości korzystania ze sceny²⁴⁸.

Zadaszenie ma ciekawą formę przestrzenną. Jest niesymetrycznym stożkiem z jednej strony podpartym stalowym łukiem, tworzącym nie-

mał portal sceniczny, a z drugiej miękko zakończonymi ciągnami brzegowymi. Powłoka wykonana jest w całości, bez podziałów na mniejsze panele. U góry zamocowana jest do małego pierścienia, podpartego przez pochyły słup. Dla uzyskania równomiernego naprężenia membrany podczas niesymetrycznych obciążeń, np. podmuchów wiatru, słup oparty jest na kulowym przegubie. Poniżej powłoki zastosowano ciągnia, które pełnią podwójną rolę: tworzą krawędź grzbietową – zapobiegają nadmiernemu ugięciu powłoki przy obciążeniu śniegiem oraz zabezpieczają konstrukcję w razie ewentualnego zniszczenia membrany. Ciągnia utrzymają słup we właściwej pozycji. Powierzchnia zadaszenia wykonanego z włókien poliestrowych pokrytych PCW wynosi 455 m².

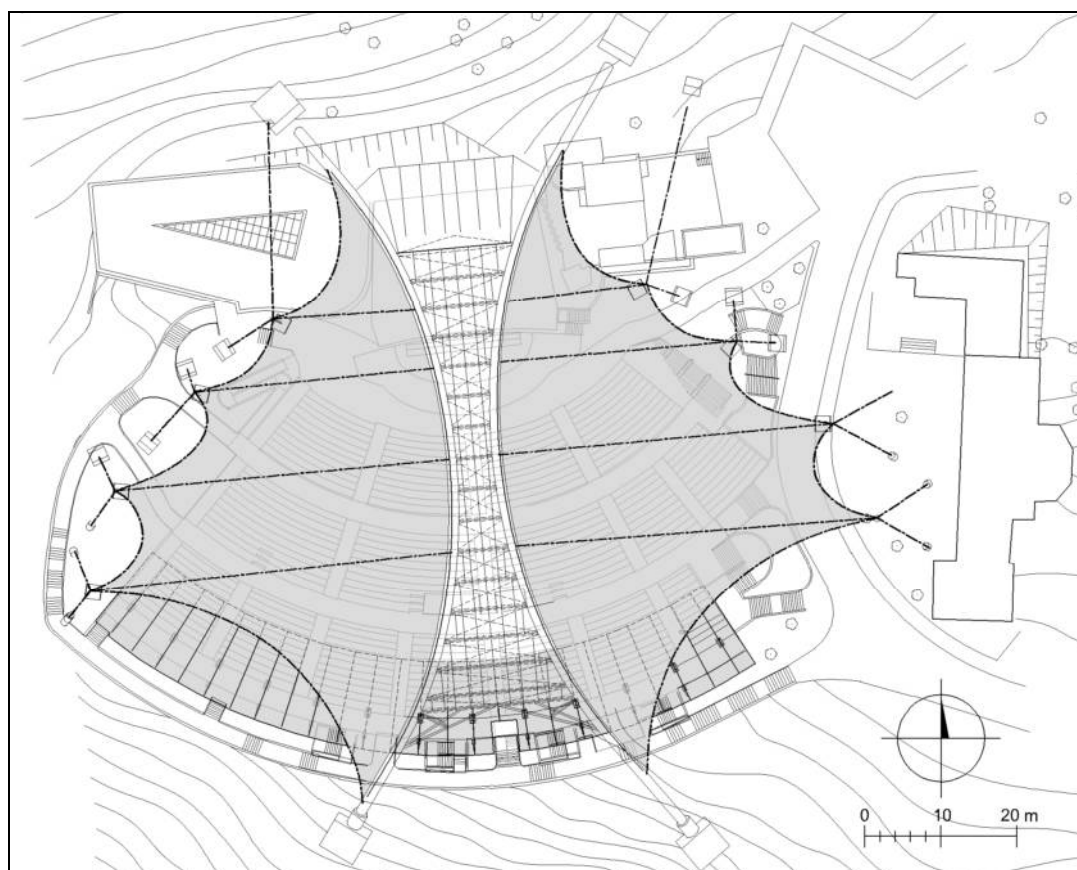
²⁴⁸ Wiewióra & Golczyk Architekci, *Projekt zadaszonej sceny wraz z infrastrukturą w Węgierskiej Górze*. 2011.



Il. 122. Przekrój przez zadaszenie sceny w Węgierskiej Górze

5.1.16. Opera Leśna w Sopocie

Lokalizacja:	Sopot, ul. Moniuszki 12,
Projektant:	Archi-CAD, Jacek Szczęsny,
Konstrukcja:	Daniel Florczak, Paweł Kłosowski,
Wyk. membrany:	Taiyo Europe,
Oddanie:	2012



Il. 123. Plan zadaszenia Opery Leśnej w Sopocie²⁴⁹

²⁴⁹ Archi-CAD, *Projekt wykonawczy. Opera Leśna*, Sopot 2008.

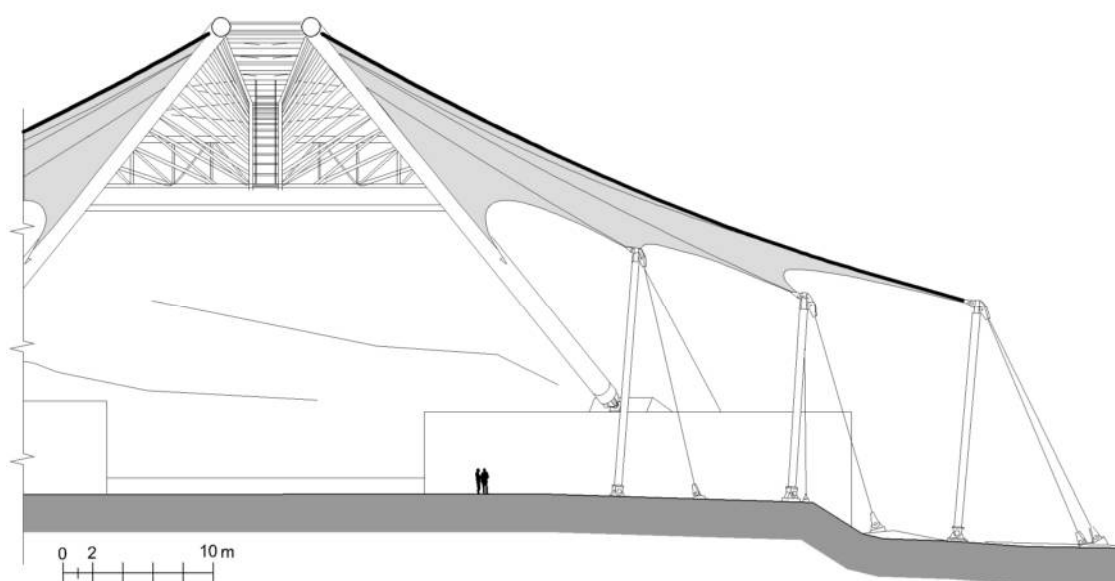


Il. 124. Widok zadaszenia Opery Leśnej w Sopocie

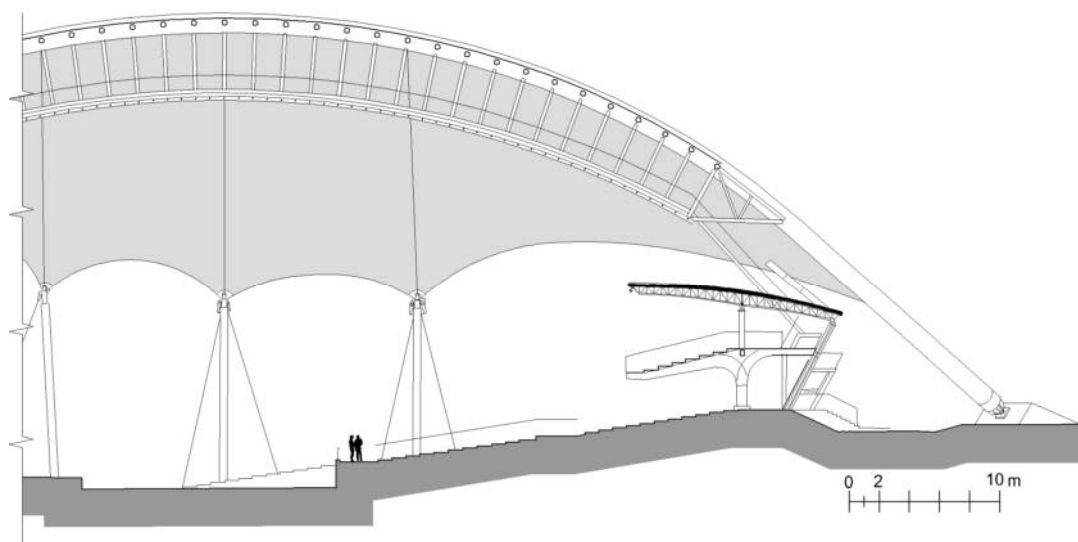
W tym samym miejscu, co historyczny amfiteatr z tymczasowym zadaszeniem wybudowany został całkowicie nowy obiekt. Najważniejszym celem było zrealizowanie stałego zadaszenia, którego nie trzeba zdejmować na zimę. Konkurs na koncepcję architektoniczną wygrała pracownia Archi-CAD z Gdańska. Forma

nowego zadaszenia według koncepcji miała przypominać wygięty liść. Centralny element nośny to główny nerw, a ciężna brzegowe to kontur liścia. Dzięki temu całość miała być dobrze wkomponowana w otaczający las.

Poza głównym zadaszeniem przebudowano również widownię, scenę i budynek zaplecza



Il. 125. Przekrój poprzeczny przez zadaszenie Opery Leśnej w Sopocie



Il. 126. Przekrój podłużny przez zadaszenie Opery Leśnej w Sopocie

dla artystów oraz wykonano zadaszenie nad balkonem widowni. Nowa widownia obecnie mieści 5 038 miejsc siedzących, z czego 1031 jest na balkonie, a 1068 jest na składanych trybunach. Pozwala to na pełną swobodę organizowania widowisk i koncertów^{250, 251}.

Główną konstrukcją zadaszenia stanowi para pochylnych ku sobie stalowych łuków – rur o średnicy aż 1 300 mm. Wygięcie elementów o tak dużym przekroju sprawiło wiele problemów. Ostatecznie wszystkie segmenty łuków były gięte w Anglii. Ze względu na układ terenu, łuki różnią się rozpiętością (wschodni 103 m i zachodni 94 m). Pomiędzy łukami znajdują się rozpory i stężenia, a ponad nimi wykonano pokrycie z poliwęglanów. Do głównej konstrukcji nośnej po obu stronach zamocowano dwie osobne membrany. Każdą z nich, od zewnątrz, zamocowano do cięgien brzegowych, opartych na słupach z odciągami. Pojedyncza membrana składa się z 5 mniejszych paneli, połączonych na linach przeciwniegiętych. Długości największych paneli przekraczają 50 m. Obecnie jest to największe zadaszenie amfiteatru w Polsce, jego łączna po-

wierzchnia wynosi 5 225 m². Główne membrany wykonano z włókien szklanych pokrytych PTFE. Powierzchnia zadaszona powłokami wynosi 3 530 m².

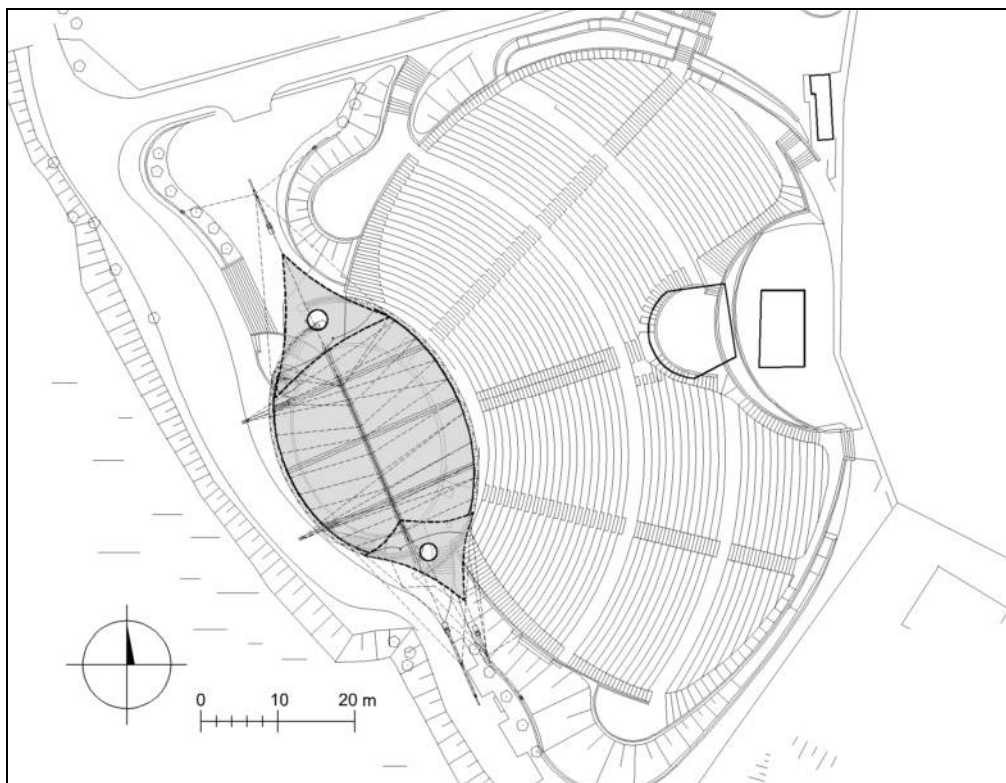
Obie części membran mają formę pojedynczych powierzchni siodłowych. Krzywizna powierzchni wynika z zastosowania łuku z jednej strony i odpowiednio dobranych wysokości i położenia słupów z drugiej. Poza głównym zadaszeniem, obejmującym większość widowni i scenę, w amfiteatrze znajduje się jeszcze dodatkowe zadaszenie nad balkonem widowni. Konstrukcję tego zadaszenia oparto na wspornikowych kratownicach, tworzących wachlarzowy układ nad widownią balkonu. Odległości pomiędzy kratownicami, po zewnętrznej, wynoszą 3,8 m. Dla zrównoważenia obciążeń od naciągu membrany pomiędzy kratownicami znajdują się rozpory, a wzdłuż krawędzi brzegowych zamocowane są cięgna. Membrana położona jest stosunkowo płasko, z małą krzywizną, wynikającą z wygięcia kratownic. Powierzchnia tego zadaszenia wynosi 1 040 m².

²⁵⁰ Paweł Wernicki, *Zachować charakter miejsca. Rozmowa z architektem*. STO nr 1/2012, s. 1-5.

²⁵¹ Patrycja Fabiańska, *Skrzydła i żagle, Opera Leśna w Sopocie*. Świat Architektury 10(28)/2012, s. 16-30.

5.1.17. Zadaszenie nad sceną amfiteatru w Mrągowie

Lokalizacja:	Mrągowo, ul. Jaszczurcza Góra 10,
Projektant:	Art Projekt K&M, Jarosław Krause,
Konstrukcja:	Wela Firma Projektowo-Usługowa, Elżbieta Wewiórska,
Wyk. membrany:	Kontent, Małgorzata i Ryszard Koniewicz,
Oddanie:	2012



Il. 127. Plan amfiteatru w Mrągowie

Amfiteatr w Mrągowie jest jednym ze słynniejszych, polskich amfiteatrów. Położony jest nad brzegiem jeziora Czoch. Już od wielu lat organizowany jest tam festiwal pod nazwą Piknik Country. Istniejący obiekt wymagał unowocześnienia i dostosowania do współczesnych potrzeb. Poprzedni amfiteatr miał zadaszenie nad sceną, okresowo pokrywane plandeką, dlatego zdecydowano się na podobne rozwiązanie. Poszukiwano jednak ciekawszego kształtu, który mógłby stać się ikoną miejsca. Nowe zadaszenie miało być większe i stałe, aby nie trzeba było wykonywać dodatkowych czynności przy

organizowaniu imprez. Przy okazji wyraźnie powiększono widownię do 5 300 miejsc. Do realizacji wybrano koncepcję pracowni Art Projekt K&M z Kościerzyny²⁵², przewidującą ażurową scenę z prześwitującym widokiem na jezioro. Zadaszenie sceny kształtem miało przypominać wygięty liść z podwiniętymi w przeciwną stronę końcami. Naturalne otoczenie i miękkie formy zadaszenia miały organicznie wtapiać się w krajobraz. Natomiast wykorzystanie wysokich masztów, lin i membrany miało nawiązywać, według koncepcji, do jachtów charakteryzujących dla mazurskich jezior.

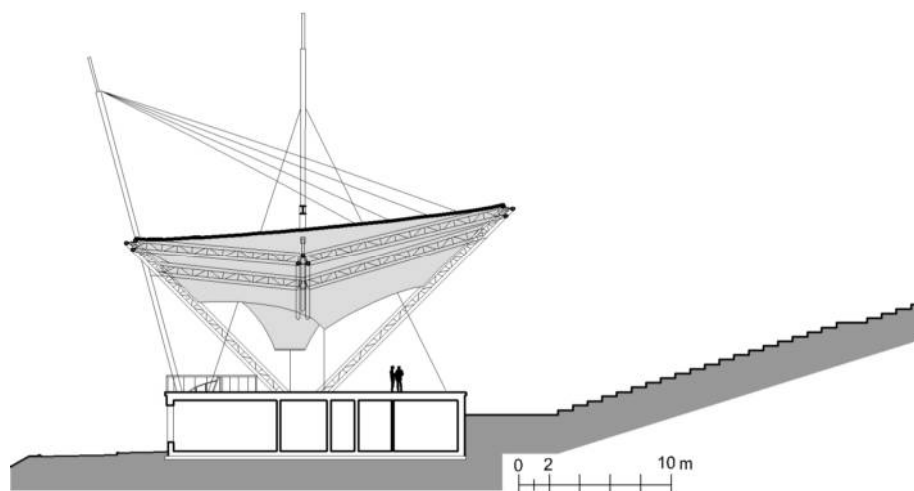
²⁵² Art Projekt K&M, *Projekt budowlany. Przebudowa amfiteatru wraz z zapleczem socjalny, infrastrukturą techniczną i zagospodarowaniem terenu*. 2010.



Il. 128. Widok zadaszenia sceny amfiteatru w Mrągowie

Zrealizowane zadaszenie składa się z dachu głównego w formie wygiętego siodła opartego na dwóch łukach oraz dodatkowych bocznych elementów zwiększających powierzchnię zadaszenia. Nad eliptyczną sceną zamocowano dwa stalowe łuki nośne, do których przymocowano membranę. Pomiedzy główne łuki wprowadzono dodatkowy element, podobnie wygięty, ale oparty tylko z jednej strony. Trzy wygięte w przeciwną stronę belki łączą wszystko w jedną przestrzenną strukturę nośną. Występujące w początkowej koncepcji boczne elementy miały być swobodnie wiszącymi fragmentami membrany. Ostatecznie zrealizowano je w formie dwóch lejów, zawieszonych na cięgnach. Północny lej ma zarys trójboczny, a południowy czworoboczny. Od dołu każdy lej zakończony jest stalowym pierścieniem, do którego przymocowano membranę. Naciąg pierścienia powoduje równomierne naprężenie całej membrany. Znajdujące się za sceną maszty służą przede wszystkim ustabilizowaniu układu dwóch pochyłych łuków. Złożona przestrzennie forma zadaszenia okazała się nie lada wyzwaniem w realizacji.

Membranę wykonano z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Część główną zamocowano z dwóch stron do łuków nośnych (przedniego i tylnego), a z boków, pomiędzy łukami, napięto przez cięgna brzegowe odciągami zakotwionym bezpośrednio w gruncie. Są to miejsca, w których odprowadzana jest woda z dachu. Niestety nie ma w nich przygotowanych ani studni chłonnych, ani zabezpieczenia przed spadającą wodą. Występujące w tym zadaszeniu przebicie głównej membrany sztywnym elementem konstrukcji miało spełniać funkcję dodatkowej podpory dla membrany. Mocno utrudniało montaż powłoki, gdyż konieczne było jednoczesne podwieszanie i montaż konstrukcji podporowej. Poza tym membrana i tak ulega znacznemu ugięciu pod wpływem obciążeń. Duży otwór w dolnej części każdego leja potrzebny jest w okresie zimowym, aby śnieg



Il. 129. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w Mrągowie

nie zatrzymywał się wewnątrz. Niestety brak jakiegokolwiek instalacji odprowadzającej wodę powoduje, że przestrzeń pod zadaszeniem przy opadach deszczu nie nadaje się do wykorzystania. Do łuku znajdującego się z tyłu sceny

czasami mocowane są dodatkowe ażurowe siatki w celu zabezpieczenia przed wiatrem i deszczem. Zastosowany układ nośny umożliwia podwieszenie systemów podświetlenia i nagłośnienia.

5.1.18. Zadaszenie nad widownią amfiteatru w Śliwicach

Lokalizacja:	Śliwice, ul. Dworcowa 39,
Projektant:	Pracownia Usług Projektowych, Mariusz Kłosowski,
Konstrukcja:	Pracownia Usług Projektowych, Mariusz Kłosowski,
Wyk. membrany:	Alu-Tent, Zieliński
Oddanie:	2012

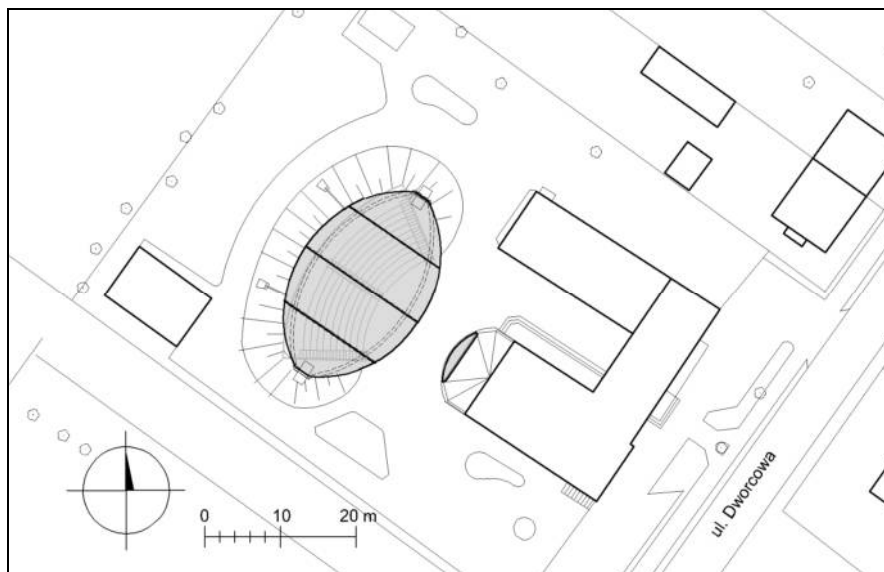
W miejscowości Śliwice w województwie kujawsko-pomorskim w 2012 roku przeprowadzono rozbudowę Gminnego Ośrodka Kultury. Wykonano scenę z tradycyjnym zadaszeniem i osobną widownię przykrytą membraną. Niewielka działka pomieściła widownię na około 300 miejsc. Projekt został przygotowany przez Pracownię Usług Projektowych Mariusza Kłosowskiego z Chojnic²⁵³.

Konstrukcja wzorowana była na siodłowym zadaszeniu amfiteatru w Koszalinie. Początkowo zadaszenie widowni miało być pokryte

blachą trapezową, ale w trakcie realizacji zmieniono rodzaj pokrycia na membranowe.

Główne elementy to dwa stalowe łuki o rozpiętości 28 m i średnicy rur 406 mm. Łuki oparte są w niewielkiej odległości od siebie o żelbetowe filary. Dla zapewnienia stabilności układu, z tyłu widowni, znajdują się dwa zastrzały. Pomiędzy łuki wprowadzono płatwie przygotowane do zamocowania blachy. Decyzję o zmianie rodzaju materiału pokryciowego podjęto, gdy główna konstrukcja zadaszenia została już wykonana. Zdecydowano się na

²⁵³ Pracownia Usług Projektowych Mariusz Kłosowski, *Projekt zawierający istotne zmiany – amfiteatr – rozbudowa infrastruktury Gminnego Ośrodka Kultury w miejscowości Śliwice*. 2011.



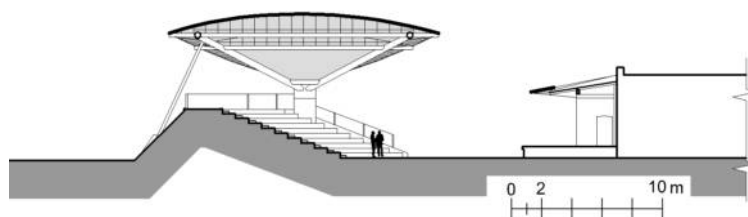
Il. 130. Plan zadaszenia widowni w Śliwiczach

zadaszenie membranowe, dlatego konieczne było wprowadzenie dodatkowych elementów konstrukcyjnych, które pozwalają na odpowiednie ukształtowanie powłoki. Wykonawca zaproponował dołożenie dodatkowych łuków opartych na wcześniej wykonanych płatwiach, aby niejako wypchnąć membranę w górę. Płatwie w tym zadaszeniu pełnią również rolę

rozpór, równoważąc napięcie membrany. Odległość pomiędzy płatwiami wynosi około 7,5 m. Powłokę zadaszenia przedłużono poza główne łuki nośne za pomocą dodatkowych stalowych elementów. Dzięki temu widoczna krawędź dachu ma niewielką grubość. Pomiedzy płatwiami, poniżej membrany zostały umieszczone dodatkowe linki śniegowe.



Il. 131. Widok zadaszenia amfiteatru w Śliwiczach



Il. 132. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w Śliwicach

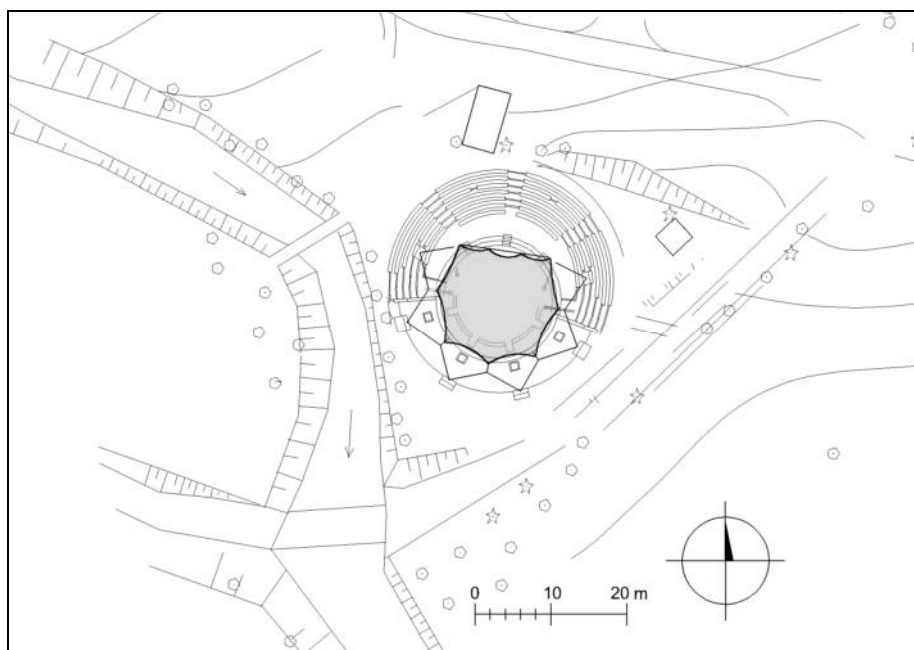
Odsunięte są od powłoki i pełnią funkcję elementów tymczasowo przenoszących obciążenie od śniegu. Jest to również informacja dla gospodarza obiektu, o konieczności odśnieżenia dachu. Ukształtowanie membrany powoduje spływanie wody deszczowej na boki, do kielichów na żelbetowych filarach. Powłokę

wykonano z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Powierzchnia zadaszenia liczy około 380 m².

W celu ujednolicenia wyglądu sceny i widowni wykonano dodatkowy daszek nad sceną w formie przedłużenia wcześniej wykonanego tradycyjnego dachu.

5.1.19. Zadaszenie nad sceną w Zubrzycy Górnej

Lokalizacja:	Zubrzyca Górna, Orawski Park Etnograficzny
Projektant:	Pracownia Architektoniczna, Joanna Kołodziej,
Konstrukcja:	Pracownia Projektowa-Konstrukcje Inżynierskie, Urszula Markocka-Pampuch
Wyk. membrany:	Alu-Tent, Ryszard Zieliński,
Oddanie:	2012



Il. 133. Plan zadaszenia nad sceną w Zubrzycy Górnej

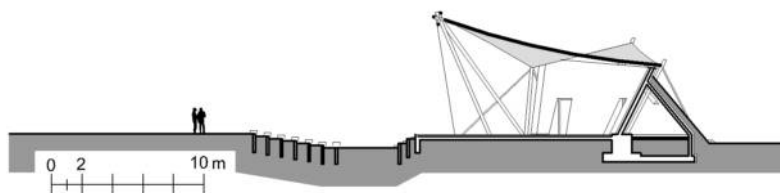


Il. 134. Widok zadaszenia nad sceną w Zubrzycy Górnej

Zubrzyca Górna jest zlokalizowana w południowo-zachodniej części województwa małopolskiego. Znajduje się tam Orawski Park Etnograficzny, jeden z ciekawszych, polskich skansenów. Skansen powstał wokół zachowanych, oryginalnych zabudowań orawskich.

Część obiektów stoi tam od XVIII wieku, a niektóre były jeszcze zamieszkałe w latach 50. Dla poszerzenia oferty kulturalnej, niezbędne okazało się wykonanie sceny, na której mogą prezentować się zespoły folklorystyczne. Koncepcję małego amfiteatru przygotowała Pracownia Architektoniczna Joanny Kołodziej z Krakowa²⁵⁴.

Jego forma miała różnić się od historycznych obiektów, będących eksponatami w parku. Poza tym starano się obiekt maksymalnie wtopić w otoczenie, dlatego widownia została wykonana z łamanego kamienia z drewnianymi siedziskami. Ściany zaplecza od strony sceny podobnie zostały pokryte łamanym kamieniem, natomiast od zewnątrz przewidziano wprowadzenie zielonego pochyłego dachu. Klasyczny układ amfiteatru z okrągłą sceną ma widownię na około 320 miejsc siedzących. Nad sceną o średnicy 16 m przewidziano zadaszenie membranowe. Początkowo miała powstać płaska, napięta powłoka wpisana



Il. 135. Przekrój przez zadaszenie nad sceną w Zubrzycy Górnej

²⁵⁴ Pracownia Architektoniczna Joanna Kołodziej, *Projekt architektoniczno-budowlany. Projekt amfiteatru na terenie Orawskiego Parku Etnograficznego w Zubrzycy Górnej*. 2008.

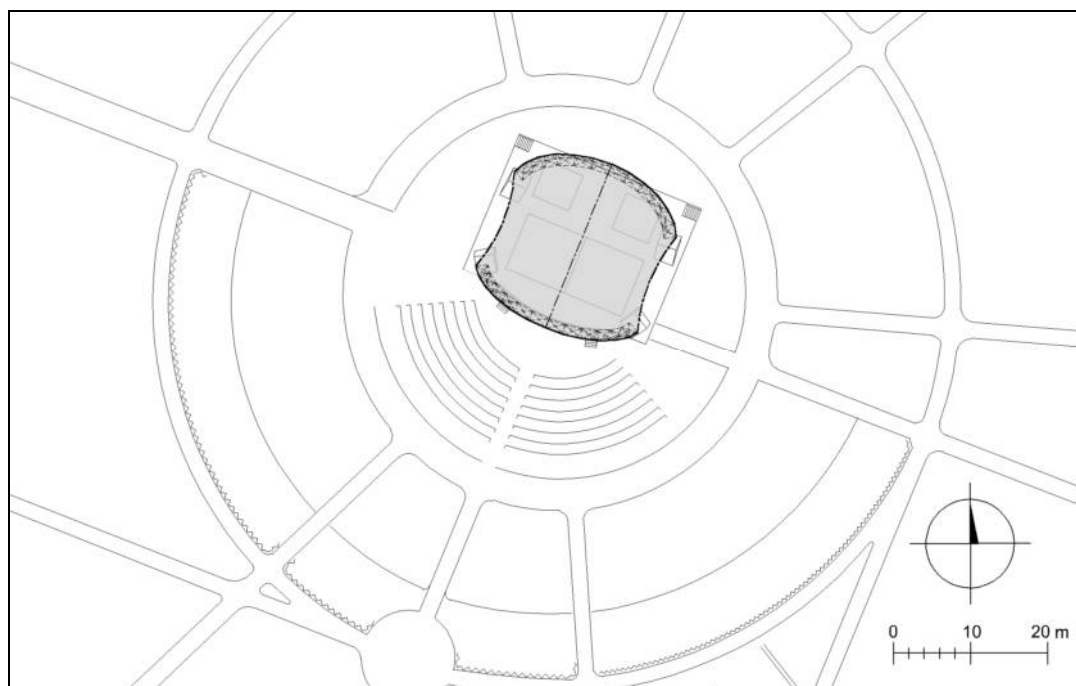
w ośmiobok. Podczas realizacji kształt membrany został zmieniony na formę wieloboczną z narożnikami położonymi na różnych wysokościach tak, aby maksymalnie wygiąć powierzchnię membrany. Duża część obiektu była już gotowa, dlatego trzeba było wprowadzić elementy, które równoważyłyby obciążenia od naciągu membrany. Konieczne okazało się wprowadzenie rozpory znajdującej się nad przednią częścią sceny. Tworzy ona rodzaj ażurowego portalu scenicznego.

Pomimo obniżenia kilku punktów brzegowych i podniesienia innej środkowej części zadasze-

nia ma niewielkie pochylenie. Przy większych opadach powstawały zastoje i gromadziła się woda. Konieczne więc było wprowadzenie otworu i przewodu ułatwiającego spuszczenie wody. W pierwszym sezonie podczas zimy spadła tak duża ilość śniegu, że była obawa o zniszczenie zadaszenia. Ostatecznie zdecydowano się na ściąganie membrany na kolejne sezony zimowe, mimo że powłokę zaprojektowano jako całoroczną. Okazało się, że zdejmowanie i zakładanie nie jest aż tak uciążliwe, a poza tym daje możliwość wyczyszczenia pokrycia.

5.1.20. Zadaszenie nad sceną w Stężycy

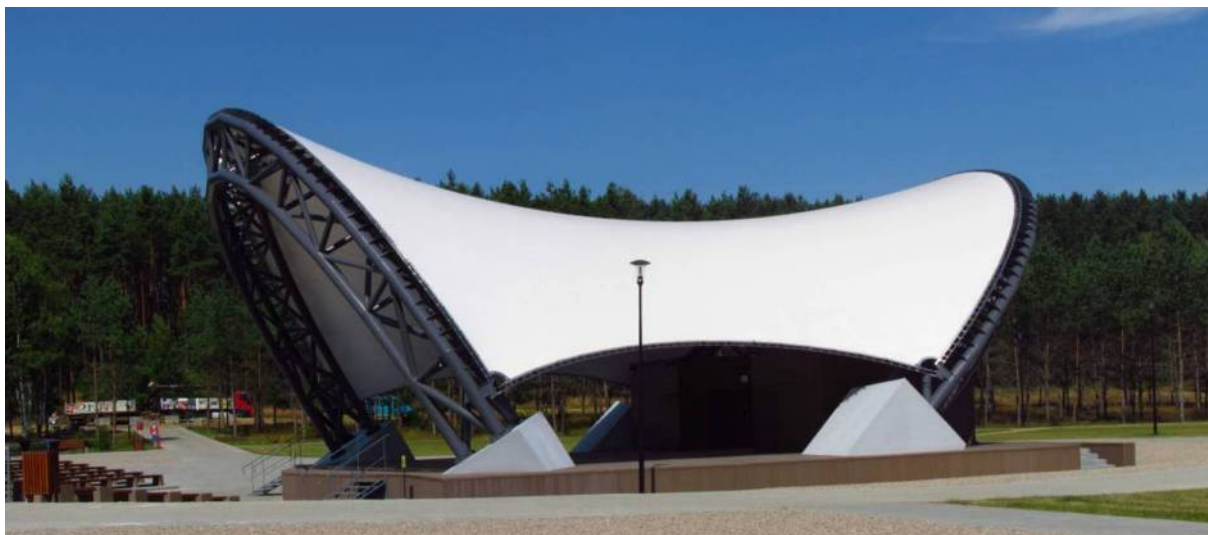
Lokalizacja:	Stężycza, ul. 9 Marca 7,
Projektant:	DWFUP Wanda Łaguna,
Konstrukcja:	k2 kon, Krzysztof Zorn, Jaromir Pelpiński,
Wyk. membrany:	PHU Safex,
Oddanie:	2014



Il. 136. Plan zadaszenia nad sceną w Stężycy

W południowej części województwa pomorskiego znajduje się malowniczy Kaszubski Park Krajobrazowy. W niewielkiej Stężycy powstał kompleks rekreacyjno-sportowo-

turystyczny o łącznej powierzchni 9 ha pod nazwą Nadraduńskiego Centrum Turystyczno-Rekreacyjnego. W ramach tej inwestycji powstały zagospodarowane tereny zielone, przy-

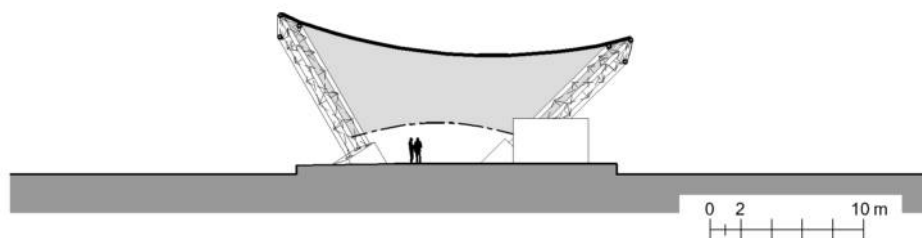


Il. 137. Widok zadaszenia nad sceną w Stężycy

legające do jeziora Raduńskiego Górnego. Ciekawie ukształtowany układ, poprzecinany ścieżkami pieszo-rowerowymi i małą architekturą, uzupełnia ofertę sportowo-rekreacyjną turystycznej miejscowości. Powstała też, jak to jest ujęte w projekcie, otwarta hala sportowa. Stosunkowo duże zadaszenie mieści pod spodem boisko do piłki siatkowej i dwa małe pawilony. Mogą tam również odbywać się różnego rodzaju wydarzenia kulturalne – obiekt może pełnić rolę zadaszonej sceny. Koncepcję całości wykonała pracownia DW Wandy Łaguna z Sopotu²⁵⁵. Jest to jedna z najnowszych budowli z zada-

szeniem membranowym. Powłokę założono w listopadzie 2013 roku, a uroczyste otwarcie obiektu nastąpiło w sierpniu 2014 roku. Membrana jest wykonana z włókien poliestrowych pokrytych PCW.

Zadaszenie ma sprawdzoną formę, opartą na dwóch pochyłych łukach. Konstrukcję ograniczono do dwóch kratownicowych łuków o przekroju trójkątnym. Wydaje się, że jak na takie zadaszenie to łuki są bardzo mocne. Zamocowane są sztywno do wystających betonowych fundamentów. Dzięki takiemu rozwiązaniu udało się wyeliminować odciągi i rozporry, które zwykle równoważą napięcie membra-



Il. 138. Przekrój przez zadaszenie nad sceną w Stężycy

²⁵⁵ Pracownia dw Firma Usługowo-Projektowa Wanda Łaguna, *Projekt budowlano-wykonawczy. Projekt Nadraduńskiego Centrum Sportowo-Rekreacyjnego*. 2011.

ny, ale często utrudniają wykorzystanie najbliższego otoczenia. Obiekt wykonano w najwyższym standardzie, z wykorzystaniem najnowszych rozwiązań technicznych.

Poniżej przedstawione jest porównanie przedstawionych wcześniej obiektów. W zestawieniu ujęto powierzchnię zadaszoną, czyli obszar, który znajduje się pod samą membraną.

Często informacje dotyczące poszczególnych obiektów obejmują powierzchnię całego zadaszzenia, niezależnie od rodzaju pokrycia; na przykład wliczane są świetliki. Natomiast wykonawcy najczęściej podają powierzchnię samej membrany, która ze względu na duże różnice pochylenia utrudnia bezpośrednie porównanie zadaszeń.

Tabela 7

Porównanie zadaszeń zrealizowanych w amfiteatrach

Nr	Obiekt	Rok realizacji zadaszenia	Wielkość widowni [miejsc]	Powierzchnia zadaszona membraną [m ²]
1.	Sopot – Opera Leśna	1964	4 335	4 250
2.	Szczecin – Teatr Letni	2000	4 500	1 500
3.	Warszawa – amfiteatr Sowińskiego	2002	2 000	3 100
4.	Ustroń – amfiteatr	2003/2010	2 800/2 100	1 700
5.	Płock – amfiteatr	2006-2008	3 500	2 770
6.	Warszawa – amfiteatr Bemowo	04.2008	1 000	1 700
7.	Rowy – muszla koncertowa	2009	200	120
8.	Elk – scena	04.2010	–	164
9.	Wisła – amfiteatr	06.2010	1 160	1 890
10.	Kielce – amfiteatr	08.2010	5 500	2 500+1 500*
11.	Kołobrzeg – scena letnia	10.2010	400	690
12.	Łagów – scena amfiteatru	11.2010	630	175
13.	Opole – Amfiteatr Tysiąclecia	2011	3 650	356
14.	Brenna – scena wielofunkcyjna	2011	1 000	343
15.	Węgierska Górka – scena wielofunkcyjna	2012	–	455
16.	Sopot – Opera Leśna	2012	5 038	3 520 + 1 040**
17.	Mrażowo – scena amfiteatru	2012	5 300	~1 200
18.	Śliwice – widownia amfiteatru	2012	300	380
19.	Zubrzyca Górna – scena amfiteatru	2012	320	156
20.	Stężycza – scena amfiteatru	2013	450	440

* Zadaszenie ruchome zwijane na zimę i zadaszenie stałe nad sceną.

** Zadaszenie główne częściowo pokrywa się z zadaszeniem nad antresolą.

Źródło: opracowanie własne

5.2. Stadiony

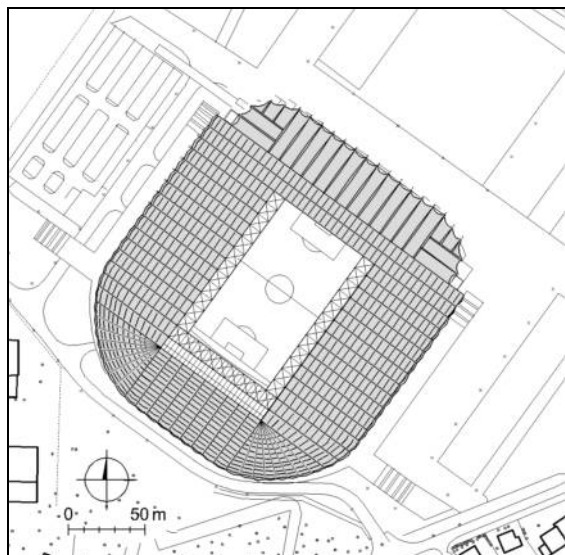
Kluby sportowe identyfikują się ze swoimi stadionami, choć w większości nie są ich właścicielami. To władze samorządowe decydują o inwestowaniu w poszczególne obiekty. Stadiony przede wszystkim są wizytówką miasta, możliwością promocji i miejscem masowych imprez sportowych i kulturalnych²⁵⁶.

W Polsce największe stadiony to stadiony piłkarskie. Jeszcze nie tak dawno niektóre z nich były przestarzałe, zniszczone i wymagały unowocześniania. Dopiero ostatnie lata, a zwłaszcza zorganizowanie Mistrzostw Europy, Euro 2012, spowodowało wyraźne zmiany w podejściu do inwestowania w obiekty sportowe.

Przepisy ściśle określają wymagania, jakie powinien spełniać obiekt w zależności od rangi danej imprezy, od tego, czy dopuszczony jest do organizowania na nim imprez masowych. Jeśli drużyna piłkarska awansuje do wyższej ligi, to musi mieć obiekt spełniający wymagania, inaczej nie dostaje licencji. Czasowo może korzystać z wynajętego obiektu, ale wiąże się to z dodatkowymi kosztami. Zastosowanie odpowiednich rozwiązań technicznych, a zwłaszcza zapewnienie zadaszenia dla określonej liczby widzów poprawiają parametry obiektu.

5.2.1. Stadion miejski w Poznaniu

Lokalizacja:	Poznań, ul. Bułgarska 5/7,
Projektant:	Modern Construction Systems, Wojciech Rzyżyński
Konstrukcja:	PiM – Projekt,
Wyk. membrany:	Kontent, Ryszard Koniewicz,
Oddanie:	2006, 2010



Il. 139. Plan zadaszenia stadionu w Poznaniu

Pierwszym stadionem w Polsce, w którym zastosowano zadaszenie membranowe nad trybunami jest stadion w Poznaniu. Budowany był przez wiele lat. Obecna forma jest wynikiem kilku zmieniających się koncepcji architektonicznych. Miasto Poznań, jeszcze przed przyznaniem Polsce i Ukrainie prawa do organizacji Mistrzostw Europy w piłce nożnej, przystąpiło do modernizacji istniejącego stadionu. Przedstawiona wtedy koncepcja architektoniczna, wykonana przez Modern Construction Systems z Poznania, zakładała zadaszenie trybun całego stadionu²⁵⁷.

Odważna jak na te czasy konstrukcja oparta była na układzie ciągów i napiętej na nich membranie. Jednak ze względu na brak

²⁵⁶ Zdzisław Pelczarski, *Polifunkcyjny megateatr*. Architektura i Biznes 10/1998, s. 40-42.

²⁵⁷ Wojciech Rzyżyński, *Rozbudowa stadionu w Poznaniu*. Architektura-Murator 8/2012, s. 90-94.



Il. 140. Fragment zadaszenia stadionu w Poznaniu

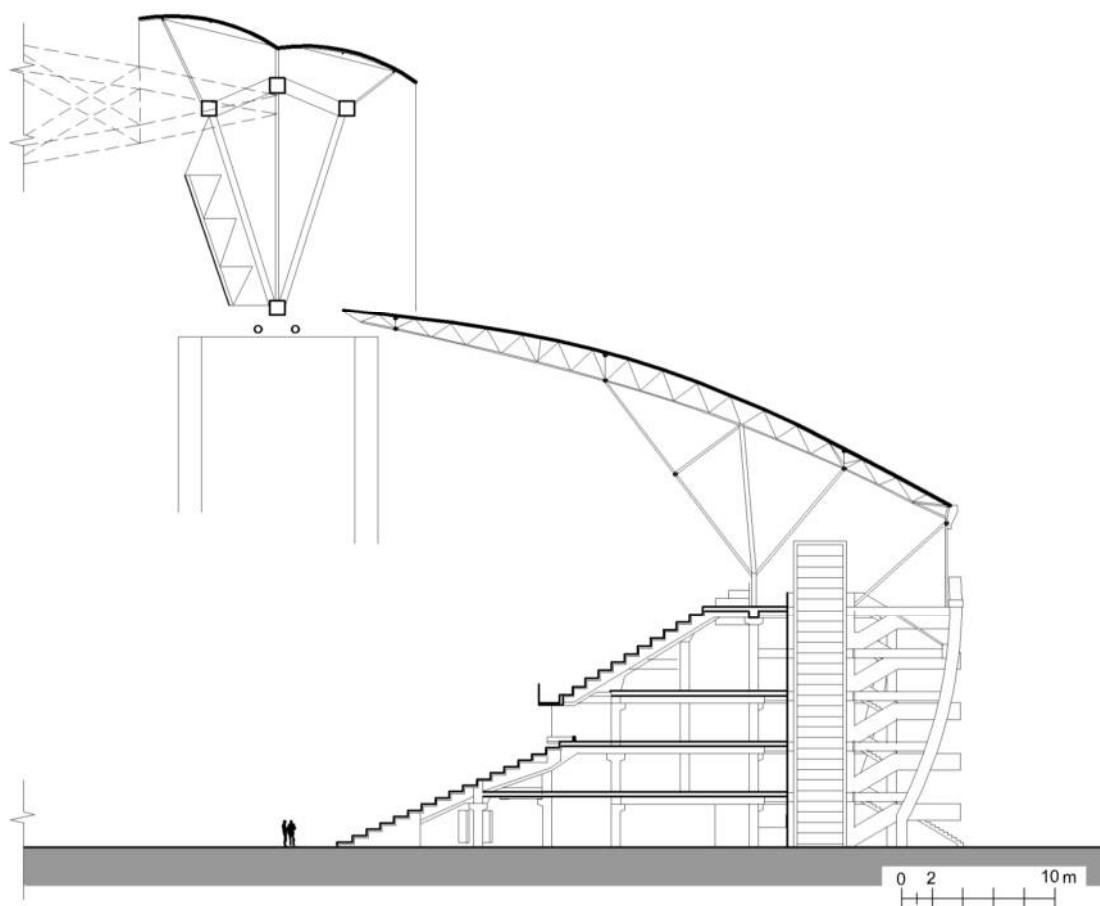


Il. 141. Zadaszenie trybuny IV w Poznaniu – wrzesień 2006

wystarczających funduszy nie zdecydowano się na modernizację stadionu w całości. Podjęto decyzję o przebudowie poszczególnych trybun osobno tak, aby można było na stadionie rozgrywać mecze Lecha Poznań. Konieczna była zmiana koncepcji i wprowadzenie osobnych zadaszeń nad poszczególnymi trybunami. Prace modernizacyjne rozpoczęto od wybudowania brakującej trybuny północno-wschodniej, nazywanej trybuną IV. Zaproponowane zadaszenie oparte zostało na przestrzennym układzie łukowych kratownic. Stalowe kratownice zamocowano do żelbetowej konstrukcji widowni. Zastosowano membranę wykonaną z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Było to pierwsze w Polsce zadaszenie membranowe o takich wymiarach. Duża powierzchnia dachu

pokryta białą, częściowo przepuszczającą światło tkaniną wywiera ogromne wrażenie. Lekka, ażurowa konstrukcja wspiera, w kolorach klubowych, dobrze kontrastuje z zastosowanym pokryciem.

Poszczególne panele membran zamocowane są z boku do łukowych kratownic. Rozstaw pomiędzy kratownicami wynosi 9 m. Długość największych paneli dochodzi do 40 m. Wzdłuż krawędzi czołowych zastosowano cięgna brzegowe, co powoduje delikatne wyginanie linii brzegowej zadaszenia. Poza kratownicami bocznymi, membrana nie jest dodatkowo podpierana. Poniżej membrany znajdują się prostopadłe kratownice, ale pełniące jedynie funkcję rozpór i usztywnień poprzecznych. Celowo obniżono je tak, aby nie stykały



Il. 142. Przekrój przez IV trybunę stadionu w Poznaniu



Il. 143. Widok stadionu w Poznaniu

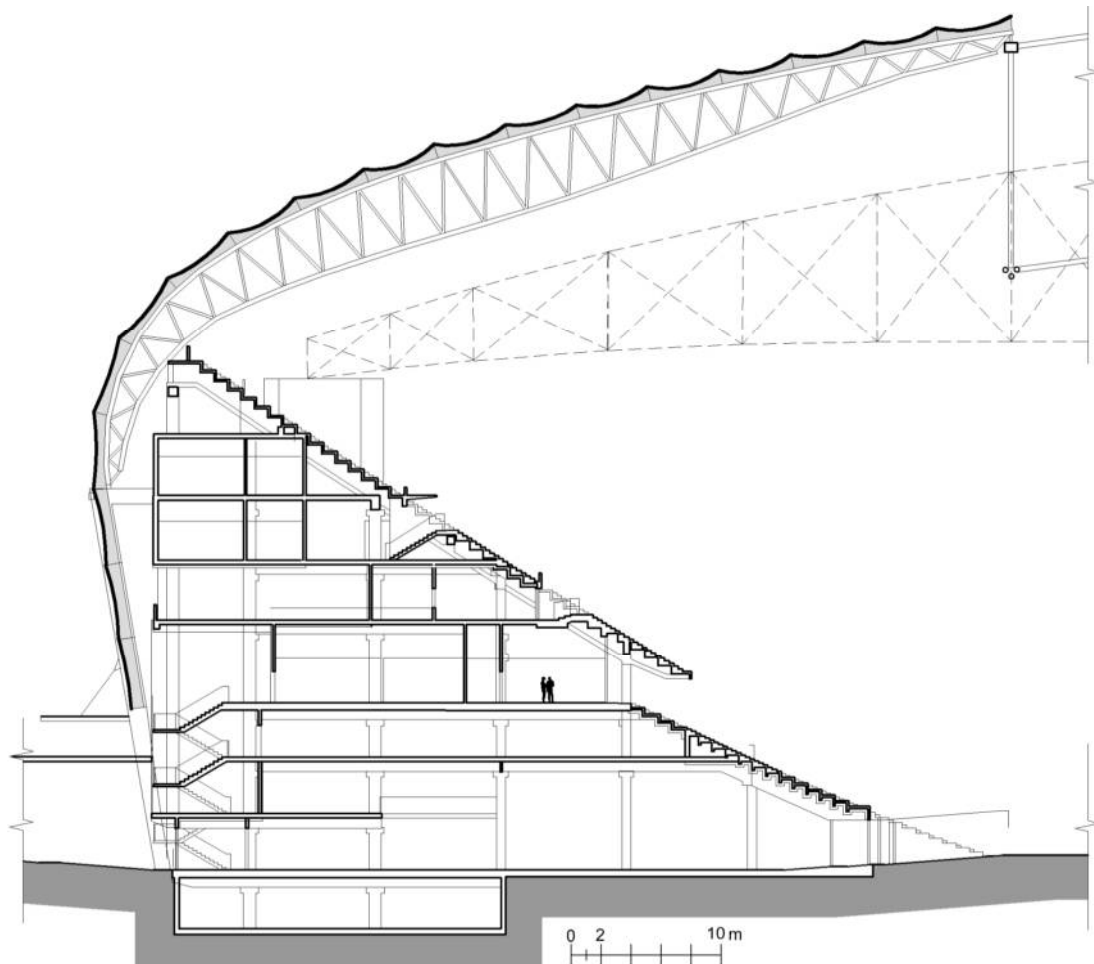
się z membraną nawet przy obciążeniu śniegiem, tym samym nie stanowiły progów utrudniających zsuwanie się śniegu. Połączenia paneli pokryto niebieskimi pasami, co tworzy nad trybuną IV charakterystyczny wzór, zgodny z układem konstrukcyjnym.

Podczas przebudowy kolejnej trybuny, południowo-zachodniej, pojawiła się informacja, że w Poznaniu będą rozgrywane mecze w trakcie Mistrzostw Europy. Zaistniała możliwość sfinansowania przebudowy całego stadionu, ale konieczne było zwiększenie liczby miejsc na trybunach. Trzeba było podjąć decyzję, czy rozebrać niedawno zbudowaną trybunę czy samo zadaszenie. W dalszym ciągu problemem były mecze ligowe, dlatego wszelkie prace budowlane prowadzono poza płytą boiska lub w okresie przerwy między rozgrywkami. Ostatecznie przyjęto nietypowy układ konstrukcyjny, wspólny dla trzech pozostałych trybun. Cztery olbrzymie stalowe kratownice tworzą konstrukcję główną dachu, na nich opierają się kratownice łukowe. W miejscu rozebranych, charakterystycznych dla poznańskiego stadionu, żelbetowych jupiterów wprowadzono cztery olbrzymie, żelbetowe podpory. Wewnątrz tych podpór umieszczono główne klatki schodowe. Na nich oparto dwie poprzeczne kratownice stadionu o rozpiętościach 175 i 159 m.

Aby zwiększyć sztywność całej konstrukcji, kratownice wzmocniono stalowymi cięgnami, umieszczonymi w dolnej części kratownic. Na kratownicach poprzecznych oparto kratownice podłużne, o rozpiętości 135 m. Ze względu na konieczność udostępnienia płyty boiska na mecze klubowe, poszczególne dźwigary musiały być montowane poza płytą boiska. Dopiero gotowe dźwigary podnoszono i przesuwno. Była to jedna z największych tego typu operacji w historii polskiego budownictwa. Tak powstała konstrukcja stanowi górne oparcie dla kratownic łukowych. U dołu kratownice te opierają się o żelbetowe słupy trybun. Rozstaw pomiędzy nimi wynosi 9 m, podobnie jak we wcześniej wykonanej trybunie IV. Pomiedzy łukowymi kratownicami wprowadzone są rurowe łuki, nadające membranę odpowiednią krzywiznę. W ten sposób powstają charakterystyczne wypukłości widoczne od zewnątrz stadionu. Odległości pomiędzy łukami wynoszą około 5 m. W przypadku stadionu w Poznaniu trudno mówić o samym zadaszeniu, gdyż jest to jedyny w Polsce obiekt, w którym membrana została wykorzystana jednocześnie, jako zadaszenie i osłona elewacji. Powstała w ten sposób forma ma kształt spłaszczonej kopuły z prostokątnym otworem w środkowej części. Nowa część

dachu jest wyraźnie większa i wyższa od wcześniej zbudowanej trybuny IV. Prześwit pomiędzy niezależnymi częściami dachu tworzy charakterystyczny otwór. Po przeciwnej, południowo-zachodniej stronie stadionu membrana rozpoczyna się wyżej, tworząc dodatko-

wy otwór, zwiększający przewietrzanie wnętrza. Według koncepcji miała tam być część hotelowa. Sumaryczna powierzchnia zadaszona wynosi około 30 000 m², a najdłuższe bryty dochodzą do 90 m.



Il. 144. Przekrój przez III trybunę stadionu w Poznaniu

5.2.2. Zadaszenie trybuny stadionu w Częstochowie

Lokalizacja:	Częstochowa, ul. Olsztyńska 123/127,
Projektant:	Studio Projektowe SPAK, Anna Kasprzyk,
Konstrukcja:	Biprohut,
Wyk. membrany:	Hightex,
Oddanie:	2007



Il. 145. Plan zadaszenia trybuny na stadionie w Częstochowie

We wschodniej części Częstochowy znajduje się stadion, którego historia sięga lat 40. XX wieku. Jest to jedyny stadion żużlowy z prezentowanych w tej monografii. Gospodarzem obiektu jest drużyna Włókniarz Częstochowa. W latach 2005-2007 przeprowadzono

gruntowny remont obiektu. W pierwszej kolejności zmodernizowano tor żużlowy tak, aby spełniał wymagane parametry. Następnie przystąpiono do przebudowy widowni z budynkiem sędziowskim.



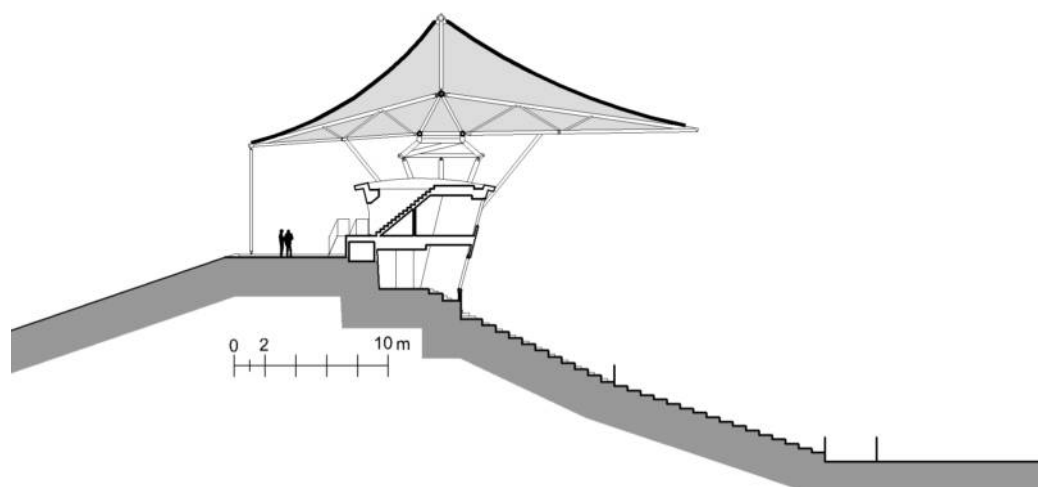
Il. 146. Widok zadaszenia trybuny na stadionie w Częstochowie

Koncepcję architektoniczną przebudowy całości przygotowała pracownia SPAK z Warszawy²⁵⁸. Do dnia dzisiejszego niestety została zrealizowana tylko część śmiałego projektu. Wykonano widownię na 16 850 miejsc, budynek sędziowski wraz zadaszeniem nad sektorem VIP oraz nowoczesne oświetlenie. Niestety nie zrealizowano głównego budynku klubowego, przeznaczonego dla zawodników i kibiców, który miał się znajdować po przeciwnej stronie stadionu.

Zadaszenie jest ciekawym układem konstrukcyjnym o wymiarach 34×29 m. Ma formę powstałą jakby z połączenia trzech ostrosłupowych modułów. Pod nim znajdują się budynek sędziowski oraz taras, na którym podczas zawodów instalowane są kamery telewizyjne. Zadaszenie nie jest związane konstrukcyjnie z budynkiem sędziowskim. Oparte jest na dwóch słupach ustawionych obok budynku. Pomiędzy nimi znajduje się przestrzenna łukowa kratownica, która jest podporą dla trzech masztów napinających membranę. Dodatkowo konstrukcja podparta jest trzema słupami, znajdującymi się za budynkiem. Podpory te służą zapewnieniu stabilności układu. Z tej samej strony budynku znajduje się główne

wejście na stadion, od strony miasta i duży parking. Z tego powodu słupy wykorzystywane są do rozwieszania reklam. Zadaszenie ma trzy wierzchołki, ale nie jest podzielone krawędziami koszowymi. Forma membrany w tym przypadku jest wyjątkowo złożona przestrzennie. Przeważnie przy zamocowaniu membrany do wewnętrznych pylonów stosowane są pierścienie. Natomiast w omawianym zadaszeniu zastosowano proste listwy mocujące. Podkreśla to ostre zakończenia i zamiast form stożkowych powstały raczej formy ostrosłupowe. Nawet układ brytów nie jest promienisty, jak to jest stosowane w formach stożkowych. Na powłoce widoczne są krawędzie grzbietowe, wynikające z przebiegu pod membraną cięgien, łączących wierzchołki zadaszenia z punktami zamocowania. W tym zadaszeniu membrana wykonana jest z włókien szklanych pokrytych PTFE.

Nowoczesna forma zadaszenia membranowego przypomina podobne, występujące na różnego rodzaju torach wyścigowych, np. tor Formuły 1 w Malezji. Wysoko położone zadaszenie jest charakterystycznym elementem stadionu. Jego biel niejako kontrastuje ze sportem uznawanym za czarny.

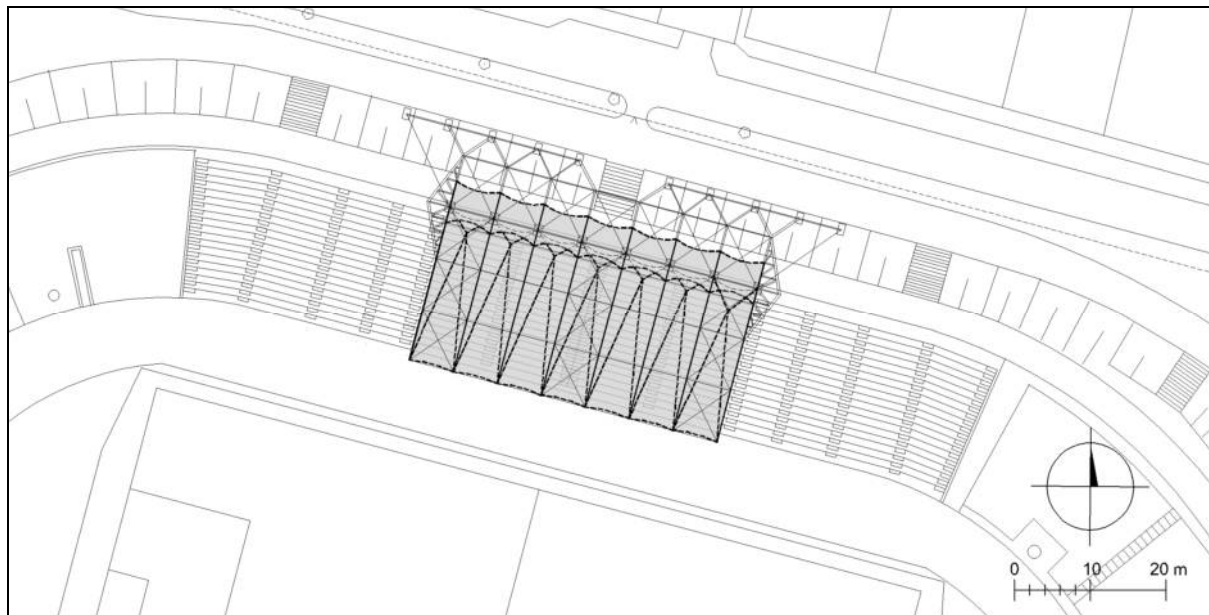


Il. 147. Przekrój przez zadaszenie trybuny na stadionie w Częstochowie

²⁵⁸ SPAK, *Przebudowa stadionu miejskiego przy ul. Olsztyńskiej w Częstochowie*, 2005.

5.2.3. Zadaszenie trybuny na stadionie w Bytomiu

Lokalizacja:	Bytom, ul. Olimpijska 4,
Projektant:	Modern Construction Systems, Wojciech Rzyński,
Konstrukcja:	Modern Construction Systems,
Wyk. membrany:	Kontent, Ryszard Koniewicz,
Oddanie:	2009



Il. 148. Plan zadaszenia trybuny na stadionie w Bytomiu

Od 2007 roku, kiedy Polonia Bytom znowu zaczęła odnosić poważne sukcesy, przystąpiono do modernizacji stadionu przy alei Olimpijskiej. Wymogi stawiane obiektom, na których mogą odbywać się mecze Ekstraklasy, przewidują zadaszenie trybun dla przynajmniej 1000 widzów. Zdecydowano się na wybór koncepcji przedstawionej przez Modern Construction Systems z Poznania²⁵⁹. Projekt przewidywał zadaszenie wszystkich trybun, ale dawał też możliwość podzielenia inwestycji na wiele etapów. Wyjątkowo niekorzystne warunki gruntowe, szkody górnicze wymusiły zastosowanie odpowiedniej konstrukcji. Skutkiem osiadania gruntu na tym terenie było między innymi pochycenie nowo wyremontowanej płyty boiska. Różnica wysokości pomiędzy

skrajnymi punktami dochodziła do 50 cm. Z tego powodu zaproponowano jak najlżejszą konstrukcję stalową z membraną, podzieloną na powtarzalne moduły. Dzięki temu, w razie potrzeby można skorygować położenie każdej części. Pokrycie membraną nie jest sztywne, jest lekkie i może częściowo dopasować się do konstrukcji wsporczej. Dużym problemem było zapewnienie odpowiedniego naprężenia membrany. W przypadku konstrukcji zamkniętej np. na pierścieniu, wszystkie panele membrany są równomiernie naprężone. Dużo trudniej jest to uzyskać projektując tylko wycinek, fragment konstrukcji. Trzeba wtedy wprowadzać odciążenia i rozpory, konstrukcja traci wtedy na wizualnej lekkości. Zgodnie z wymogami, na początek przewidziano wprowadzenie

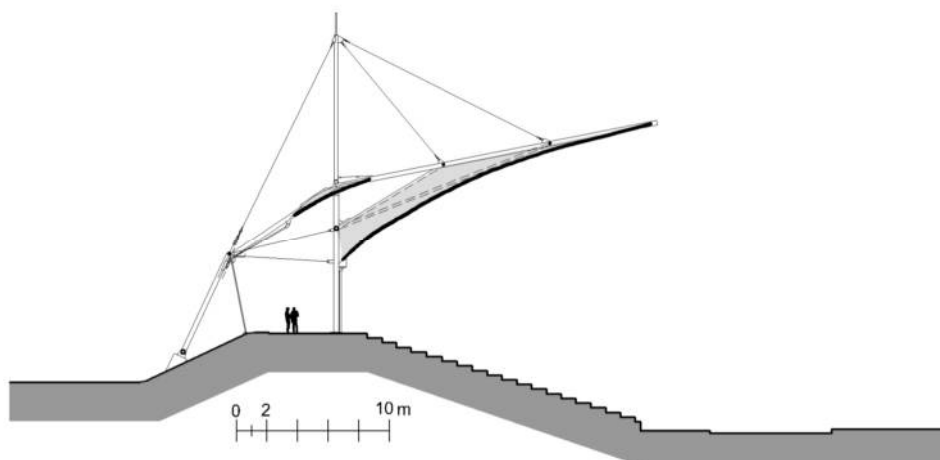
²⁵⁹ Modern Construction Systems, Projekt budowlano-wykonawczy zadaszenia trybuny stadionu *sportowego w Bytomiu*, 2008.



Il. 149. Widok zadaszenia trybuny na stadionie w Bytomiu

zadaszenia jedynie nad częścią trybuny północnej. Wykonano 8 stalowych wsporników, a pomiędzy nimi rozpięto 7 dolnych i 7 górnych paneli membrany. Dźwigary stalowe, o przekroju skrzynkowym, opierają się na koronie trybuny. Wwiercono w nią żelbetowe pale, aby uzyskać punktowe oparcie. Dla zrównoważenia wspornika z tyłu skarpy zakończono konstrukcję za pomocą zastrzałów i odciągów. Rozpięta membrana wykonana jest z tkaniny technicznej z włókien poliestrowych

pokrytych PCW. Zastosowano ciekawy, dwuwarstwowy układ membrany. Poszczególne panele mocowane są do wspornikowych dźwigarów. Dodatkowo w środkowej części wprowadzono ciągną zapewniającą właściwe naprężenie wstępne membrany i zwiększającą krzywiznę powłoki. Dzięki temu powstaje rodzaj linii koszowej o większym pochyleniu niż pozostała część powłoki. Stalowe dźwigary odsunięte są od siebie na 6 m, a wystają ponad trybunę na 24 m. Zadaszenie jest położone



Il. 150. Przekrój przez zadaszenie trybuny na stadionie w Bytomiu

dosyć wysoko, ponieważ w jego przedniej części przewidywano wprowadzenie pasa reklam i nowego oświetlenia. Wzdłuż krawędzi bocznych skrajnych dźwigarów wykonano kratownice. Przenoszą one poziome obciążenia od membrany. W przypadku rozbudowy zadaszenia powinny zostać odcięte i przeniesione na kolejne skrajne dźwigary.

Po kilku latach użytkowania obiektu z zadaszeniem widać, że pochylenie membrany w prawidłowy sposób odprowadza wodę i pozwala na samoczynne zsuwanie śniegu. Kilka razy trzeba było go odśnieżyć. Zdarzało się, że śnieg gromadził się na membranie, ale wtedy wystarczyło go poruszyć i sam się zsuwał.

5.2.4. Zadaszenie trybuny stadionu w Sulejówku

Lokalizacja:	Sulejówek, ul. Krasińskiego 6,
Projektant:	PUCH Studio Autorskie, Ceno Todorow,
Konstrukcja:	Biuro Projektowo Inżynierskie Konstruktornia,
Wyk. membrany:	Roland International,
Oddanie:	2010



Il. 151. Plan zadaszenia trybuny na stadionie w Sulejówku

Wraz z przyznaniem Polsce i Ukrainie możliwości zorganizowania Mistrzostw Europy w piłce nożnej w Sulejówku przystąpiono do modernizacji niewielkiego stadionu. Miejsowość położona w pobliżu stolicy starała się, aby zostać bazą treningowo-noclegową dla

jednej z drużyn biorących udział w mistrzostwach. W rywalizacji z innymi miastami ostatecznie Sulejówek został wybrany przez reprezentację Rosji.

Koncepcję architektoniczną przebudowy przygotowała pracownia PUCH z Warszawy²⁶⁰.

²⁶⁰ PUCH, *Park Glinianki – Centrum Pobytowe EURO 2012, budowa dwóch boisk do piłki nożnej z trybunami*, 2009.

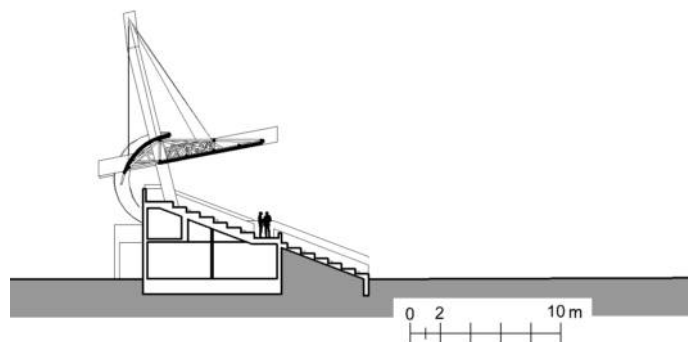


Il. 152. Widok zadaszenia trybuny na stadionie w Sulejówku

Dzięki niej powstał budynek o nietypowym kształcie. Dolna część to szatnie dla zawodników i pomieszczenia klubowe. Górna to zadaszona widownia na 1200 osób. Najbardziej wyróżniającym elementem stadionu jest zadaszenie nad widownią. Inspiracją dla tej konstrukcji był orzeł z rozpostartymi skrzydłami. Początkowo zakładano wykonanie lekkiego zadaszenia z drewna klejonego. Ostatecznie zrealizowano je w konstrukcji stalowej pokrytej membraną. Oddanie gotowego obiektu odbyło się w 2010 roku.

Układ całego zadaszenia opiera się na centralnym pylonie i podwieszonym do niego stalowym ruszcie kratownicowym. Dużą dynamikę formie nadają jej poszczególne części. Centralny pylon odchylony jest do tyłu i oparty na

dwóch rozstawionych nogach. Ruszt podzielono na dwie, symetryczne części przez centralny wspornik, ostro wystający do przodu, w kierunku boiska. Wspornik z tyłu rozszerza się, tworząc zadaszenie nad wejściem do budynku. Ruszt kratownicowy ma trójkątny przekrój, dzięki czemu zakończony jest ostrą krawędzią. Z tyłu zamocowany jest dodatkowymi elementami, przypominającymi lotki skrzydeł. Układ stalowych kratownic w ruszcie ma rozstaw 3,3 m. Całość obłożona została napiętą membraną. Powstała forma z daleka przypomina startującego białego ptaka z rozpostartymi skrzydłami. Może się również kojarzyć z wczesnymi konstrukcjami lotniczymi, wzmocnionymi cięgnami. Na widowni rzeczywiście odnosi się wrażenie przebywania



Il. 153. Przekrój przez trybunę stadionu w Sulejówku

pod skrzydłem samolotu, ze względu na delikatnie wygiętą białą, błyszczącą powłokę.

Membrana w tym przypadku została potraktowana bardziej jako materiał obciowy. Główna część zadaszenia ma membranę podwieszoną pod konstrukcją. Dzięki temu od dołu uzyskano gładką powierzchnię zadaszenia. Membrana mocowana jest do płaskich, równoległych dźwigarów, co powoduje, że nie ma charakterystycznej krzywizny. Dla zabezpieczenia jej przed podmuchami wiatru i flaterem, pomiędzy głównymi dźwigarami wprowadzone są

dodatkowe pręty, które przez docisk od góry zwiększają napięcie membrany. Poza główną częścią zadaszenia, z tyłu umieszczone są dodatkowe panele, zamocowane do łukowych elementów konstrukcji. Chronią one tylne rzędy widowni przed wiatrem i opadami. W sumie uzyskano zadaszenie o powierzchni ponad 450 m².

Ciekawy efekt wizualny całości powoduje, że obiekt może być ikoną miasta. Miasta, które nadal ponosi koszty jego wybudowania.

5.2.5. Stadion w Gdyni

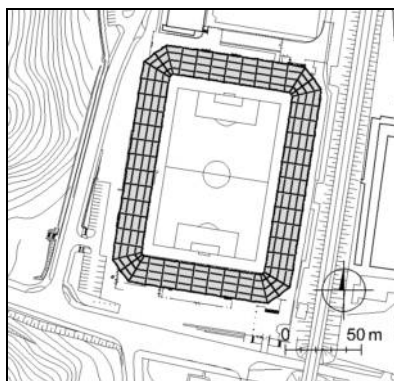
Lokalizacja:	Gdynia ul. Olimpijska 5,
Projektant:	SPAK, Studio Projektowe Anny Kasprzyk
Konstrukcja:	SPAK, Studio Projektowe Anny Kasprzyk
Wyk. membrany:	Taiyo Europe,
Oddanie:	2010



Il. 154. Plan fragmentu zadaszenia stadionu w Gdyni

Wcześniejszy stadion w Gdyni powstał w latach 60. XX wieku. Konieczne było unowocześnienie starego obiektu, dlatego w 2009 roku przystąpiono do rozbiórki i wybudowania nieco przesuniętego nowego sta-

dionu. Wąska działka położona pomiędzy linią kolejową od wschodu i zalesionymi wzgórzami od zachodu miała mocno ograniczone możliwości przebudowy. Gospodarzem obiektu jest klub Arka Gdynia.



Il. 155. Plan stadionu w Gdyni

Koncepcję architektoniczną wykonała pracownia SPAK z Warszawy. Przewidziano całkowicie zadaszoną widownię na 15 100 miejsc^{261, 262}. Zwarta bryła stadionu, oparta na zamkniętym prostokącie ze ściętymi narożami, podzielona została powtarzalnymi elementami konstrukcyjnymi. Od zewnątrz szarą betonową elewację, dodatkowo osłonięto stalową siatką. Natomiast od środka widownię stanowią kolo-

rowe, żółto-niebieskie siedzenia. Ponad nimi unosi się lekkie i jasne zadaszenie membranowe. Wykonano je z tkaniny technicznej z włókien szklanych pokrytych PTFE. Zastosowanie tej tkaniny daje wyraźne korzyści, jak twierdzi projektantka. Zwiększona przezroczystość pozwala na wykorzystanie światła dziennego. Dzięki temu na trybunach nie ma ciemnych miejsc. Decyzja o wyborze membrany jako materiału pokryciowego została podjęta dla podkreślenia nadmorskiego charakteru miasta. Jasna membrana zamocowana do stalowej konstrukcji ma nawiązywać do żagli. Biały kolor pokrycia ma też kontrastować z zielonymi wzgórzami wokół stadionu. Architekci mieli już doświadczenie w projektowaniu zadaszenia membranowego na stadionie w Częstochowie.

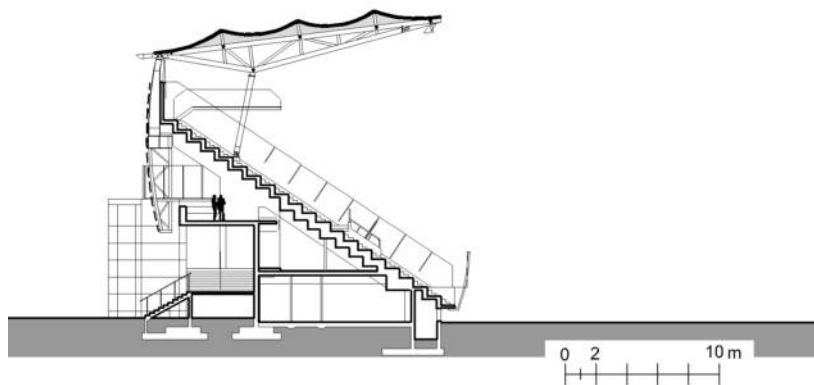
Konstrukcję zadaszenia wykonano jako układ równoległych kratownic wspornikowych. Sta-



Il. 156. Widok zadaszenia stadionu w Gdyni

²⁶¹ SPAK, *Projekt wykonawczy – Stadion piłkarski w Gdyni przy ul. Olimpijskiej*, 2009.

²⁶² Joanna Jabłońska, *Stadion piłkarski w Gdyni, nowy obiekt sportowy*. Świat Architektury, 3/2011. s. 36-40.



Il. 157. Przekrój przez zadaszenie stadionu w Gdyni

lowe dźwigary zamocowano do żelbetowych elementów ściany osłonowej i podparto pochylonymi słupami, opartymi o widownię. Dźwigary te wystają w kierunku płyty boiska na ponad 13 m. Rozstaw pomiędzy nimi wynosi 10 m. W typowych polach membrana ma kształt zbliżony do prostokąta, a w narożach do trójkąta. Wszystkich paneli jest 52 (36 prostokątnych i 16 trójkątnych – narożnikowych). Poszczególne panele przymocowano wzdłuż bo-

ków do dźwigarów nośnych, a z przodu i tyłu do cięgien brzegowych. Dodatkowo poszczególne panele podparte są trzema łukowymi płatwiami. Odległości pomiędzy tymi łukami wynoszą 5 m, dzięki temu membrana nie jest płaska i ma odpowiednią krzywiznę. Górna część dźwigarów ma nachylenie 12%, co ułatwia odprowadzanie wody i śniegu. Gotowy obiekt został oddany w lutym 2011 roku.

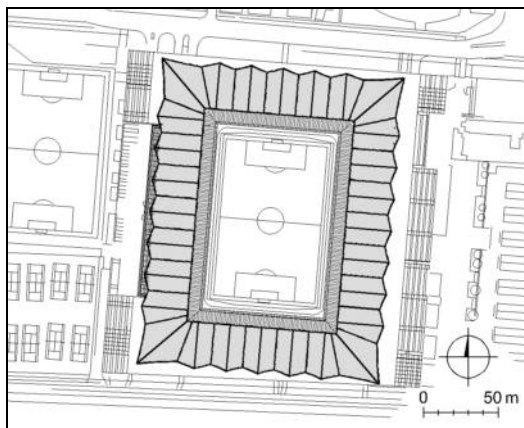
5.2.6. Stadion miejski w Warszawie

Lokalizacja:	Warszawa, ul. Łazienkowska 3,
Projektant:	JSK Architekci, psb architekten, jsb partners
Konstrukcja:	Schleich-Bergermann und Partner,
Wyk. membrany:	Taiyo Europe GmbH,
Oddanie:	2011

Stadion miejski w Warszawie powstał już przed II wojną światową. Położony jest w centralnej części miasta przy ulicy Łazienkowskiej. Gospodarzem obiektu jest drużyna Legia Warszawa. Wysokie miejsca drużyny w ekstraklasie i awans do Ligi Mistrzów wymusiły dostosowanie obiektu do podwyższonych wymagań najwyższej klasy²⁶³. Problemem utrudniającym realizację były

sprawy prawne, finansowe, a nawet konserwatorskie. Wynikało to z położenia stadionu przy Osi Stanisławowskiej i Kanale Piaseczyńskim. Poza tym niewielka odległość od Zamku Ujazdowskiego nie pozwalała na zastosowanie wysokiej konstrukcji, aby nie wprowadzać bryły, która dominowałaby w krajobrazie. Nawet elewacja stadionu wymagała zachowania oryginalnej wersji.

²⁶³ Grzegorz Stiasny, Wojciech Kryński, *Nowy stadion Legii w Warszawie*, Architektura-Murator 10/2010, s. 46-57.

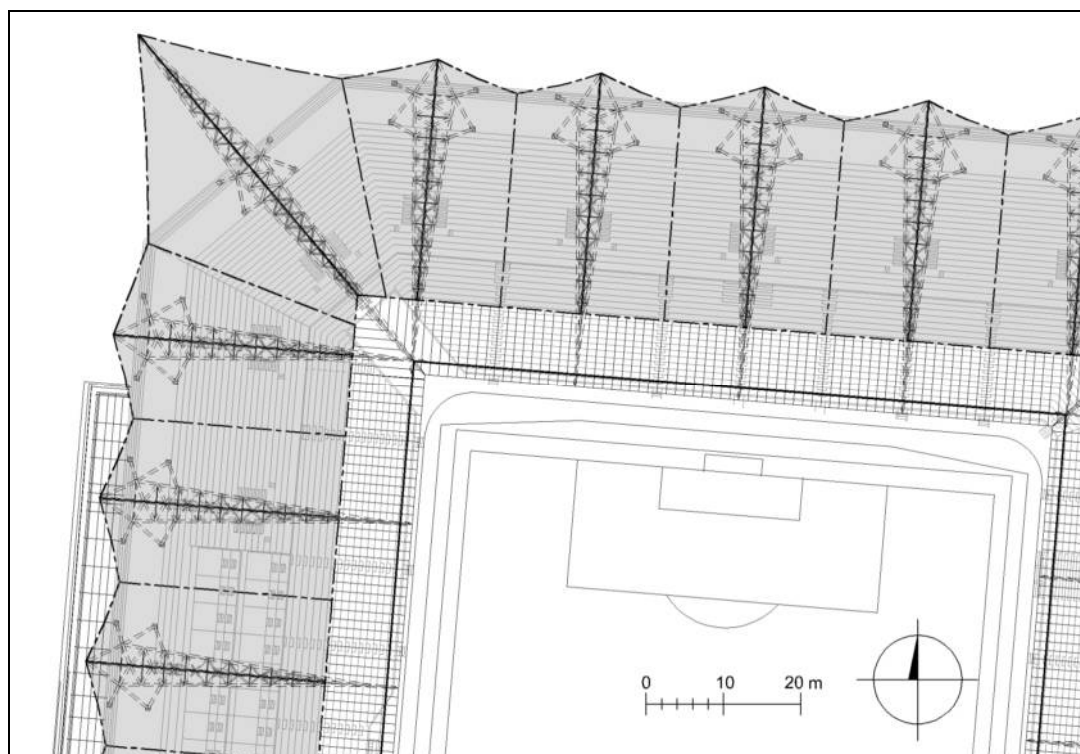


Il. 158. Plan stadionu miejskiego w Warszawie

Koncepcję architektoniczną zatwierdzoną do realizacji wykonała pracownia JSK Architekci²⁶⁴. W 2008 roku przystąpiono do rozbiórki istniejącego obiektu, a wiosną 2011 roku oddano nowy stadion z wszystkimi zadaszonymi trybunami. Widownia liczy 31 100 miejsc siedzących. Wysokość całego stadionu ostatecznie została ograniczona do

20 m, ze względu na ochronę krajobrazu. Płasko zakończone dźwigary wspornikowe podtrzymują lekkie zadaszenie.

Na żelbetowej koronie stadionu zamocowanych jest 28 stalowych, kratownicowych dźwigarów. Tworzą one regularny prostokąt dachu. Charakterystyczne narożne dźwigary daleko wystają na zewnątrz ściętych narożników stadionu. Membrany zamocowane są do kratownicowych dźwigarów. Razem pokrycie stanowi 56 czworobocznych paneli. Wewnętrzna krawędź dachu przedłużona jest pasem pokrytym płytami poliwęglanowymi. Zadaszenie ma formę pofałdowaną z na przemian położonymi krawędziami grzbietowymi i koszowymi. W miejscach, w których znajdują się dźwigary są krawędzie grzbietowe, a pomiędzy nimi znajdują się pojedyncze cięgna napinające. Powstają tam krawędzie koszowe. Zadaszenie wystaje poza krawędź trybun i tworzy charak-



Il. 159. Fragment dachu stadionu miejskiego w Warszawie

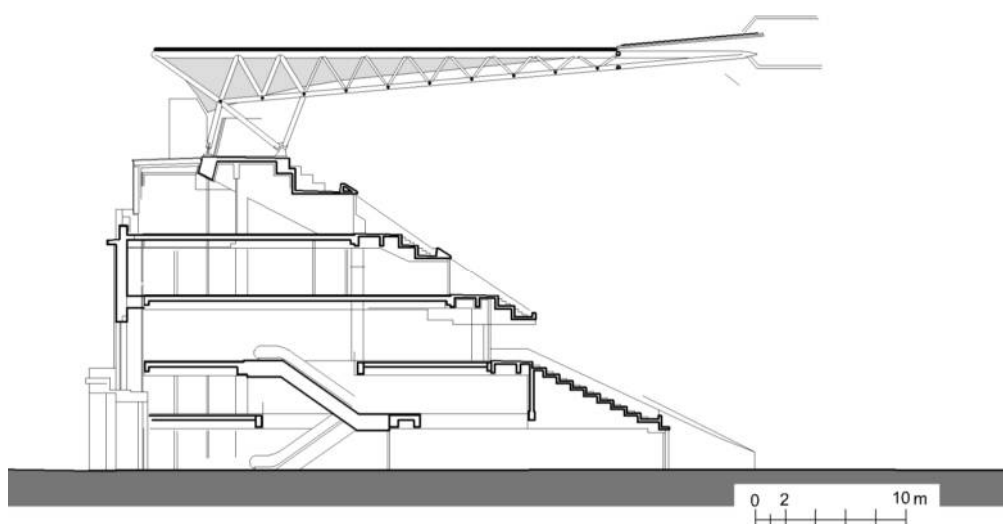
²⁶⁴ Joanna Jabłońska, *Stadion Legii, Warszawska realizacja pracowni JSK Architekci*. Świat Architektury 7/2010, s. 14-25.



Il. 160. Zewnętrzny widok stadionu miejskiego w Warszawie

terystyczną łamaną linię, widoczną na elewacjach. Najdalej wystają wspomniane wcześniej narożniki dachu. Typowe czworoboczne panele mają około 10 m szerokości i 30 m długości²⁶⁵. Natomiast w narożnikach szerokość zwiększa się do 20 m, a długość do 40 m.

Dach wykonany jest z włókien szklanych, pokrytych PTFE, dzięki temu przepuszcza dużo światła. Mocno naprężone ciętna brzegowe są mało wygięte. Nawet poszczególne panele położone są stosunkowo płasko, z prawie niedostrzegalną krzywizną.



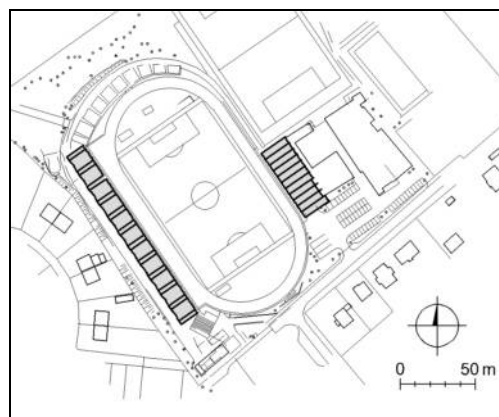
Il. 161. Przekrój przez trybunę z zadaszeniem stadionu miejskiego w Warszawie

²⁶⁵ Łukasz Rduch, Ryszard Walentyński, *Przekrycie trybuny stadionu na przykładzie stadionu piłkarskiego Legii w Warszawie*. Nowoczesne Hale 1/15, s. 29-34.

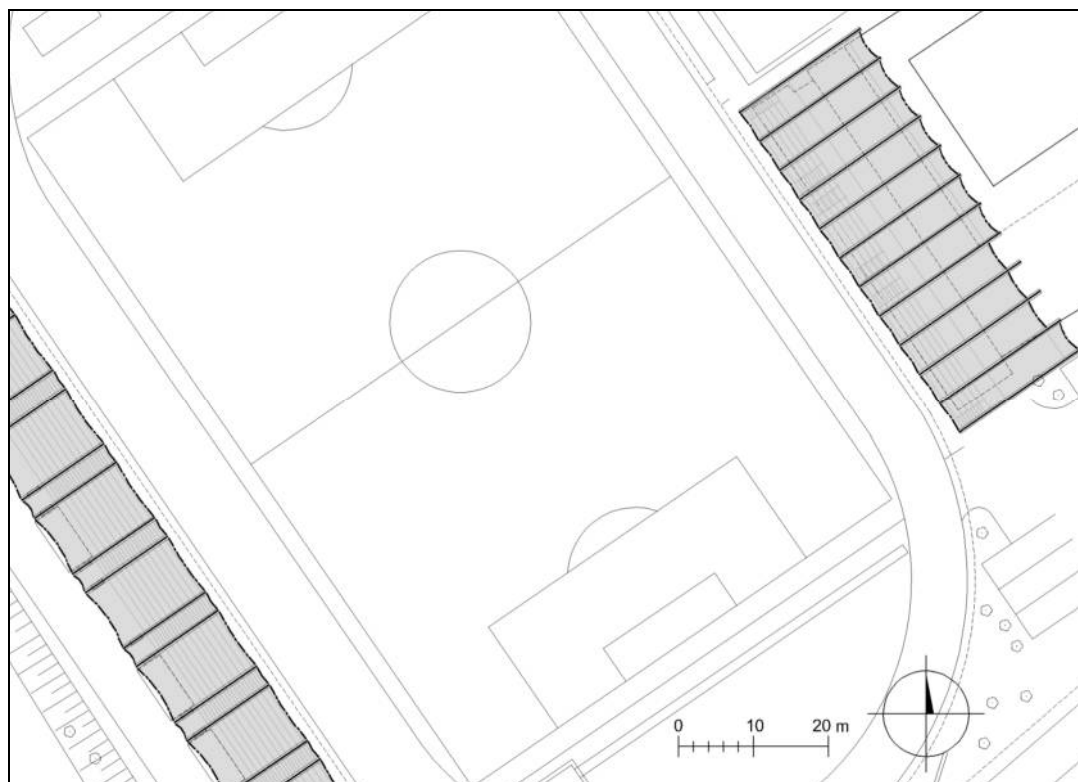
5.2.7. Zadaszenia na stadionie w Puławach

Lokalizacja:	Puławy, ul. Hauke-Bossaka 1,
Projektant:	md-Polska, Robert Dawidowski,
Konstrukcja:	Konstruktor s.c.,
Wyk. membrany:	Graboplan,
Oddanie:	2011

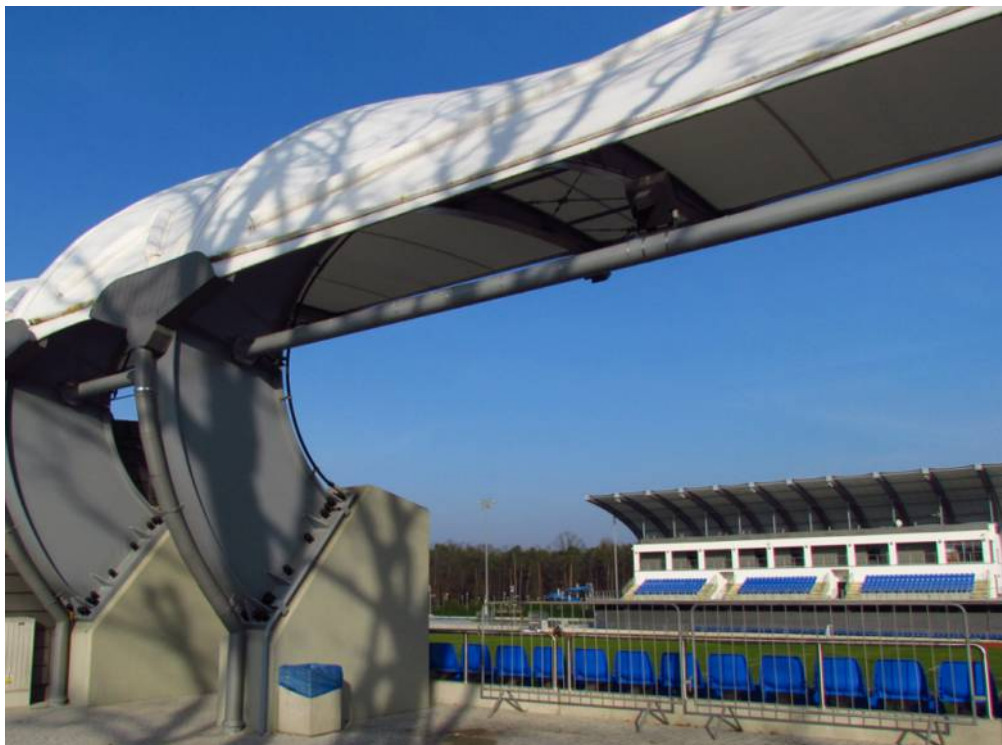
Wraz z możliwościami zorganizowania Mistrzostw Europy w piłce nożnej w Polsce, wiele miejscowości postanowiło unowocześnić swoją bazę obiektów sportowych. Jedną z nich są Puławy. Mimo wizyt kilku ważnych drużyn, ostatecznie nie udało się namówić żadnej, aby Puławy były dla nich bazą sportowo-noclegową podczas mistrzostw. Ze względu na wieloletnie tradycje, stadion od początku projektowany był razem z pełnym wyposażeniem lekkoatletycznym. Pełnowymiarowa bieżnia powiększa wymiary stadionu, ale też odsuwa widownię od płyty boiska.



Il. 162. Plan stadionu w Puławach



Il. 163. Plan zadaszeń na stadionie w Puławach



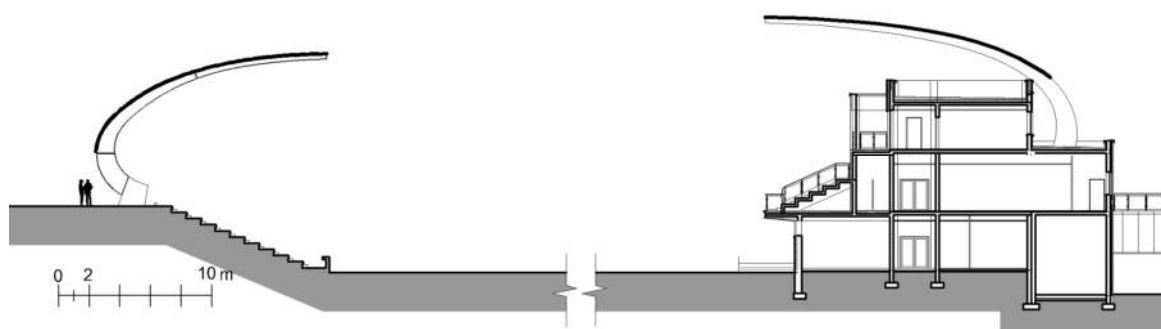
Il. 164. Widok zadaszeń na stadionie w Puławach

Koncepcję modernizacji całego obiektu wraz z budynkami towarzyszącymi przygotowała pracownia md-Polska ze Szczecina²⁶⁶. Obiekt został oddany do użytku w 2011 roku.

Modernizacja przewidywała między innymi wybudowanie dwóch nowych zadaszeń membranowych. Jednego nad trybuną południowo-

zachodnią, które znajduje się wzdłuż całego toru sprinterskiego, drugiego nad tarasem budynku klubowego i trybuną rodzinną. Zadaszenie to jest większe, ale położone wyżej i mniej korzystnie zorientowane.

Zadaszenia nie są połączone i różnią się wielkością. Mają podobną formę, jakby były lu-



Il. 165. Przekrój zadaszeń trybun na stadionie w Puławach

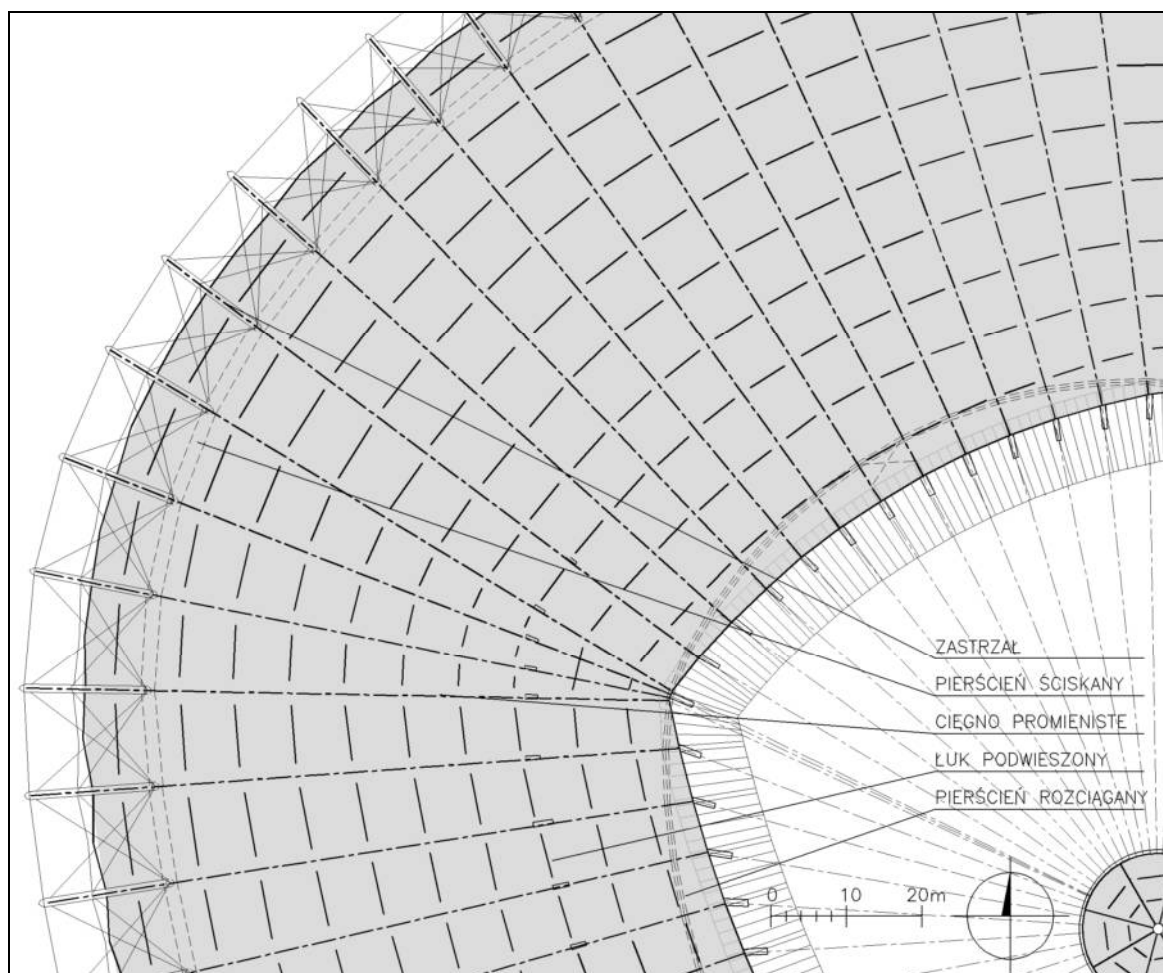
²⁶⁶ MD Polska, *Projekt wykonawczy. Przebudowa i rozbudowa Stadionu Miejskiego Ośrodka Sportu i Rekreacji w Puławach*. 2008.

strzanym odbiciem. Membrany w obu zadaniach mają kształt uzyskany przez wygięcie głównych dźwigarów. Wspornikowe stalowe dźwigary kształtem przypominają literę C. Rozstawy pomiędzy dźwigarami wynoszą

3,0 m i 9,0 m, a na budynku klubowym 4,7 m. W obu przypadkach zastosowano tkaninę z włókien szklanych pokrytych PTFE. Razem zadaszona powierzchnia wynosi 3010 m².

5.2.8. Stadion Narodowy w Warszawie

Lokalizacja:	Warszawa, al. ks. J. Poniatowskiego 1
Projektant:	JSK Architekci, gmp architekten, sbp partners,
Konstrukcja dachu:	Schlaich Bergermann und Partners
Wyk. membrany:	Hightex GmbH,
Oddanie:	2011



Il. 166. Fragment dachu stałego na Stadionie Narodowym w Warszawie

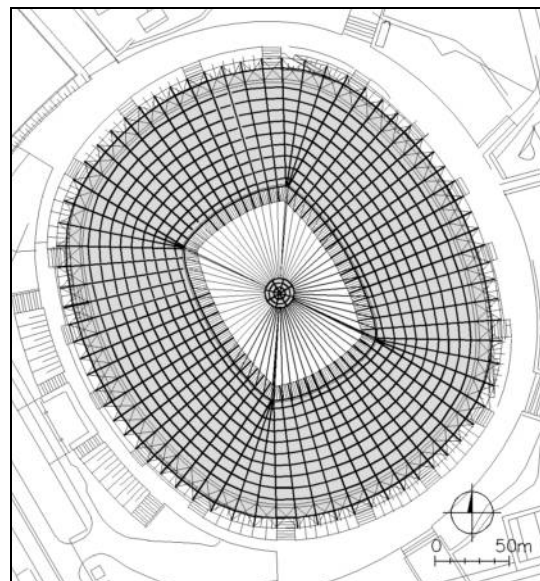
Stadion Narodowy w Warszawie powstał z okazji przyznania Polsce i Ukrainie prawa do organizacji Mistrzostw Europy w piłce

nożnej²⁶⁷. Odbył się tam między innymi mecz otwarcia Euro 2012. Położony jest w miejscu starego i nieczynnego Stadionu 10-lecia. Kon-

²⁶⁷ Falk Jaeger, *Next 3 Stadia, Warsaw Bucharest Kiev*. Jovis 2012.

cepcję architektoniczną na nowy obiekt wygrało polsko-niemieckie konsorcjum pracowni: JSK Architekci, Gerkan, Marg und Partner (gmp) i Schlaich Bergerman und Partner. Uroczyste otwarcie stadionu odbyło się w styczniu 2012 roku. Mieści największą w Polsce, w całości zadaszoną widownię na 58 500 miejsc siedzących²⁶⁸.

Ponad widownię powstał największy w Polsce dach o łącznej powierzchni prawie 6,5 ha. Ma owalną konstrukcję prętowo-ciężnową o wymiarach 301×263 m²⁶⁹. Konstrukcja ta oparta jest na zewnętrznym pierścieniu ściskającym, wewnętrznym rozciągającym i promienistych ciężkach łączących oba pierścienie. Rozwiązanie, które występuje już w wielu stadionach na świecie, w Polsce przyjęło wariant bez górnego, drugiego zewnętrznego pierścienia. Zamiast tego zastosowano zastrzały z odciągami tzw. jedyńki. Dzięki temu górna część dachu zakończona jest wysoko wystającymi elemen-



Il. 167. Plan Stadionu Narodowego w Warszawie

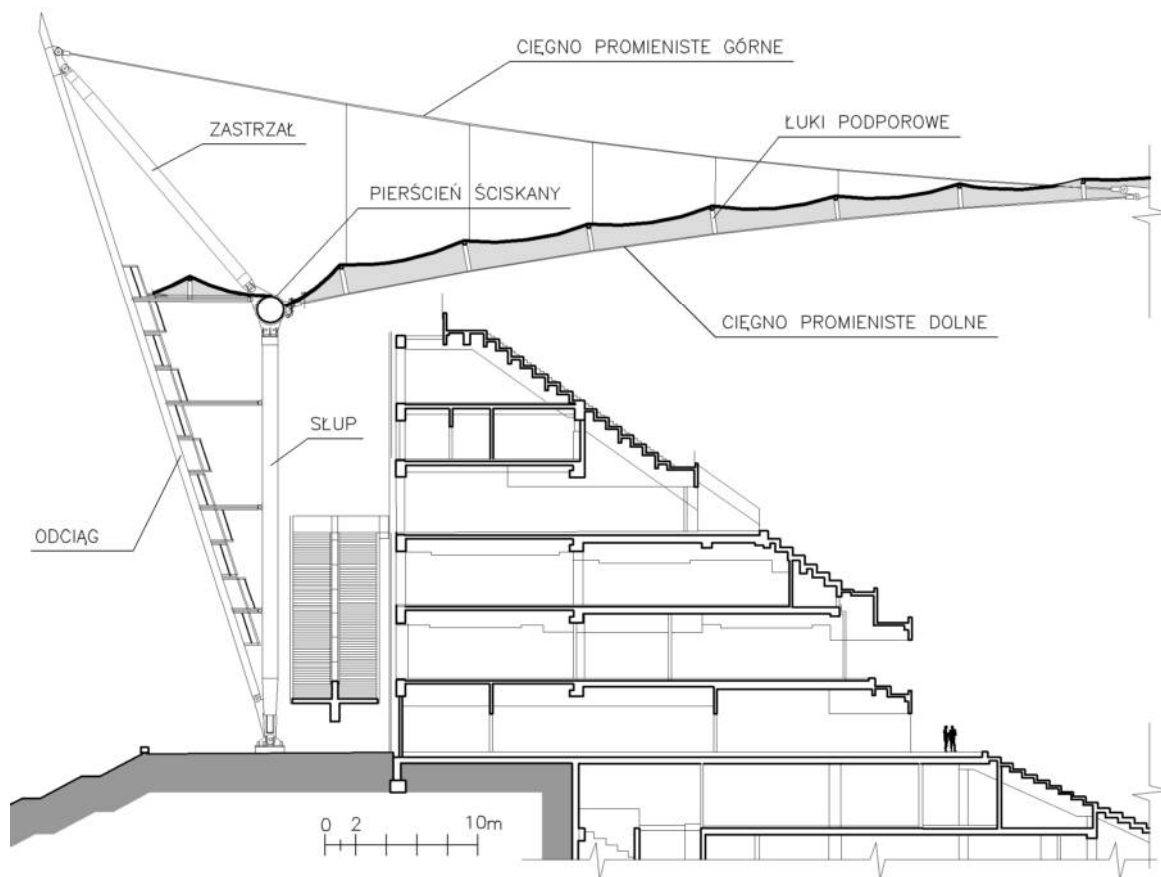
tami. Mają one przypominać elementy plecionego kosza wiklinowego. Do odciągów przymocowana jest ściana osłonowa stadionu. Wykonana jest ze stalowych siatek, które formowane są tak, jakby były przeplatane między



Il. 168. Widok Stadionu Narodowego w Warszawie

²⁶⁸ Krystyna Januszkiewicz, *UEFA Stadion Narodowy w Warszawie*. Archiwolta 2(54)/2012, s. 20-28.

²⁶⁹ Adam Mandrysz, Leszek Miara, *Konstrukcja nośna i pokrycie membranowe dachu Stadionu Narodowego w Warszawie*, Materiały Budowlane 11/2012, s. 42-44.



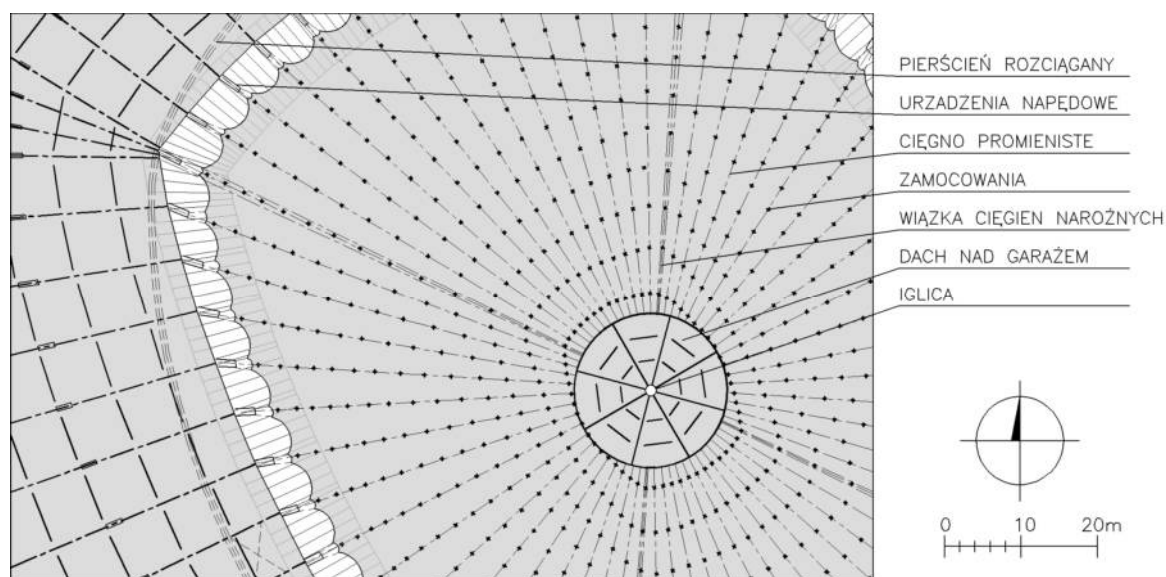
Il. 169. Przekrój przez zadaszenie stałe Stadionu Narodowego w Warszawie



Il. 170. Widok fragmentu dachu stałego na Stadionie Narodowym w Warszawie

odciągami. Ściskany pierścień dachu składa się z 72 segmentów, ukrytych za ścianą osłonową i podpartych taką samą liczbą słupów. Od pierścienia zewnętrznego do pierścienia wewnętrznego rozpięte są cięgna promieniste dolne. Ponad nimi znajdują się cięgna promieniste górne, które utrzymują wewnętrzny rozciągany pierścień na właściwej wysokości. Cięgna dolne zapewniają właściwe naprężenie układu i zabezpieczają przed podrywaniem dachu przez wiatr. Struktura nośna jest układem pracującym w całości, jako jeden, niepodzielony dylatacjami ustrój. Aby całość, mimo wszystko, mogła ulegać odkształceniom, np. wynikającym ze zmian temperatury, zamocowana jest ona na przegubach, które występują pomiędzy słupami a fundamentami. W takim ustroju obciążenie jednego elementu powoduje, że wszystkie pozostałe częściowo przenoszą to obciążenie. Aby całość nie była zbyt podatna na odkształcenia, zwłaszcza dynamiczne, wprowadzono dodatkowe elementy usztywniające. Przykładem mogą być wieszaki – pionowe cięgna, łączące promieniste cięgna

górne z dolnymi. Podobną rolę spełniają ukośnie położone stężenia, które występują w wielu miejscach pomiędzy elementami sztywnymi²⁷⁰. Dach nad stadionem składa się z dwóch głównych części. Dach stałego nad widownią i dachu ruchomego nad płytą boiska. Podstawowa część dachu stałego to zadaszenie membranowe przymocowane do dolnych cięgien promienistych. Poprzecznie do nich podwieszono są łuki, które dodatkowo podtrzymują membranę. Dzięki temu, mimo niewielkiego pochylecia cięgien promienistych dolnych, membrana ma odpowiednią krzywiznę. Odległości pomiędzy cięgnami wynoszą w narożnikach do 12 m, a odległości pomiędzy łukami około 8 m. Oznacza to, że mimo olbrzymich wymiarów całego dachu pole ograniczone elementami podporowymi wynosi w przybliżeniu 12×8 m. Membrana dachu stałego wykonana jest z włókien szklanych pokrytych PTFE. Łączna powierzchnia tego dachu wynosi 54 000 m². Cięgna dolne mają największe pochylecie przy pierścieniu zewnętrznym, wynosi ono około 12°.



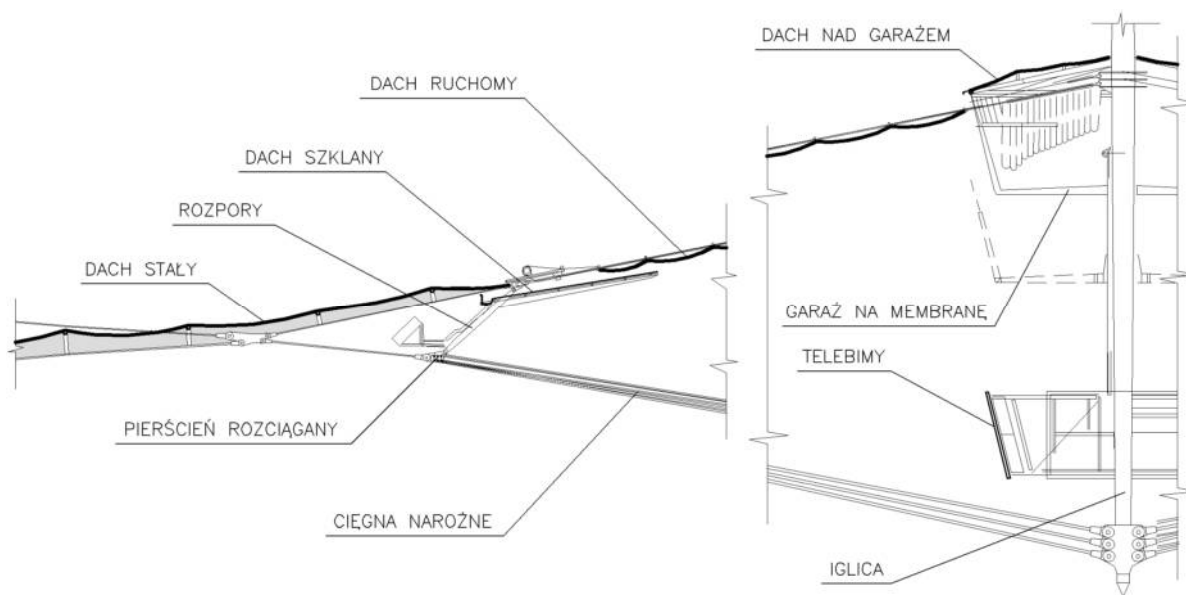
Il. 171. Fragment dachu ruchomego na Stadionie Narodowym w Warszawie

²⁷⁰ Knut Göppert, Lorenz Haspel, Andrzej Winkler, *O projekcie i realizacji Stadionu Narodowego w Warszawie*. Inżynieria i Budownictwo 7/2012, s. 347-353.

Dach stały przedłużony jest na zewnątrz, poza pierścień ściskany. Zastosowano tam układ poziomych belek przymocowanych do pierścienia i odciągów. Pomiedzy belkami wprowadzono dodatkowe łuki podporowe, podobnie jak w pozostałej części dachu. Nadają one membranie odpowiednią krzywiznę. Dach stały przedłużono też do środka, poza pierścień rozciągany za pomocą specjalnych wsporników. Podtrzymują one pokrycie wykonane ze szkła. Znajduje się tam pas dachu, który łączy dach stały z dachem ruchomym. Dach szklany położony jest poniżej obu membran²⁷¹.

Drugą co do wielkości część stanowi dach ruchomy. Znajduje się on nad płytą boiska pozwala na całkowite zamknięcie przestrzeni stadionu. Jego główna konstrukcja składa się z 60 promienistych cięgien górnych, 4 wiązek cięgien narożnych oraz centralnej iglicy²⁷². Cięgna od zewnątrz przymocowane są do rozciąganego pierścienia stadionu, a na środku – do iglicy. Cięgna górne, po których poruszają

się wózki ślizgowe dachu ruchomego zamocowane są w górnej części iglicy. Po każdym cięgnię porusza się 15 wózków nośnych i jeden wózek napędowy. Do dolnej części iglicy przymocowane są 4 wiązki cięgien po 3 cięgna wychodzące z każdego narożnika. Stabilizują one iglicę i przenoszą cały ciężar ruchomego dachu na cięgna narożne dachu stałego. Na tej samej wysokości, co górne cięgna, znajduje się garaż. Jest to miejsce, w którym mieści się membrana. Podczas procesu chowania dachu membrana jest fałdowana, dzięki czemu może być stale połączona z wózkami nośnymi. Naprzężona powłoka dachu ruchomego przyjmuje kształt zbliżony do bardzo płaskiego ostrosłupa. Mała różnica wysokości pomiędzy zamocowaniem cięgien z jednej strony do pierścienia na centralnej iglicy a z drugiej do rozciąganego pierścienia powoduje, że powłoka ma małe pochylenie. Ponieważ powłoka mocowana jest do cięgien nośnych, więc zmienia się jej pochylenie. Przy zwiniętym dachu i nieobciąż-



Il. 172. Przekrój przez zadaszenie ruchome Stadionu Narodowego w Warszawie

²⁷¹ Adam Reichhart, Knut Göppert, Lorenz Haspel, Andrzej Winkler, *Przekrycie i obudowa piłkarskiego Stadionu Narodowego w Warszawie*, *Inżynieria i budownictwo* 6/2012 s. 317-324.

²⁷² Leszek Miara, Przemysław Ziemczyk, *Stadion Narodowy w Warszawie. Konstrukcja stalowa, linowa i dach*, cz. II. *Inżynier budownictwa* 9/2012, s. 88-90.

zonych cięgnach pochylenie wynosi około 11°. Cięgna górne zamocowane są do centralnej iglicy na różnych wysokościach. Różnica wysokości pomiędzy zamocowaniami cięgien wynosi 50 cm. Powoduje to delikatne pofałdowanie powłoki w centralnej części. Jest to wynikiem sposobu zamocowania 60 cięgien do małego pierścienia, a nie konieczności pofałdowania powłoki. Fałdowanie powłoki byłoby bardziej uzasadnione przy dolnej krawędzi, w której odległości pomiędzy cięgnami są dużo większe. Widocznie naprężenie cięgien i samej membrany pozwala na uzyskanie takiej sztywności, że nie zaistniała potrzeba zamocowania na różnej wysokości. Poza tym, większym problemem są zjawiska występujące podczas procesu zwijania membrany.

Ruchomy dach jest przewidziany przede wszystkim dla ochrony przed deszczem i słońcem. Jednak ze względu na rangę niektórych imprez był zasunięty w okresie wczesnowiosennym. Opady śniegu, które się wtedy pojawiły, spowodowały dodatkowe obciążenie, a nawet konieczność ręcznego odśnieżania.

Zluzowane fragmenty membrany tworzą worki, w których mogłaby się gromadzić woda i śnieg, dlatego membrana musi być zabezpieczona przed opadami. Nad tzw. garażem znajduje się dodatkowy daszek, który chroni membranę od góry, a od dołu znajduje się ruchoma osłona. Kiedy powłoka jest zwinięta, osłona jest podniesiona i szczelnie chroni przed wiatrem. Na początku procesu rozwijania osłona jest opuszczana, aby membrana mogła się swobodnie wyprostować. W ścianach bocznych osłony wykonane są szczeliny pozwalające na przesu-

wanie osłony pomiędzy naprężonymi cięgnami nośnymi. Szczeliny te są dodatkowo zabezpieczone, aby ptaki nie wykorzystywały garażu, jako miejsca schronienia. Dach ruchomy obecnie jest największym w Europie. Jego powierzchnia wynosi 10 500 m², a wymiary liniowe to 130×95 m.



Il. 173. Różnica przepuszczalności światła

Na Stadionie Narodowym można wizualnie porównać właściwości stosowanych materiałów. Zadaszenie stałe wykonane jest z tkaniny na bazie włókien szklanych pokrytych PTFE, natomiast membrana dachu ruchomego z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Przepuszczalność światła dla dachu stałego wynosi ~12%, a dla dachu ruchomego 8-6%, co powoduje, że dach wewnętrzny jest nieco ciemniejszy²⁷³. W uproszczeniu można przyjąć, że przez membranę dachu ruchomego przedostaje się o 1/3 mniej światła. Poza tym, pokrycie włókien szklanych przez PTFE powoduje, że do materiału mniej przywiera brud i lepiej odbija światło zewnętrzne. W efekcie dach stały nawet od zewnątrz jest jaśniejszy^{274, 275, 276}.

²⁷³ Leszek Miara, Przemysław Ziemczyk, *Nadzór nad przygotowaniem i realizacją konstrukcji stalowej Stadionu Narodowego w Warszawie*. Inżynieria i budownictwo 7/2012, s. 353-357.

²⁷⁴ Knut Göppert, Lorenz Haspel, Andrzej Winkler, *National stadium in Warsaw – general description of the structure*, Budownictwo i inżynieria środowiska, z. 58 (1/11), 2011, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, s. 123-128.

²⁷⁵ Leszek Miara, Przemysław Ziemczyk, *Supporting structure and roof diaphragm of the Warsaw National Stadium*, Збірник Наукових Праць, Видавництво Сталь, Київ 2012, s. 157-176.

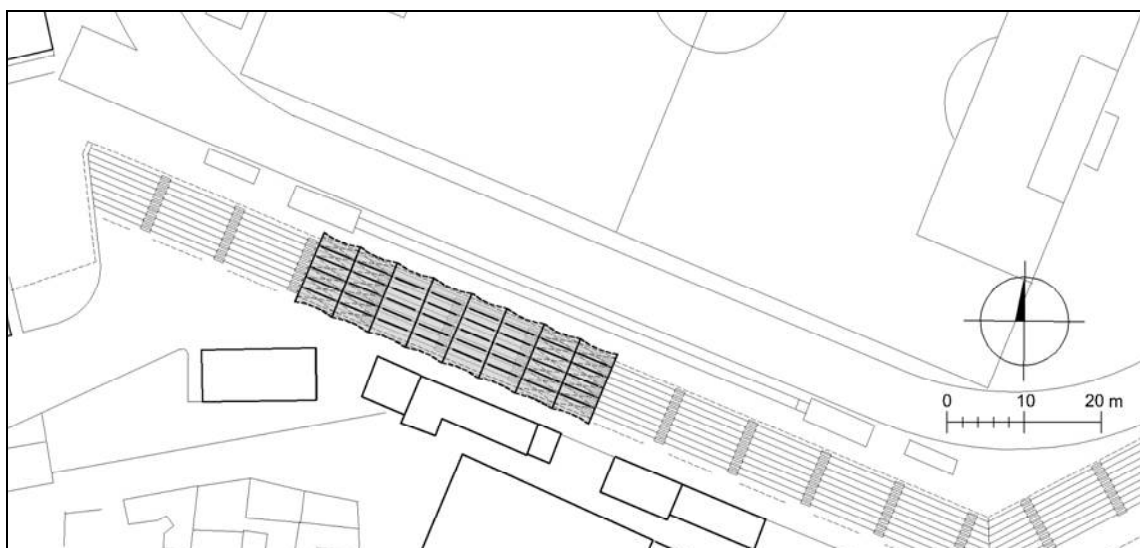
²⁷⁶ Adam Reichhart, *The National football stadium in Warsaw*, Збірник Наукових Праць, Видавництво Сталь, Київ 2012, s. 177-189.

Wydaje się, że ilość światła, która przedostaje się przez membranę jest wyraźnie mniejsza niż przepuszczalność szkła lub folii. Jeśli natomiast cała powierzchnia jest zadaszona, to oko ludzkie przyzwyczaja się do takiego natężenia światła i nie odczuwa ciemności. Na il. 173 można porównać pas dachu szklanego z dachem stałym. Liczba elementów koniecznych do podtrzymywania tafli szklanych jest tak

duża, że wcale nie wydaje się jaśniejszy. Częściowo wynika to z tego, że po drugiej stronie szkła widoczne jest błękitne niebo, a membrana powoduje rozpraszanie światła, co daje równomierne oświetlenie. Na wąskim oświetlonym pasie na trybunach widać wpadające ostre światło słoneczne. Może to powodować olśnienie przebywających tam widzów.

5.2.9. Zadaszenie trybuny stadionu w Chojnicach

Lokalizacja:	ul. Mickiewicza 12
Projektant:	Alu-Tent, Ryszard Zieliński,
Konstrukcja:	k2 engineering, Andrzej Kowal,
Wyk. membrany:	Alu-Tent,
Oddanie:	2012



Il. 174. Plan zadaszenia trybuny na stadionie w Chojnicach

Na południu województwa pomorskiego znajdują się Chojnice. Działające tam kluby sportowe: piłkarski i lekkoatletyczny. Mają wielofunkcyjny stadion. Dla poprawienia parametrów tego stadionu, postanowiono zmodernizować go i wprowadzić zadaszenie. Zdecydowano się na zadaszenie membranowe, zaproponowane przez firmę Alu-Tent ze Słeszewa.

Ponieważ kryterium decydującym o wyborze rozwiązania była cena, więc wybrano najprostszą z możliwych formę zadaszenia. Prostokątne pola nad trybunami zadaszone są pochyłą, stalową konstrukcją opartą na 10 słupach²⁷⁷. Podobne zadaszenie było wcześniej wykonane na stadionie w Gliwicach.

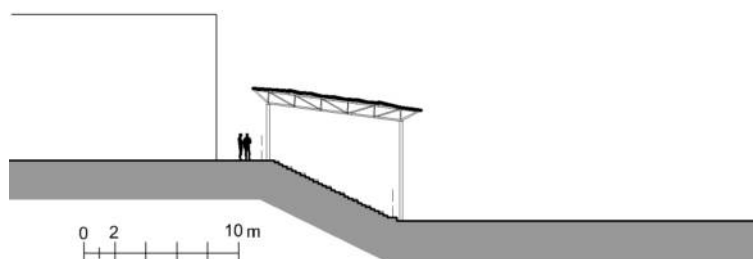
²⁷⁷ Alu-Tent, *Projekt zadaszenia membranowego dla krytej trybuny na stadionie przy ul. Mickiewicza w Chojnicach*, 2011.



Il. 175. Widok zadaszenia trybuny na stadionie w Chojnicach

Wypełnienie przestrzeni pomiędzy kratownicami wykonane jest z membrany. Pięć kratownic poprzecznych opiera się bezpośrednio na słupach, a cztery dodatkowe (pośrednie) – na kratownicach podłużnych, które jednocześnie spełniają funkcję rozpór równoważących naciąg membrany. Dzięki temu nie trzeba stosować zewnętrznych odciągów. Na kratownicach poprzecznych oparte są płatwie z dodatkowymi łukami, wypychającymi membranę w górę i nadającymi powierzchni membrany niewielką krzywiznę. Wzdłuż krawędzi przedniej i tylnej zastosowano ciągną brzegowe, powodujące

charakterystyczne wygięcie krawędzi membrany. Jak twierdzi producent, tak ukształtowana membrana jest najtańsza. Minimalna krzywizna pozwala na rezygnację z krzywoliniowych brytów. W tym przypadku zastosowane są prostokątne bryty, a wygięcie powierzchni uzyskane jest elastycznością materiału powłoki. Membrana jest gęsto podpierana, ponieważ odległości pomiędzy kratownicami poprzecznymi wynoszą 5,15 m, a odległości pomiędzy płatwiami z łukami wynoszą 1,5 m. Sztywności całemu zadaszeniu nadają stężenia skrajnych pól.



Il. 176. Przekrój przez zadaszenie trybuny na stadionie w Chojnicach

Membrana wykonana jest z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Powierzchnia zadaszona wynosi 383 m². Dzięki temu uzyskano zadaszanie nad 500 miejscami siedzącymi, zgodnie z wymaganiami dla tego typu obiektu.

Ze względu na minimalne krzywizny i proste elementy podtrzymujące zadaszanie nie ma typowych cech membranowych. W tym przypadku zastosowana tkanina techniczna spełnia bardziej funkcję półprzezroczystego materiału pokryciowego. Duże doświadczenie wykonawcy zauważalne jest w detalach zadaszania. Nietypowe pochylenie w kierunku płyty boiska bardziej chroni widzów. Co prawda przed wi-

downią znajdują się słupy konstrukcyjne przesłaniające widoczność, ale dzięki temu można było wykorzystać do umieszczenia przy nich rur spustowych, odprowadzających wodę spływającą w kierunku boiska.

Realizacja tego prostego zadaszania napotkała na problemy gruntowe, które wyraźnie spowodowały prace budowlane. Ważne jest podkreślenie tego zagadnienia ze względu na to, że czasami zadaszanie membranowe traktowane są jako lekkie i niewymagające solidnej konstrukcji. Niestety brak właściwego zamocowania może powodować późniejsze problemy.

Tabela 8

Porównanie zadaszzeń zrealizowanych na stadionach

Nr	Obiekt	Rok realizacji zadaszania	Wielkość widowni	Powierzchnia zadaszona [m ²]
1.	Poznań – stadion piłkarski	2006 + 09.2010	45 500	30 000
2.	Częstochowa – stadion żużlowy	03.2007	16 850	795
3.	Bytom – stadion piłkarski	02.2008	5 500	2 000
4.	Sulejówek – stadion piłkarski	09.2010	1 240	450
5.	Gdynia – stadion piłkarski	02.2011	15 100	10 040
6.	Warszawa – stadion piłkarski	03.2011	31 100	18 400
7.	Puławy – stadion piłkarsko-lekkoatletyczny	10.2011	4 400	3 010
8.	Warszawa – Stadion Narodowy	01.2012	58 100	54 000+10 000*
9.	Chojnice – stadion piłkarsko-lekkoatletyczny	03.2012	3 500	383

* Zadaszenie ruchome zwijane na zimę i zadaszanie stałe nad płytą boiska.

Źródło: opracowanie własne

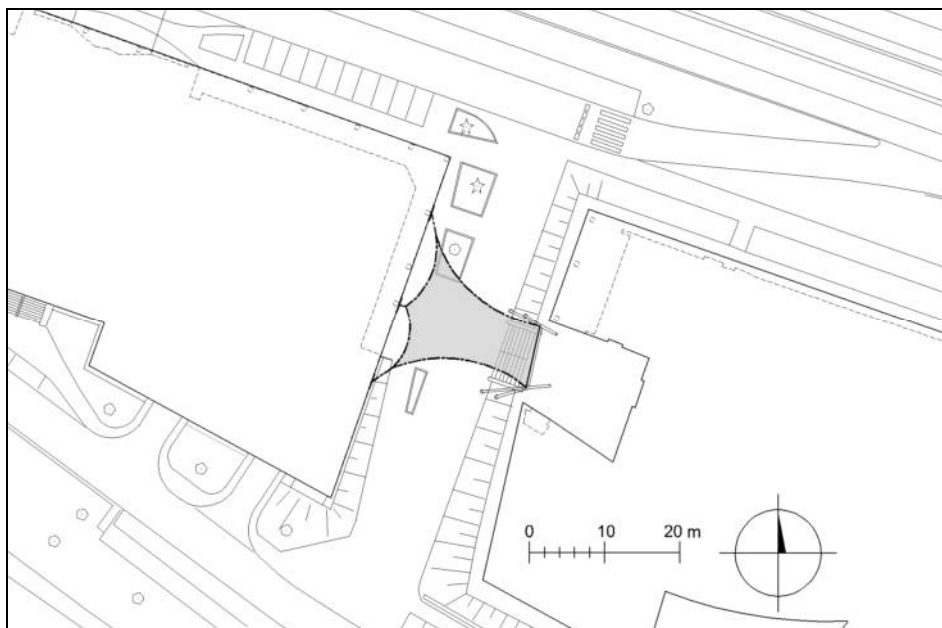
5.3. Pozostałe typy

W Polsce zostało zrealizowanych kilka zadaszeń membranowych na obiektach związanych z transportem lub gastronomią. Miejsce oczekiwania na pociąg lub autobus wymaga ochrony pasażerów przed czynnikami atmosferycznymi. A jeśli do tego obiekt ma ciekawą formę

architektoniczną, to staje się wizualnym elementem ułatwiającym orientację w przestrzeni. Podobnie jest z wyróżnieniem miejsca spożywania posiłków. Forma interesującego zadaszenia wykorzystywana jest jako ikona danego miejsca lub firmy.

5.3.1. Zadaszenie pomiędzy budynkami Banku Śląskiego w Katowicach

Lokalizacja:	Katowice, Chorzowska 50,
Projektant:	Biuro Architektoniczne MAT, Zbigniew Pomaz, Marek Jancelewicz
Konstrukcja:	Besig MDI,
Wyk. membrany:	Sky Span,
Oddanie:	2001



Il. 177. Plan zadaszenia pomiędzy budynkami Banku Śląskiego w Katowicach

Pierwszym w Polsce zadaszeniem membranowym wykonanym z włókien szklanych pokrytych PTFE jest niewielkie zadaszenie pomiędzy budynkami biurowymi w Katowicach. Powstało wiosną 2001 roku. Układ składa się z dwóch części: budynek wschodni spełnia

funkcję banku, natomiast budynek zachodni jest typowym biurowcem, z pomieszczeniami do wynajęcia. Projekt całości wykonała pracownia MAT z Gdańska²⁷⁸. W rozmowie architekt wyjaśnił, że poszukiwano wtedy czegoś nowoczesnego, co mogłoby wyróżnić przejście

²⁷⁸ <http://mat.2pigroup.pl/?q=node/22> (12-09-2014).



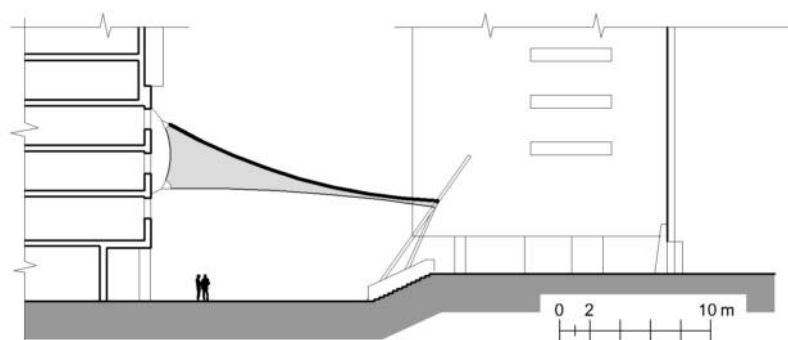
Il. 178. Widok zadaszenia pomiędzy budynkami Banku Śląskiego w Katowicach

pomiędzy budynkami. Dzięki zastosowaniu nietypowego materiału i technologii, uzyskano wyraźny kontrast z pozostałą częścią budynku. Zastosowanie białego, czystego koloru kontrastuje z resztą budynku, ale zarazem pasuje do tonacji całości wykonanej w srebrnych kolorach.

Chociaż powłoka rozpięta jest pomiędzy budynkami, to konstrukcyjnie związana jest tylko z jednym. W budynku zachodnim umieszczono 3 kotwy na różnych wysokościach. Do nich przymocowano ciężkie brzegowe, które utrzymują napiętą membranę. Z drugiej strony

ustawiono niezależną stalową konstrukcję, która składa się z ramy z łukowym rygłem i dodatkowych zastrzałów. Dzięki takiemu zamocowaniu pięcioboczna membrana przyjmuje formę pojedynczej powierzchni siodłowej. Powierzchnia zadaszona wynosi 162 m^2 , a odległość ramy od budynku, czyli rozpiętość membrany, wynosi około 18 m.

Interesująca, nieregularna forma bardzo dobrze wpisuje się pomiędzy geometryczne bryły budynków. Mimo czasu, który upłynął już od powstania, membrana nie wykazuje śladów ani starzenia, ani uszkodzeń. W słoneczny dzień



Il. 179. Przekrój przez zadaszenie między budynkami Banku Śląskiego w Katowicach

zachwyca nieskazitelną bielą. Oba budynki są wieczorem podświetlone, a światło odbite od zadaszenia czyni to miejsce jeszcze bardziej atrakcyjnym.

Jedynie zastanawiające jest, dlaczego zadaszenie, które miało łączyć budynki, nie przylega do ściany budynku wschodniego. Jest to przedstawione na planie zadaszenia.

5.3.2. Zadaszenia stacji paliwowych „Pod żaglami” w Gdyni

Lokalizacja:	Gdynia, ul. Sportowa 8, ul. Nowowiczińska 31, ul. Małokocka 13,
Projektant:	Marek Kleczkowski, Ewa Brach, Rafał Kolka, Adam Grzeszczak,
Konstrukcja:	PP Arkon, Jerzy Siemiński,
Wyk. membrany:	Kontent, Ryszard Koniewicz, TAS
Oddanie:	2003, 2005, 2011



Il. 180. Plan zadaszenia na stacji paliw przy ulicy Sportowej w Gdyni

Ciekawym przykładem zadaszeń membranowych są stacje paliwowe „Pod żaglami” w Gdyni. Pierwsza stacja powstała w 2003 roku na podstawie projektu Marka Kleczkowskiego. Nagroda „Czas Gdyni” dla inwestycji roku, która została przyznana za nietypową i ciekawą formę architektoniczną, świadczy o wysokiej ocenie wśród mieszkańców²⁷⁹. Inwestor wykorzystując sprawdzony projekt, powtórzył go w innych miejscach i utworzył sieć wyróżniających się stacji paliwowych. Stacja, która powstała jako pierwsza, zlokalizowana jest na terenie zespołu usługowego w trójkącie pomiędzy torami kolejowymi

trasy Gdynia – Kościerzyna, torami dalekobieżnymi i SKM a ul. Sportową. Warunki określone przez inwestora mówiły, że stacja paliwowa powinna wyróżniać się spośród innych przez charakterystyczną i oryginalną sylwetkę. Poza tym powinna pełnić funkcję reklamową i zarazem stanowić znak orientacyjny w przestrzeni miasta. Projektant starał się nadać jej cechy kojarzące z miejscem zlokalizowania, czyli z miastem Gdynia. W tym celu do budowy formy architektonicznej użyte zostały elementy i materiały kojarzące się z portem, stoczną i żaglowcem²⁸⁰.

²⁷⁹ http://www.gdynia.pl/wladze/rada/4220_44339.html (31-08-2014).

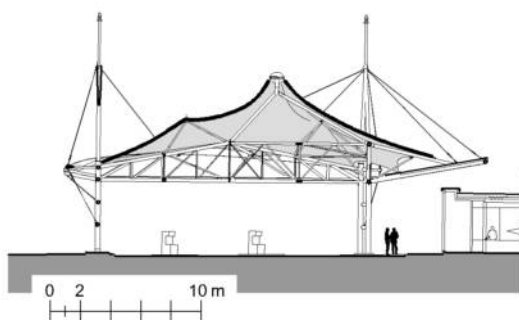
²⁸⁰ http://www.kleczkowski-architekt.pl/p_przemysl.html (3-04-2015).



Il. 181. Widok zadaszenia na stacji paliw przy ulicy Sportowej w Gdyni

Zadaszenie od początku przewidywane było jako całoroczne, dlatego szczególną uwagę zwrócono na przygotowanie układu do obciążenia śniegiem. Rzut zadaszenia oparty jest na okręgu z wpisanym trójkątem równobocznym. W narożnikach trójkąta znajdują się wystające ponad zadaszenie stalowe słupy. Środkowa część przekryta jest membraną o formie zbliżonej do niskiego stożka. Z trzech stron zadaszenie uzupełniają stalowe, płaskie połacie dachowe. Spełniają one funkcję ochronną, zatrzymując zsuwający się śnieg tak, aby nie spadał z zadaszenia. Membrana zamocowana jest do centralnego pierścienia w górnej części oraz podparta trzema pośrednimi wystającymi

elementami konstrukcji. W dolnej części, wzdłuż krawędzi zewnętrznej napięta jest w 9 punktach: w trzech narożach oraz dodatkowych dwóch punktach wzdłuż każdego boku trójkąta. Kształt napiętej membrany nie jest typową formą stożkową, dlatego wszystko było określane wspólnie z wykonawcą membrany. Przy projektach konstrukcji membranowych, jak powiedział architekt: „Niezbędna jest stała współpraca projektanta, konstruktora i wykonawcy. Dzięki specjalistycznemu oprogramowaniu prowadzony był proces poszukiwania kształtu napiętej tkaniny, proces, który zwykle nie występuje w innych typach konstrukcji”²⁸¹.



Il. 182. Przekrój zadaszenia na stacji paliw przy ulicy Sportowej w Gdyni

²⁸¹ Rozmowa z projektantem Markiem Kleczkowskim.

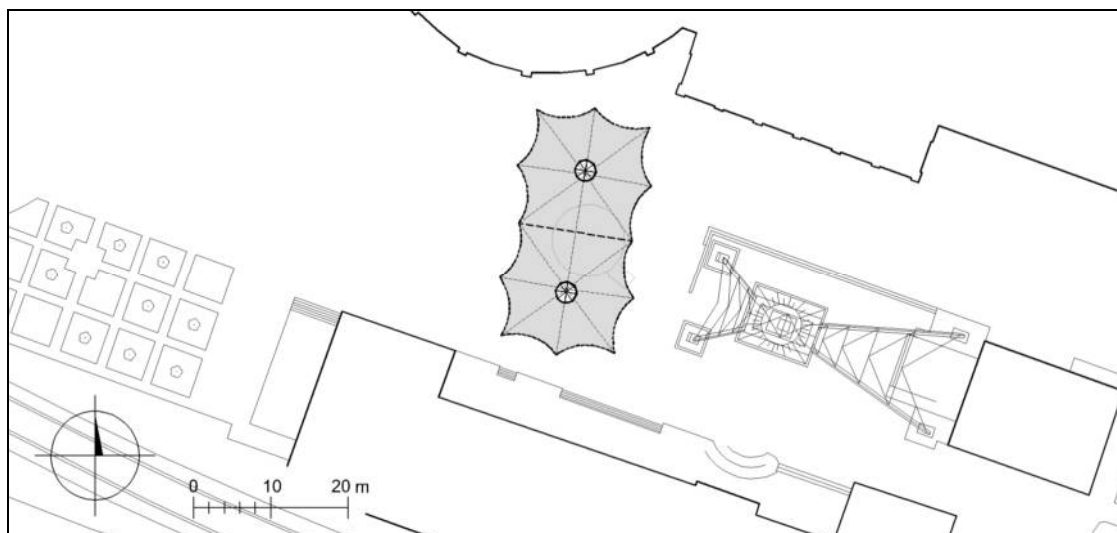
Membrana wykonana jest z włókien poliestrowych pokrytych PCW i zamocowana jest do stalowej przestrzennej kratownicy.

Po kilku latach od zrealizowania pierwszej stacji, inwestor postawił dwie kolejne, według podobnego projektu. Stacje te stanęły przy ulicach Nowowiczlińskiej i Małokockiej.

Wprowadzono nowsze rozwiązania techniczne elementów łączących, co nadało obiektowi bardziej wyrafinowany wygląd. Z biegiem lat okazało się, że większym problemem dla membrany jest obciążenie wiatrem, a nie śniegiem. Zwłaszcza, że ukształtowanie terenu może wzmacniać siłę wiatru.

5.3.3. Zadaszenie przed centrum handlowym w Katowicach

Lokalizacja:	Katowice, ul. Chorzowska 109a,
Projektant:	BOSE International Planing& Architecture, Marek Tryzybowicz,
Konstrukcja:	Ove ARUP & Partners International
Wyk. membrany:	Ceno-Tec
Oddanie:	2005



Il. 183. Plan zadaszenia przed centrum handlowym w Katowicach

Przy drogowej trasie średnicowej prowadzącej przez centra kilku miast aglomeracji górnośląskiej powstało centrum handlowo-rozrywkowe. Silesia City Center to jedno z największych centrów tego typu na Śląsku. Powstało na terenie byłej kopalni Gottwald w Katowicach. Podkreśla historię miejsca i wyróżnia się nietypowymi rozwiązaniami. Typowy dla centrów handlowych, pionowy pylon reklamowy jest w tym przypadku oryginalną wieżą szybu

kopalnianego. Wokół znajdują się eksponaty związane z górnictwem. Części maszyn po byłej kopalni stały się elementami małej architektury. Centrum zostało otwarte w listopadzie 2005 roku. Jego koncepcję architektoniczną wykonała pracownia BOSE International z Gdańska²⁸².

Przed głównym wejściem, od strony południowo-zachodniej, zaprojektowany został otwarty plac, częściowo przysłonięty histo-

²⁸² Na podstawie materiałów udostępnionych przez Silesia City Center.

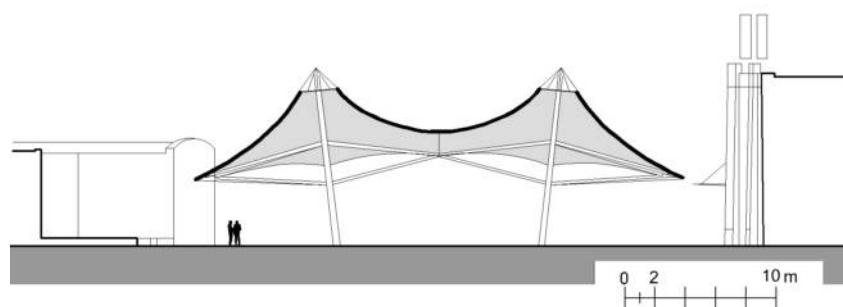


Il. 184. Widok zadaszenia przed centrum handlowym w Katowicach

rycznymi budynkami kopalni. Większość parkingów znajduje się po stronie północno-wschodniej i od tamtej strony znajduje się kilka dodatkowych wejść. Aby zwiększyć walory placu, w pobliżu wejścia zaprojektowane zostało otwarte zadaszenie. Miało spełniać rolę elementu łączącego część nową z historycznymi budynkami, a także dawać możliwość organizowania różnego rodzaju wydarzeń na świeżym powietrzu, bez konieczności stawiania tymczasowych zadaszeń

podczas przygotowywania prezentacji, pokażu lub koncertu. Podobne, mniejsze zadaszenia membranowe miały powstać na przystanku tramwajowym i postoju taksówek, ale nie zostały zrealizowane.

Forma zadaszenia przypomina dwa połączone parasole. Pochyłe słupy podtrzymują pierścienie, do których przymocowana jest membrana. Od dołu naroża membrany przymocowane są do 8 ukośnych rozpór z zastrzałami. Pomiędzy miejscami zamocowania membrany zastoso-



Il. 185. Przekrój przez zadaszenie przed centrum handlowym w Katowicach

wano ciągła brzegowe. Membrana napięta do takiego układu elementów podporowych przyjęła formę stożkową. Ponad górnymi pierścieniami znajdują się ostrosłupowe osłony pozwalające na niewielką wymianę powietrza pod zadaszeniem. Powierzchnia zadaszenia wynosi 430 m². Membrana wykonana jest z włókien poliestrowych pokrytych PCW.

Ponieważ miejsce to nie było aż tak intensywnie eksploatowane, a pojawiła się potrzeba zorganizowania punktu gastronomicznego,

więc powstał w tym miejscu tymczasowy pawilon. Zamknięty obiekt spełniał funkcję zaplecza dla ogródka na świeżym powietrzu. W okresie letnim stawiane tam były parasole, które pełniły funkcję dodatkowej ochrony dla konsumentów. Umieszczone były na niższej wysokości, co zwiększało ich skuteczność. Ostatnio pawilon został rozebrany i zadaszenie wróciło do swojej pierwotnej funkcji, osłaniając otwartą przestrzeń oraz spełniając funkcję akcentu architektonicznego.

5.3.4. Zadaszenie klubu w Sopocie

Lokalizacja:	Sopot, ul. Zamkowa Góra 3-5,
Projektant:	Studio Wnętrz FORMA,
Konstrukcja:	Form TL,
Wyk. membrany:	Hightex,
Oddanie:	2007



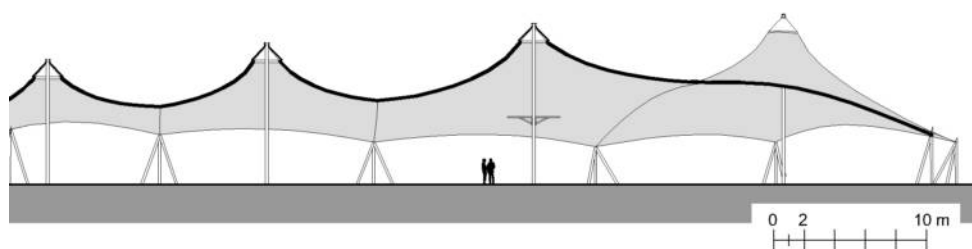
Il. 186. Plan zadaszenia klubu w Sopocie



Il. 187. Widok zadaszenia tarasu klubu w Sopocie

W północnej części miasta Sopot znajduje się Park Wodny. W skład kompleksu sportowo-rekreacyjnego, poza częścią wodną, wchodzi klub muzyczny Pick&Roll. Od strony południowej ma zadaszone tarasy, dające przyjemne miejsce na konsumpcję posiłków i organizację imprez kulturalnych. Atrakcyjna lokalizacja tarasów, na wysokiej nadmorskiej skarpie, pozwala na przebywanie na świeżym powietrzu i jednoczesną obserwację Zatoki Gdańskiej. Ze względu na duże wymiary, pod zadaszeniem można organizować koncerty muzyczne. Drewniane tarasy i ponad nimi półprzezroczyste membrany bardzo miękko wypełniają ogród, wpasowując się między istniejące wysokie drzewa.

Koncepcję architektoniczną przebudowy klubu wraz z zagospodarowaniem ogrodu i zadaszeniem wykonała pracownia Studio Wnętrz Forma z Gdyni w 2006 roku²⁸³. Zadaszenie niejako zaprasza na teren klubu, ponieważ pierwsze panele membrany znajdują się już przy wejściu. Całość utworzona została z kilkunastu powtarzalnych i kilku odmiennych form. Można wyróżnić zastosowane trzy typy membran: stożkową, siodłową i podpartą łukami. Główne zadaszenie, o największych wymiarach, to 5 połączonych stożkowych membran. Poszczególne moduły połączone wzdłuż krawędzi koszowych. Na ich końcach znajdują się pionowe słupy z zastrzałami. Krawędzie brzegowe napięto przy użyciu cięż-



Il. 188. Przekrój przez zadaszenie klubu w Sopocie

²⁸³ Studio Wnętrz Forma, *Projekt budowlany. Zagospodarowanie terenu Park Wodny Sopot*. 2006.



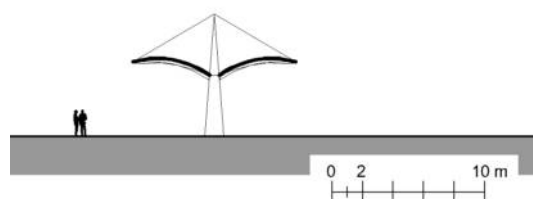
Il. 189. Widok zadaszenia przy wejściu klubu w Sopocie

gien. Membranę zamocowano od góry za pomocą niewielkiego pierścienia, podpartego słupem. Dla wzmocnienia membrany w górnej części wprowadzono podwójną grubość materiału. Zmniejszyła to przepuszczanie światła, ale w tym przypadku zostało to wykorzystane, jako dekoracja membrany. Utworzony został geometryczny wzór współgrający z promienistymi szwami, przypominający wieloramienną gwiazdę. Każdy z modułów zadaszenia ma nieco inny zarys ze względu na dopasowanie do układu sąsiadujących budynków i dużej ilości wysokich drzew. Szerokość największego modułu stożkowego przekracza 23 m,

a odległość od słupa do dolnych wierzchołków to prawie 13 m.

Wzdłuż przejścia do centralnej części tarasów znajduje się 6 pojedynczych i 6 podwójnych, powtarzalnych modułów. Wymiary pojedynczego modułu wynoszą 4,8×5 m. Membrany zamocowane są na stalowych słupach do podwieszonych łuków z drewna klejonego. Od czoła membrana zamocowana jest do ciągnika brzegowego.

Pomiędzy przejściem a wejściem do zamkniętej części klubu znajduje się dodatkowa membrana na planie sześciobocznym. Jej kształt wynika z elementów, do których jest przymo-



Il. 190. Przekrój przez zadaszenie wejściowe klubu w Sopocie

cowana. Z jednej strony jest to okrągły budynek Aquaparku, a z drugiej zamocowana jest do stalowej ramy z zastrzałami. Pomiędzy podporami, z boków, znajdują się ciężna napiające membranę i nadające jej odpowiednią krzywiznę.

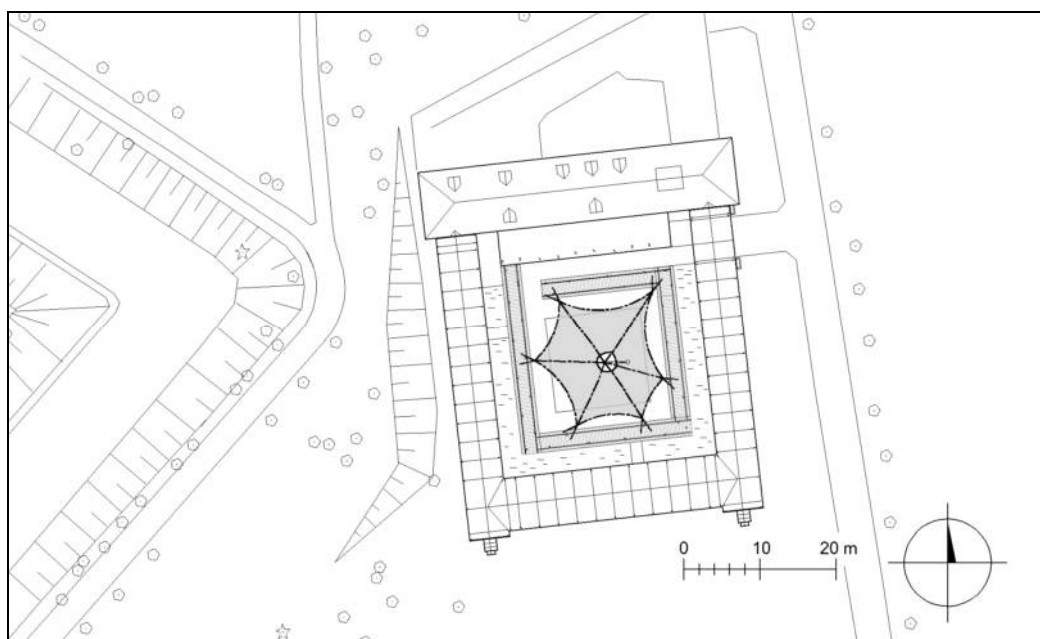
Zastosowana membrana wykonana jest z włókien szklanych pokrytych PTFE. To jest jeden z dwóch przypadków w Polsce, poza stadio-

nami, w których został zastosowany ten materiał. Całkowita powierzchnia zadaszeń wynosi 2300 m².

W końcowym efekcie uzyskano bardzo atrakcyjne wnętrze, zapewniające komfort użytkownikom podczas przebywania na dworze. Zastosowane najnowsze materiały bardzo dobrze współgrają z otaczającą zielenią.

5.3.5. Zadaszenie w storczykarni przy zamku w Łańcucie

Lokalizacja:	Łańcut, ul. Zamkowa,
Projektant:	Archistudio s.c. Tomasz Studniarek, Małgorzata Pilinkiewicz,
Konstrukcja:	Firma Inżynierska Statyk,
Wyk. membrany:	Pfeifer,
Oddanie:	2008



Il. 191. Plan zadaszenia w storczykarni przy zamku w Łańcucie

W Łańcucie, w województwie podkarpackim znajduje się słynny, zabytkowy zamek, obecnie pełniący funkcję muzeum. Otoczony jest fortyfikacjami, fosą i atrakcyjnym parkiem. Kiedyś istniały tam palmiarnia oraz pomocnicze szklarnie, w których podziwiano hodowlę storczyków. W latach 90. muzeum przystąpiło do procesu przywracania dawnej świetności zdewastowanej storczykarni i innych zabytko-

wych budynków. Ponieważ w pałacu lub na terenie parku organizowane są różnego rodzaju imprezy kulturalne, więc zaistniała potrzeba stworzenia stałego obiektu gastronomicznego, takiego, aby służył jako zaplecze dla większych imprez lub jako samodzielny punkt. Aby nie tworzyć nowych obiektów na terenie zabytkowego parku, postanowiono wykorzystać układ istniejących szklarni.

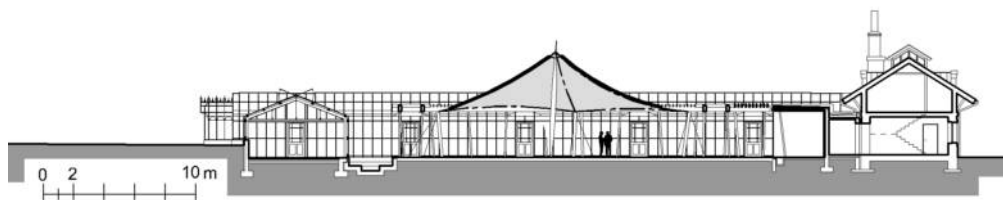


Il. 192. Widok zadaszenia w storczykarni przy zamku w Łańcucie

Nowy budynek domknął układ od północy, a na środku powstał dziedziniec z letnią kawiarnią. Koncepcję rewitalizacji obiektów przygotowała pracownia Archistudio Studniarek+Pilinkiewicz z Katowic²⁸⁴. Całość została oddana w 2008 roku.

Na dziedzińcu, pomiędzy szklarniami powstał drewniany taras, otoczony wodą i pergolami, a na środku umieszczone zostało zadaszenie membranowe. Centralny stalowy słup podtrzymuje 6 promienistych cięgien. Pochylony słup i cięgna tworzą nieregularny układ podtrzymujący membranę. Dzięki temu powstała

forma przypominająca rodzaj szerokiego parasola o ostrosłupowej formie. Zamocowanie membrany do centralnego słupa nie jest od góry zasłonięte, co powoduje, że na środku znajduje się stosunkowo duży otwór, ułatwiający wentylację powietrza. Częściowo przepuszczająca światło membrana wraz z otworem i wycięciami stanowią ciekawe, nowoczesne przymknięcie wnętrza. Zadaszenie o powierzchni 183 m² wykonane jest z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Realizacja została wyróżniona w konkursie SARP „za wysoce udaną rewitalizację unikalnej szklarni,



Il. 193. Przekrój przez zadaszenie w storczykarni przy zamku w Łańcucie

²⁸⁴Krzysztof Mycielski, *Modernizacja storczykarni przy zamku w Łańcucie*. Architektura-Murator 9/2011, s. 78-84.

storczykarni i za wprowadzenie uatrakcyjniającego programu użytkowego, jaki tworzy interesująco zaprojektowany, przeszklony pa-

wilon wraz z nastrojowym, wieloużytkowym dziedzińcem”²⁸⁵.

4.3.6. Zadaszenia przy bulwarze w Gdyni

Lokalizacja:	Gdynia, Bulwar Nadmorski im. Feliksa Nowowiejskiego,
Projektant:	Studio Architektoniczne Kwadrat,
Konstrukcja:	Studio Architektoniczne Kwadrat,
Wyk. membrany:	Kontent, Ryszard Koniewicz,
Oddanie:	2007



Il. 194. Plan części bulwaru w Gdyni z zadaszeniami membranowymi

W centralnej części Gdyni, na południe od portu, znajduje się plaża. Tereny te są głównym miejscem rekreacyjnym w mieście. W 2009 roku bulwar nadmorski został unowocześniony przez wprowadzenie nowych elementów małej architektury. Został zaprojektowany z wyjątkową dbałością o detale nawiązujące do morskiego charakteru miasta i jego położenia. Koncepcję pod tytułem „Parasole z oświetleniem na Bulwarze Nadmorskim

im. Feliksa Nowowiejskiego oraz plac zabaw i baza ratowników z zapleczem sanitarnym na Plaży Miejskiej” wykonała pracownia Kwadrat z Gdyni²⁸⁶.

Wprowadzono nowoczesne, stałe zadaszenia membranowe w formie modułowych elementów przypominających parasole. Moduły mają wymiary 4×4 m, co nie jest może imponujące w porównaniu z chociażby sąsiadującymi składanymi parasolami. Wykonano 34 moduły.

²⁸⁵ SARP Komunikat styczeń/luty 2010, s. 16, 22-23.

²⁸⁶ *Przestrzeń przy Bulwarze Nadmorskim wyróżniona*, http://www.gdynia.pl/wydarzenia/70_61282.html (29-09-2010).



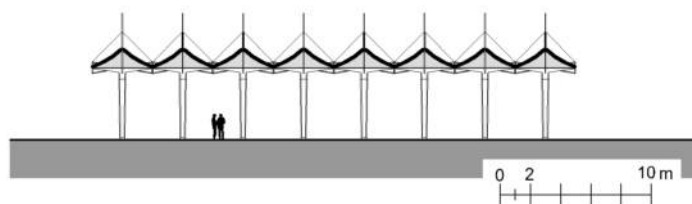
Il. 195. Widok parasoli na bulwarze w Gdyni

Połączono je w 3 układy liniowe wzdłuż bulwaru i jeden układ kwadratowy na placu zabaw. Główną rolę, jaką pełnią nie jest jednak ochrona przed słońcem lub deszczem, ale rola elementów oświetlających nadmorski deptak. Membrana w tym przypadku została potrakt-

wana, jako odbłyśnik. Bezpośrednio pod zadaszeniem znajdują się lampy, które ukryte są w konstrukcji zadaszenia i skierowane bezpośrednio na membranę. Dzięki temu duża powierzchnia świeci odbitym światłem. Brak jest przy tym mocnych cieni i nie ma efektu olśnie-



Il. 196. Świejące parasole na bulwarze w Gdyni



Il. 197. Przekrój przez zadaszenia na bulwarze w Gdyni

nia. Dobrze oświetlony deptak wzdłuż plaży robi niesamowite wrażenie. Rozwiązanie to zdobyło Nagrodę Marszałka Województwa Pomorskiego za Najlepszą Przestrzeń Publiczną Województwa Pomorskiego 2009 roku.

Zadaszenia mają konstrukcję stalowo-aluminiową, a słupy wykończone są drewnem, co naturalnie współgra z ławkami i deptakiem wykonanym z desek. Membrana ukształtowana została w formie stożkowej z podniesionymi narożnikami uzupełniającymi plan powłoki do kwadratu. U góry zamocowana jest do niewielkiego pierścienia opartego o centralny słup, a u dołu do pierścienia trzymającego się stalowych wsporników. Od zewnątrz powłokę obejmuje układ rurek tworzących rodzaj kwa-

dratowego wieńca. Do niego zamocowane są narożniki membrany. Od góry wieńiec podwieszony jest przez linki. Połączenie membrany, linek i rurek nawiązuje do takielunku na żagłowie. Podobnie działają chodniki z desek przypominające trapy przy statku. Ponieważ wymiary poszczególnych membran są niewielkie, więc nie było potrzeby wprowadzania skomplikowanych systemów łączenia membrany z konstrukcją²⁸⁷.

Wyjątkowe oświetlenie wzdłuż bulwaru oraz placu zabaw sprawia, że od wczesnego ranka do późnych godzin wieczornych jest to miejsce pełne życia, zachęcające do wspólnych spotkań i zarażające pozytywną energią ludzi w każdym wieku.

5.3.7. Zadaszenie tarasu hotelu w Bydgoszczy

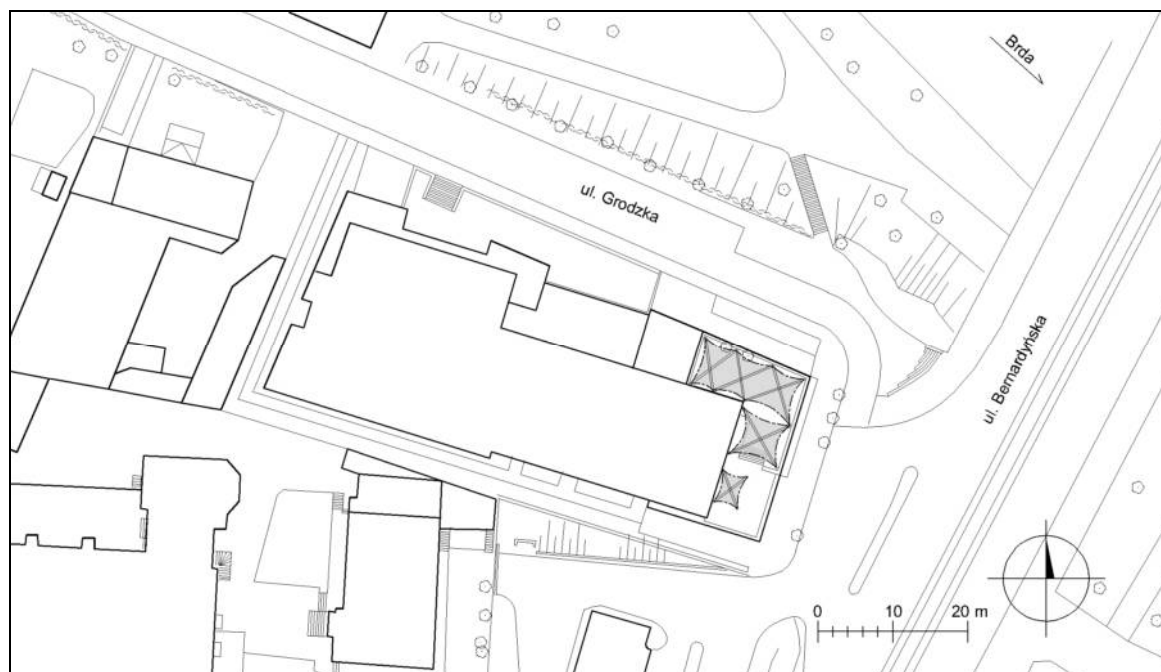
Lokalizacja:	Bydgoszcz, ul. Grodzka 36,
Projektant:	CDF Architekci,
Proj. zadaszenia:	Alu-Tent, Ryszard Zieliński,
Konstrukcja:	k2 engineering, Andrzej Kowal,
Wyk. membrany:	Alu-Tent,
Oddanie:	2012

Hotel Holiday Inn znajduje się w centrum Bydgoszczy. Koncepcję architektoniczną zrealizowała pracownia CDF Architekci z Poznania²⁸⁸. Lokalizacja nad rzeką Brdą powoduje, że nowoczesna bryła budynku widoczna jest z daleka. Zróżnicowane materiały podkreślają

delikatne występy i zagłębienia zwartej bryły hotelu. Na trzecim piętrze, od strony rzeki, znajduje się taras. Przewidywany był, jako tzw. taras śniadaniowy dla gości hotelowych. Aby poprawić warunki przebywania na nim, postanowiono wprowadzić nowoczesne, stałe

²⁸⁷ *Bulwar Nadmorski w Gdyni z placem zabaw na plaży Śródmieście*. Architektura-Murator 5/2009, s. 44-45.

²⁸⁸ Na podstawie materiałów udostępnionych przez CDF Architekci i Alu-Tent.



Il. 198. Plan zadaszenia na tarasie hotelu w Bydgoszczy

zadaszenie. Zdecydowano się na lekką formę zadaszenia membranowego.

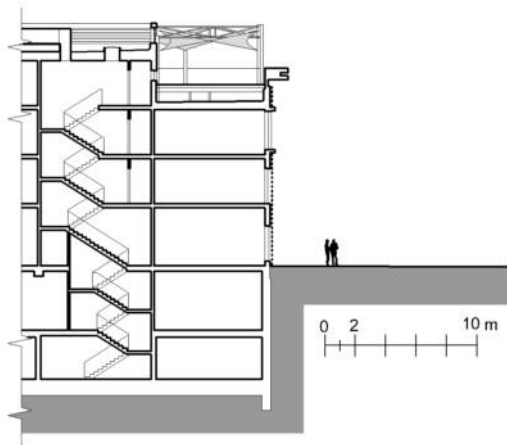
Zadaszenie nie było przewidziane w projekcie budynku, dlatego jego konstrukcję trzeba było dopasować do istniejącego układu. Mimo solidnych elementów budynku, okazało się, że nie wszystkie można wykorzystać do zamocowania zadaszenia.

Wynikało to ze stosunkowo dużych obciążeń przewidywanych dla zadaszenia stałego. Problemem okazało się przeniesienie obciążeń poziomych wynikających z napięcia membrany. Pierwotna koncepcja zadaszenia zakładała użycie słupów z odciążeniami. Takie rozwiązanie wyraźnie ogranicza



Il. 199. Widok zadaszenia na tarasie hotelu w Bydgoszczy

łoby korzystanie z tarasu. Ostatecznie główną konstrukcję stanowią słupy z rozporami. Układ przenikających się kratownic, wykonanych ze stalowych rur, przenosi naprężenia ściskające.

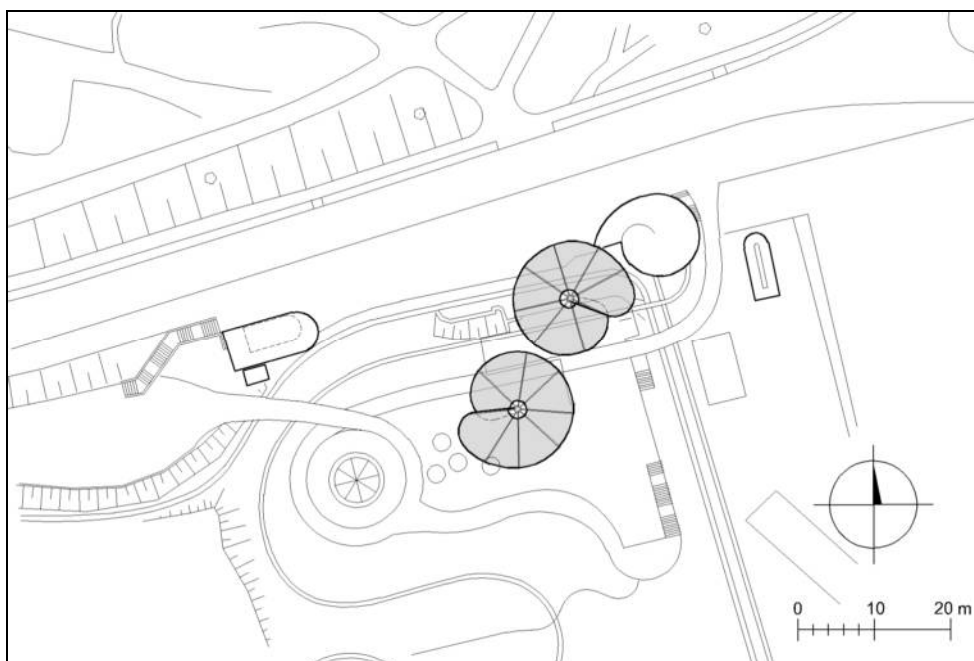


Il. 200. Przekrój przez zadaszenie w Bydgoszczy

Zadaszenie składa się z trzech części: najmniejszej – prostokątnej, średniej – kwadratowej i największej – prostokątnej, zamocowanej w 8 punktach. Zamocowanie na różnych wysokościach powoduje, że membrana ma formę wieloboczną. Powierzchnie poszczególnych paneli wynoszą: 18,14 + 38,52 + 85,73 m². Koncepcję samego zadaszenia zrealizowała firma Alu-Tent w 2012 roku. Membrana wykonana jest z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Mimo złożonego przestrzennie kształtu udało się nawiązać do bryły budynku. Elementy konstrukcji wpisują się w gabaryty, tworzą jakby ortogonalną ramę wokół zadaszenia.

5.3.8. Zadaszenia w centrum sportowo-rekreacyjnym w Poznaniu

Lokalizacja:	Poznań, ul. Wiankowa 2,
Projektant:	Autorska Pracownia Architektoniczna, Urszula Błochowiak, Andrzej Borowicz
Konstrukcja:	k2 engineering, Andrzej Kowal,
Wyk. membrany:	Alu-Tent, Ryszard Zieliński,
Oddanie:	2012



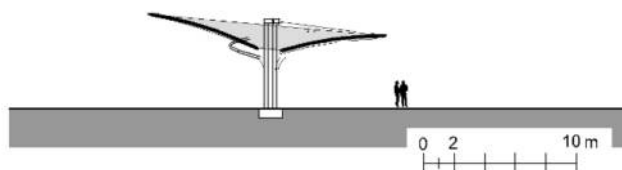
Il. 201. Plan zadaszeń w centrum sportowo-rekreacyjnym w Poznaniu



Il. 202. Widok zadaszeń w centrum Malta-Ski w Poznaniu

Na południowym brzegu jeziora Malta w Poznaniu znajduje się centrum sportowo-rekreacyjne Malta-Ski. Dzięki wykorzystaniu północnego stoku Kopca Wolności już od ponad dwudziestu lat znajduje się tam letni stok narciarski. Później doszedł do tego letni tor saneczkowy. Ciągłe zwiększająca się oferta atrakcji w centrum przyciąga nowych uczestników. W 2012 roku oddana została kolejka góraska wraz z budynkami i zadaszeniami według koncepcji architektonicznej Biura Projektów Inżynierskich z Poznania. Wszystkie obiekty mają zbliżoną formę, z charakterystycznym zaokrąglonym rzutem. Nawiązuje to bezpośrednio to układu szyn kolejki górskiej²⁸⁹.

Przy stacji początkowej kolejki górskiej i zarazem stacji końcowej znajdują się dwa duże zadaszenia membranowe. Chronią one pasażerów oczekujących na peronie przed promieniowaniem słonecznym i deszczem. Poza tym wizualnie akcentują stację końcową. Zadaszenia są zaokrąglone w rzucie, natomiast przestrzennie tworzą formy spiralne, obniżające się w środkowej części. Konstrukcja podporowa składa się z centralnego, wielogłęziowego słupa i promieniście zamocowanych wsporników. Na końcach wsporników zamocowana jest stalowa rura, biegnąca po linii zbliżonej do spirali, tworząca rodzaj zewnętrznego pierścienia. Do tej rury i wewnętrznego pierścienia zamocowana jest membrana. Znajduje się ona



Il. 203. Przekrój przez zadaszenia w centrum Malta-Ski w Poznaniu

²⁸⁹ Urszula Błochowiak, Andrzej Borowicz, *Projekt budowlany – plan zagospodarowania terenu*. 2010.

poniżej wsporników i zasłania je od dołu. Dzięki takiemu zamocowaniu powstaje powierzchnia, która geometrycznie nazywana jest helikoidą. Jest to jedna z powierzchni minimalnych. Dwa stałe zadaszenia membranowe mają zewnętrzną średnicę około 14,5 m. Wewnętrzny otwór przymocowany jest do czterech rur pełniących rolę gałęzi słupa podporowego. Pomiędzy nimi znajdują się dwie dodatkowe rury będące lampami podświetlającymi membranę.

Krawędź membrany w tym przypadku nie jest wzmocniona taśmą keder, a jedynie podwójną warstwą materiału. W tak wzmocnionej membranie wykonane są stalowe oczka, potrzebne do przyszurowania membrany do konstrukcji wsporczej. Nietypowy kształt membrany budził obawy o to, jak zachowa się materiał podczas montażu. W środkowej części konieczne było wprowadzenie dużej ilości szwów. Dla sprawdzenia sposobu naprężania powłoki został wykonany element prototypowy. Obecnie

pełni on funkcję reklamy przed wejściem do firmy wykonawcy membrany.

Oprócz dużych zadaszeń, na tarasie przed kawiarnią, znajdują się dodatkowe, wyraźnie mniejsze, tymczasowe powłoki zdejmowane na zimę. Mają one zbliżony zaokrąglony, kształt uzyskiwany przez mocowanie membrany do stalowego pierścienia. W tym przypadku tworzy się płaska powierzchnia, bez podwójnej krzywizny. Pozostałe obiekty, takie jak kawiarnia i magazyn wózków, też są zaokrąglone, ale już nie mają zadaszeń membranowych. Zadaszenia membranowe są też rodzajem rzeźby, dekoracji, nadającej charakter miejscu i jednocześnie podnoszą jego rangę i estetykę. Powodują, że użyta membrana, przez swoją nowoczesną formę wyróżnia to miejsce i czyni je bardziej eleganckim. Wieczorne efekty podświetlenia, i rozproszenia światła sprzyjają przebywaniu pod nimi, a jednocześnie dzięki lokalizacji nad brzegiem jeziora Malta są widoczne z bardzo daleka. Stanowią rodzaj reklamy przez formę architektoniczną.

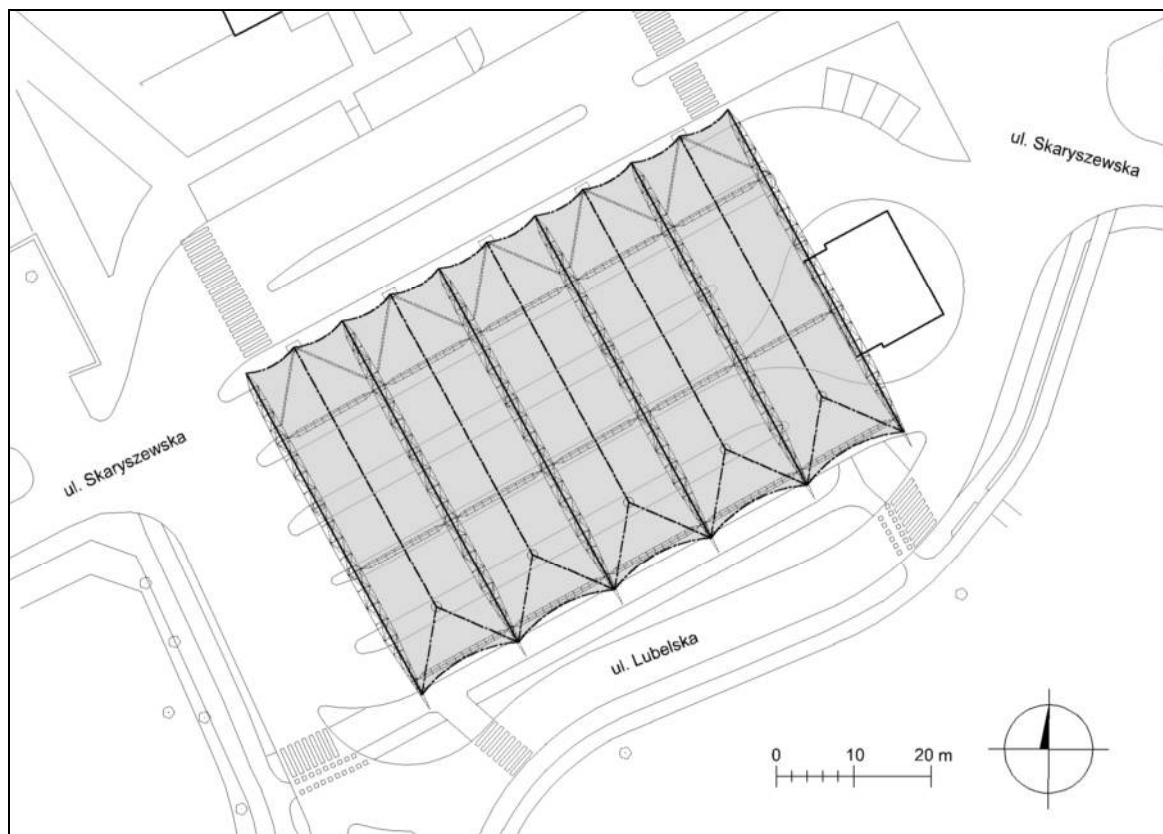
5.3.9. Zadaszenie pętli autobusowej Warszawa Wschodnia przy ulicy Lubelskiej

Lokalizacja:	Warszawa ul. Lubelska,
Projektant:	Mott MacDonald Polska,
Konstrukcja:	k2 engineering, Andrzej Kowal,
Wyk. membrany:	Kontent, Małgorzata i Ryszard Koniewicz,
Oddanie:	2012

W ramach poprawy infrastruktury przed Euro 2012 modernizowane były między innymi dworce kolejowe i autobusowe. Dworzec kolejowy Warszawa Wschodnia jest położony na prawobrzeżnej stronie Wisły, podobnie jak Stadion Narodowy. Bezpośrednio przy dworcu, od strony południowej znajduje się pętla autobusowa. Pełni ona rolę dworca przesiadkowego, łączącego linie kolejowe z autobuso-

wymi. Zatrzymują się tam autobusy miejskie i dalekobieżne. W sumie jest tam 12 przystanków połączonych 5 peronami. Dodatkowo znajduje się tam punkt obsługi pasażerów. Całość zadaszona jest otwartą konstrukcją stalową z napiętą na niej membraną. Koncepcję architektoniczną wykonała pracownia Mott MacDonald z Krakowa²⁹⁰. Obiekt został oddany w maju 2012 roku.

²⁹⁰ Mott MacDonald, *Modernizacja pętli autobusowej z budową pawilonu do odpraw podróżnych przy Dworcu Wschodnim od strony ul. Lubelskiej*. 2011.



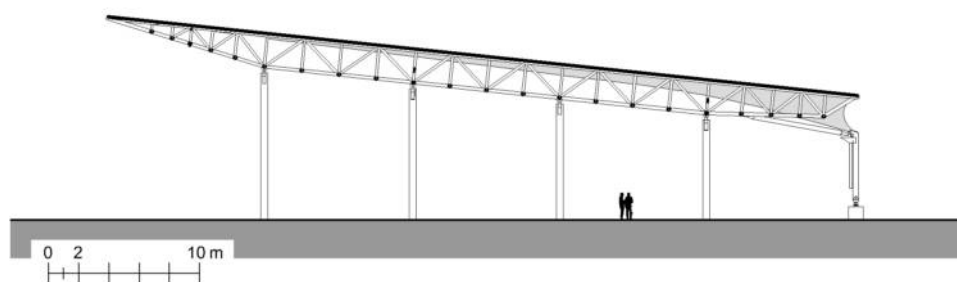
Il. 204. Plan zadaszenia pętli autobusowej w Warszawie

Forma zadaszenia jest bardzo prosta. Delikatnie pofalowana membrana podparta jest kratownicami na słupach. Forma współgra z tarczownicowym dachem dworca kolejowego Warszawa Wschodnia. Pojawia się tu interakcja pomiędzy historyczną już dziś formą kon-

strukcji żelbetowej a możliwościami nowoczesnej membrany. Chociaż zachowana jest podobna forma to zmienił się sposób przenoszenia naprężeń – kiedyś ściskanie i rozciąganie, a teraz już tylko samo rozciąganie głównego materiału. Powstał zupełnie inny efekt.



Il. 205. Widok zadaszenia pętli autobusowej w Warszawie



Il. 206. Przekrój przez zadaszenie pętli autobusowej w Warszawie

W żelbecie musiały być stosowane doświetlenia, membrana natomiast jest materiałem przepuszczającym światło. Przede wszystkim wyraźnie wzrosły wymiary poszczególnych fałd. Podobno bezpośrednią inspiracją zadaszenia był wcześniej zrealizowany dach stadionu miejskiego w Warszawie.

Konstrukcję podporową stanowią proste, stalowe kratownice oparte na słupach. Tworzą układ sześciu równoległych ram trójprzęsłowych ze wspornikowymi zakończeniami. Rygle mają przekrój trójkątny, z pojedynczym pasem górnym i podwójnym dolnym, a ich ostre zakończenia podkreślają dynamikę konstrukcji. Dzięki pochyleniu dźwigarów zadaszenie od strony północnej obniża się pod kątem 6° . Rozstaw pomiędzy nimi wynosi 14,2 m. Długość zadaszenia wynosi 71 m, co daje $3\,260\text{ m}^2$ powierzchni zadaszonej. Membrana wykonana jest z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Płaskie dźwigary i małe różnice wysokości powodują, że membrana jest prawie płaska. Takie rozwiązanie wymaga bardzo mocnego naprężenia, aby przy podmuchach wiatru membrana nie zaczynała drgać. Od północnej strony, od dworca kolejowego, zastosowane są pionowe odciągi przymocowane do lin koszowych. Dzięki temu membrana

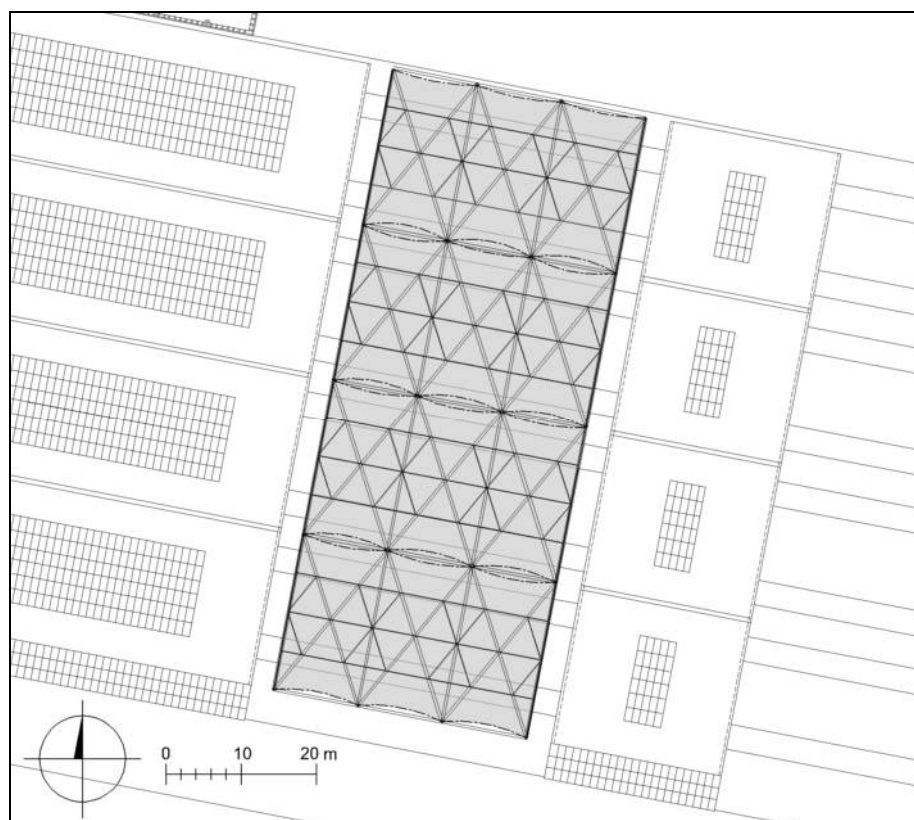
ma przeciwną krzywiznę. Liny koszowe nie dzielą membrany na mniejsze panele, a jedynie leżą na niej i przytrzymują ją od góry. Na drugim końcu lina koszowa przymocowana jest do dwóch cięgien, co razem tworzy układ litery Y. W miejscu połączenia powstał otwór ukazujący konstrukcyjny detal. Aby nie dochodziło do ocierania się membrany o elementy stalowe, zastosowane są dodatkowe wzmocnienia membrany²⁹¹.

Duże naprężenie membrany musi być równoważone przez elementy podporowe. W tym przypadku występują jedynie pionowe słupy. Aby zastąpić brak ukośnych odciągów, wprowadzono kratownicowe rozpory, które położone są prostopadle do głównych dźwigarów. Celowo zostały obniżone, aby nie stykały się z membraną podczas obciążenia jej śniegiem i nie tworzyły progów utrudniających odprowadzanie wody. W miejscu zamocowania liny koszowej wprowadzono poziome zastrzały, aby przenieść napięcie na konstrukcję podporową. Poszczególne panele membrany, z boku, mocowane są do dźwigarów stalowych przez specjalne zaciski. Na pozostałych końcach wprowadzone są cięgna brzegowe, z charakterystycznym wygięciem.

²⁹¹ Andrzej Kowal, *Covering for the Bus Station Warszawa Wschodnia*. Tensinews 23, September 2012, Tensi-Net, p. 5.

5.3.10. Zadaszenie nad peronami dworca kolejowego we Wrocławiu

Lokalizacja:	Wrocław, ul. Marszałka Józefa Piłsudskiego 105,
Projektant:	Grupa 5 Architekci,
Konstrukcja:	Nazbud, Wojciech Naziębło, k2 engineering, Andrzej Kowal,
Wyk. membrany:	Sport halls,
Oddanie:	2012



Il. 207. Plan zadaszenia membranowego nad peronami dworca we Wrocławiu

Dworzec kolejowy we Wrocławiu jest jednym z najstarszych w Polsce. Jego historia sięga połowy XIX wieku. W czasach pruskich zaliczany był do największych dworców w Europie. Charakterystyczne, neogotyckie elewacje budynku głównego oraz stalowa nitowana konstrukcja czteronawowej hali peronowej nadal zachwycają swoim wyglądem. W związku z przewidywanymi we Wrocławiu meczami piłki nożnej, podczas Mistrzostw Europy,

przystąpiono do gruntownego remontu dworca. Obiekt miał się stać wizytówką nowoczesnego miasta o historycznych korzeniach. Przede wszystkim miał być rozpoznawalny przez przyjeżdżających turystów. Koncepcję architektoniczno-urbanistyczną rewitalizacji wygrała pracownia Grupa 5 Architekci z Warszawy^{292, 293}. Remont dworca i jego najbliższego otoczenia trwał ponad dwa lata. Wraz z odnowieniem części historycznych

²⁹² Rafał Zelent, *Rewitalizacja zabytku mającego pełnić funkcję nowoczesnego dworca*. *Architektura-Murator* 9/2012, s. 42-43.

²⁹³ Krzysztof Mycielski, Rafał Zelent, *Gdzie historia splata się z nowoczesnością, Dworzec Główny PKP we Wrocławiu*. *Świat Architektury* 7(25)/2012, s. 84-105.



Il. 208. Widok zadaszenia membranowego nad peronami dworca we Wrocławiu

powstały też nowe elementy dworca. Między innymi duży, podziemny parking oraz nowe zadaszenie nad częścią peronów. Historyczne zadaszenie nad peronami składało się z dwóch, oddzielnych części. Pomiędzy nimi była przerwa, w której kiedyś zatrzymywały się parowozy. W ramach modernizacji przewidziano uzupełnienie tej przerwy, ale tak, aby nie zasłonić historycznej dekoracji. Zaproponowano nowe zadaszenie, z materiału odmiennego od pozostałej części hali peronowej. Wybrano zadaszenie membranowe jako rozwiązanie nowoczesne, wykorzystujące światło dzienne. Zadaszenie to zostało lekko odsunięte i podniesione względem części istniejącej.

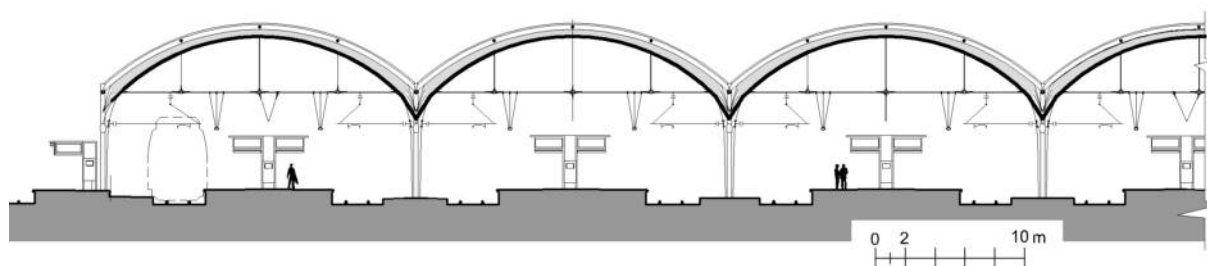
Nowe zadaszenie otwartej, czteronawowej hali tworzy układ podobny do części historycznej. Główną konstrukcję stanowią połączone łukowe ramy ze ściągiem o rozpiętości 21,0 m. Pomiędzy nimi wprowadzone zostały rozpory przenoszące obciążenia od naciągu membrany

o rozpiętości 17,0 m. Dodatkowe przekątniowe łuki łączą wszystko w jedną całość, tworząc przestrzenną strukturę prętową w formie połączonych kolebek. Dzięki temu uzyskano 2 870 m² powierzchni zadaszenia^{294, 295}.

Słupy i łukowe rygle zaprojektowane są z profili rurowych o średnicy 300 mm, a pomiędzy nimi znajdują się prętowe podwieszane ściągi. Poniżej stalowej konstrukcji rozpiętych jest 12 membranowych paneli. Każda membrana przyjmuje formę kolebkową, ponieważ z dwóch stron zamocowana jest do łukowych rygli. Dwa pozostałe brzożki membrany zamocowano do cięgien rozpiętych pomiędzy ramami. W miejscu, w którym sąsiadujące panele mogłyby się połączyć, zastosowane są dwa cięgna, dla każdej membrany osobne. W ten sposób powstaje przerwa, która została zamknięta dodatkowym pasem membrany, tworzącym rodzaj koryta zbierającego wodę i śnieg.

²⁹⁴ Andrzej Kowal, *A new lightweight covering for the Art Nouveau Railway Station*. Tensinews 23, September 2012, TensiNet, p. 10.

²⁹⁵ Andrzej Kowal, *Wybrane zagadnienia projektowania i realizacji konstrukcji membranowych*, Przegląd Budowlany, 5/2012, s. 123-125.



Il. 209. Przekrój zadaszenia membranowego nad peronami dworca we Wrocławiu

Mimo że nad powłoką znajdują się solidne elementy konstrukcji (rozpory i łuki przekątniowe), to membrana nie jest do nich zamocowana. Właściwe ukształtowanie powoduje nawet, że w środkowej części membrana naturalnie się obniża. Nie jest to wynik obciążenia, ale kształtu wewnętrznej równowagi tak, jak w błonie mydlanej. Próba mocowania na środku niepotrzebnie zwiększyłaby obciążenie konstrukcji i usztywniłaby membranę.

Pokrycie zostało wykonane z membrany z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Ilość

światła, która przedostaje się przez materiał membrany powoduje, że pod zadaszeniem wydaje się jaśniej niż w części historycznej, mimo że tam znajduje się duży świetlik. Na pewno wynika to z równomiernie rozproszonego światła, które jest przyjemniejsze dla oka niż ostre błyski i mocne cienie w starszej części. Wieczorem światło sztuczne też lepiej odbija się od jasnej powierzchni.

Kontrowersje wśród pasażerów budzi jedynie przerwa pomiędzy częściami nową i starą oraz brak zadaszenia nad częścią peronu piętego.

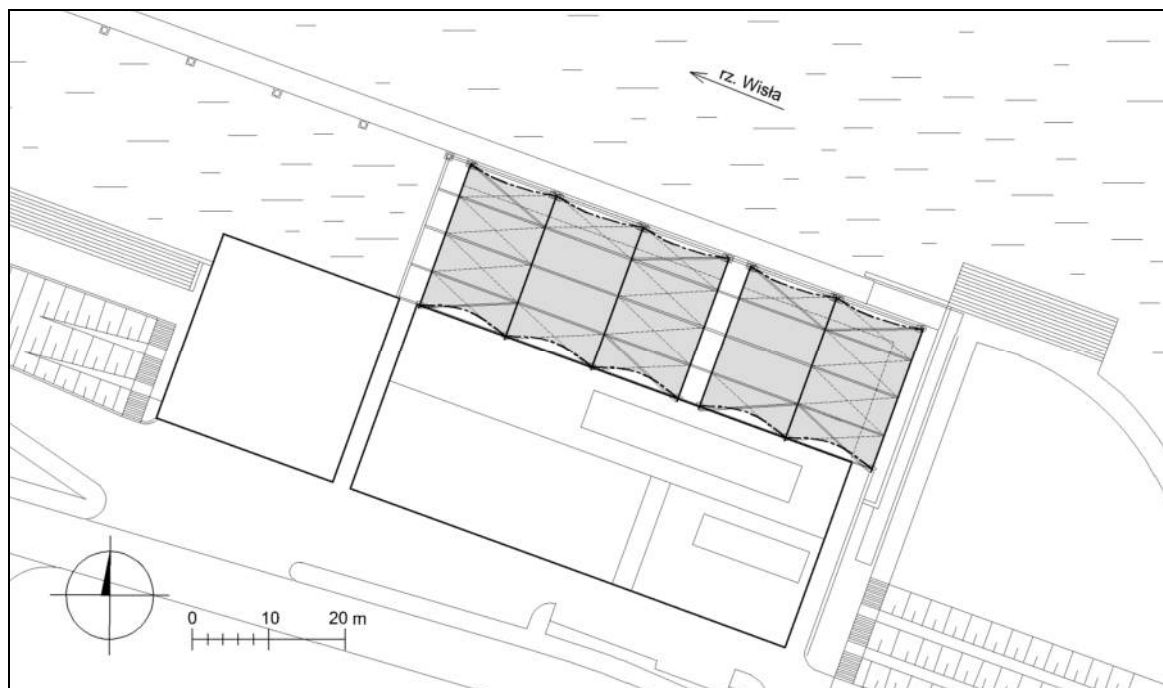
5.3.11. Zadaszenie przystani wodnej we Włocławku

Lokalizacja:	Włocławek, ul. Piwna 1a,
Projektant:	Modern Construction Systems, Wojciech Rzyński
Konstrukcja:	Modern Construction Systems,
Wyk. membrany:	Kontent, Małgorzata i Ryszard Koniewicz,
Oddanie:	2013

Przez wiele lat miasta położone nad rzeką Wisłą nie wykorzystywały jej jako miejsca do rekreacji. Od pewnego czasu obserwowany jest ponowny zwrot ku wodzie, między innymi związany z rewitalizacją dolnej Wisły. We Włocławku np. odnowione zostały bulwary nadrzeczne, a w 2014 roku powstała nowoczesna przystań wodna. Przede wszystkim jest to obiekt przeznaczony na bazę jednego z najstarszych w Polsce klubów wioślarskich. Jest to

również siedziba Wodnego Ochotniczego Pogotowia Ratunkowego oraz policji. Całość została zrealizowana jako jedno z zadań „Turystycznego zagospodarowania Zalewu Włocławskiego”. Mogą tam zatrzymywać się różnego rodzaju łodzie i motorówki. Przygotowane są nie tylko miejsca do wodowania i cumowania, ale powstały też miejsca do wypoczynku dla ludzi, między innymi do obserwowania wydarzeń na wodzie²⁹⁶.

²⁹⁶ Marlena Happach, *Przystań wodna we Włocławku*. Architektura-Murator 11/2014, s. 66-72.



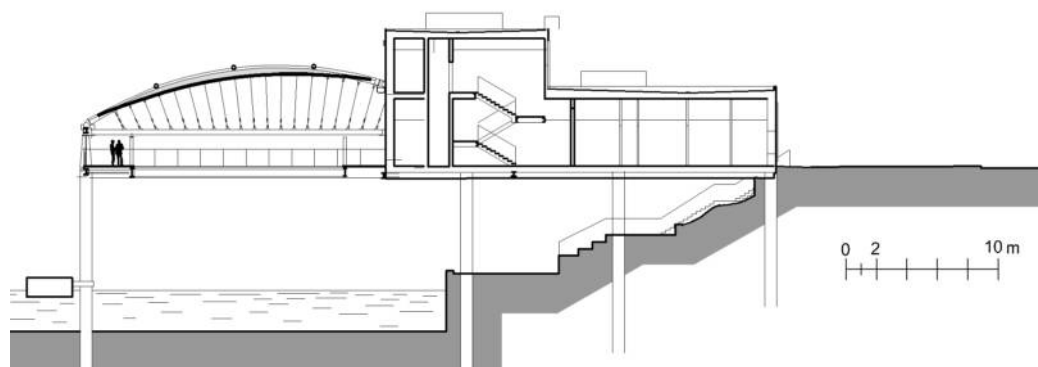
Il. 210. Plan zadaszania na przystani we Włocławku

Projekt przygotowała pracownia Modern Construction Systems z Poznania. Ciekawy obiekt o nowoczesnej formie uatrakcyjnią nabrzeże rzeki. Wysoka skarpa powoduje, że od strony miasta widoczna jest niewysoka, horyzontalna elewacja, dodatkowo osłonięta poziomymi drewnianymi żaluzjami. Natomiast od strony

rzeki widoczne są pomosty umieszczone na wysokich słupach, wystających bezpośrednio z wody. Molo i pomosty oddzielają basen przystani od głównego nurtu rzeki. Ponad basenem znajduje się zadaszanie membranowe, formą nawiązujące do żagli. Całość składa się z pięciu paneli połączonych w dwie, nieco



Il. 211. Widok zadaszania na przystani we Włocławku



Il. 212. Przekrój przez zadaszenie na przystani we Włocławku

odsunięte od siebie części. Membrany zamocowane są do niewysokich łuków, co nadaje im delikatnie

wygiętą formę. Odległość pomiędzy głównymi dźwigarami wynosi 12 m. To jest jedna z większych rozpiętości dla pojedynczej membrany, jaką zastosowano w polskich zadaszeniach. Niewielkie pochylenie powłoki i stosunkowo mała krzywizna powodują, że membrana przy opadach śniegu jest bardzo mocno

obciążona. Pomędzy głównymi łukami, do których przymocowana jest membrana, znajdują się poziome rury. Umieszczone są ponad membraną i przeznaczone do równoważenia obciążeń wynikających z napięcia membrany. Pełnią rolę rozpór. Podobną rolę pełnią ukośne zastrzały znajdujące się w narożach zadaszenia. Membrana wykonana jest z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Powierzchnia zadaszona wynosi 1090 m².

Tabela 9

Porównanie zadaszeń zrealizowanych w pozostałych obiektach

Nr	Obiekt	Rok realizacji zadaszenia	Pow. zadaszona [m ²]
1.	Katowice – bank	03.2001	162
2.	Gdynia – stacja paliwowa	2003, 2005, 2011	320
3.	Katowice – centrum handlowe	11.2005	430
4.	Sopot – klub muzyczny	2006	2 300
5.	Łańcut – storczykarnia	06.2008	183
6.	Gdynia – bulwar przy plaży	2009	320
7.	Bydgoszcz – hotel	2011	141
8.	Poznań – kolejka górską	05.2012	340
9.	Warszawa – pętla autobusowa	05.2012	3 400
10.	Wrocław – dworzec kolejowy	06.2012	2 870
11.	Włocławek – przystań wodna	05.2014	1 090

Źródło: opracowanie własne.

5.4. Uwagi dotyczące przedstawionych przykładów

Zadaszenia membranowe, które zostały zrealizowane w przedstawionych amfiteatrach, w większości znajdują się nad sceną. W kilku obiektach dodatkowo ochraniają widownię. Jedynie w dwóch przypadkach znajdują się tylko nad widownią, ponieważ scena ma osobne zadaszenie. W Ustroniu początkowo zadaszenie membranowe było tylko nad widownią, a po kolejnej przebudowie zostało przedłużone nad scenę i obecnie obejmuje cały amfiteatr.

Położenie sceny w amfiteatrze najczęściej wynika z topografii terenu i głównych dojazdów do obiektu. Przy wprowadzaniu zadaszenia projektanci starali się zachować walory krajobrazowe, aby osoby przebywające na widowni miały atrakcyjny widok na otoczenie lub na jego wybrany fragment, żeby nie został zatarty efekt przebywania w plenerze.

Poniżej przedstawiono schemat orientacji widowni w analizowanych amfiteatrach. Grotem zaznaczono kierunek patrzenia widzów na scenę względem stron świata.



Il. 213. Orientacja widowni w analizowanych amfiteatrach

Mimo że obiekty pełnią podobną funkcję i imprezy organizowane są o podobnych godzinach, to zadziwiające jest duże zróżnicowanie orientacji poszczególnych amfiteatrów. W niektórych przypadkach promienie zachodzącego słońca może są atrakcją miejsca, ale

oślepiają widzów. W takiej sytuacji zadaszenie może pełnić również funkcję osłony.

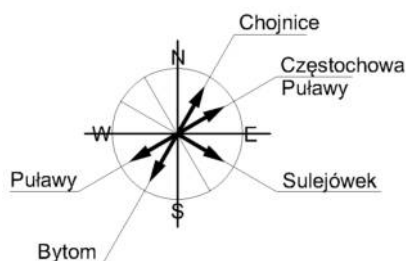
Większość zadaszeń ma symetryczną formę, aby kompozycyjnie łączyć się z widownią i akustycznie ukierunkowywać przemieszczające się dźwięki. Zwykle zadaszenie nieco unosi się w kierunku widowni, częściowo spełniając funkcję ekranu akustycznego. Jedynie zadaszenie w Kołobrzegu ma układ umieszczony na podobnej wysokości, w którym fałdy powłoki ustawione są prostopadle do osi założenia, na przemian podnoszą się i opadają. W Szczecinie fałdy ustawione są w kierunku widowni, co jest ważnym czynnikiem dobrej akustyki, jak podkreśla projektant. Podczas projektowania amfiteatru należy brać pod uwagę wpływ kształtu membrany na akustykę obiektu.

Scena zwykle ma tylną ścianę lub budynek zaplecza. Jedynie amfiteatry w Kielcach i Mrągowie wykorzystują krajobraz, jako tło sceny. Mimo to, często widok jest przysłaniany scenografią lub półprzezroczystą siatką. Chroni to przed podmuchami wiatru i opadami deszczu. W Sopocie ściana lasu przylega bezpośrednio do sceny i tworzy naturalne zamknięcie. W Łagowie tylne zamknięcie sceny pełni płaska membrana, która jest ekranem kinowym.

Przednia część zadaszenia konstrukcji podporowej często ma formę łuku lub ramy tworzącej rodzaj portalu scenicznego. W kilku przypadkach przewidziano możliwość przystosowania konstrukcji zadaszenia do zamocowania oświetlenia lub nagłośnienia. Tylko kilka amfiteatrów ma dodatkowe, specjalnie przygotowane konstrukcje pozwalające na zamocowanie sprzętu ponad sceną, np. Sopot, Płock, Kielce i Mrągowo. Niestety w niektórych obiektach nie przewidziano możliwości dodatkowego obciążenia, co wiąże się z koniecznością stawiania osobnej konstrukcji.

Większość amfiteatrów ma stałe ogrodzenia, co powoduje, że znajdujące się tam zadaszenia membranowe są na terenie zamkniętym. Poza tym membrana znajduje się na dużej wysokości, więc jest utrudniony dostęp i nie ma obawy o jej celowe uszkodzenie. W niektórych obiektach jest zainstalowany dodatkowy monitoring, który zniechęca potencjalnych wandalów. Natomiast zadaszenia, które są dostępne bez ograniczeń stanowią lokalną atrakcję, zachęcającą do gromadzenia i do przebywania tam niezależnie od pory roku, nawet inspirując do spontanicznych wydarzeń.

Stosowanie zadaszeń membranowych na stadionach nawiązuje do najstarszych przykładów takich jak np. rzymskie Colloseum. Poza funkcją ochronną wyróżniają to miejsce na widowni, w którym przebywają ważne osoby (kiedyś był to cesarz ze swoją świtą, a obecnie są to VIP-y). Pojedynczy baldachim został powiększony do zadaszenia całych sektorów widowni.



Il. 214. Orientacja zadaszonej widowni w analizowanych stadionach

W Polsce zaledwie kilka stadionów ma zadaszenia membranowe. Kolejne są w budowie lub zostały niedawno otwarte. Wśród przedstawionych przykładów, 4 stadiony mają zadaszone wszystkie trybuny: Stadion Narodowy, stadiony miejskie w Warszawie, Poznaniu i Gdyni. Pozostałych 5 stadionów z przedstawionych ma zadaszenia tylko wybranych trybun. W Puławach znajdują się dwie zadaszone trybuny, po przeciwnych stronach boiska. Na il. 211 przedstawiono schemat orientacji zadaszonych widowni, czyli kierunek patrzenia

widzów na płytę boiska względem stron świata.

Konstrukcje zadaszeń to przede wszystkim układy wspornikowe, oparte o koronę stadionu, z tyłu widowni. Dzięki temu uniknięto elementów konstrukcji przesłaniających boisko. Dwa stadiony mają bardzo skomplikowaną konstrukcję, są to: Stadion Narodowy z owalnym układem prętowo-ciężnowym oraz stadion w Poznaniu z układem olbrzymich dźwigarów kratownicowych. Zadaszenia pochylone są na zewnątrz, dzięki czemu woda deszczowa odprowadzana jest za widownię. Takie rozwiązanie powoduje, że zadaszenie nachylone jest w przeciwną stronę niż widownia. W takim przypadku przednia część zadaszenia jest położona bardzo wysoko, a duża różnica wysokości najczęściej powoduje, że zadaszenie jest mało skuteczne. Obniżanie zadaszenia powoduje zmniejszenie pochylecia, a to spowalnia spływ wody i zaleganie śniegu. Wyjątkiem są zadaszenia w Chojnicach i Częstochowie. W Chojnicach zadaszenie jest odwrócone, pochylone do przodu i podparte dodatkowymi słupami, przy których odprowadzana jest woda z zadaszenia. Gorzej jest w Częstochowie, gdzie pochylecie jest największe, ale nie ma elementów instalacji, które zbierałyby spadającą wodę.

Większość zadaszeń to układy modułowe, stawiane nad poszczególnymi sektorami widowni. Takie rozwiązanie pozwala na dzielenie realizacji na etapy.

Wykorzystanie zadaszeń membranowych w miejscach oczekiwania na środek transportu jest dobrym rozwiązaniem, gdyż łączy dwie ważne funkcje: identyfikację miejsca oraz zapewnia ochronę przed promieniowaniem słonecznym i opadami atmosferycznymi. Obiekt taki wyróżnia się w krajobrazie, dzięki czemu można go łatwo zlokalizować. Jest to istotne zarówno dla podróżnych, jak i dla przewoźni-

ka, który obserwuje przestrzeń z innej perspektywy. Musi wcześniej dostać informację, gdzie powinien się zatrzymać. Można tę myśl kontynuować i powiedzieć, że jest to symbol portu, w którym płynący statek będzie cumował wśród innych żaglowców, nawet jeśli miejsce nie jest bezpośrednio związane z wodą (np. dworzec kolejowy lub autobusowy). Zadaszenie membranowe może nawet być symbolem tymczasowego miejsca postoju dla wędrowców, czyli takim współczesnym namiotem.

W mieście kojarzonym z morzem i wodą uzasadnioną inspiracją są żagle. W Gdyni stacje

paliwowe „pod żaglami” dzięki zadaszeniom membranowym stały się rozpoznawalnym symbolem miasta. Inaczej było we Wrocławiu, w którym inspiracją dla nowego zadaszenia na dworcu kolejowym była modernizacja dworca w Dreźnie. Choć zadaszenie membranowe nawiązuje do formy istniejącego historycznego zadaszenia, to celowo zastosowano nowoczesny materiał pokryciowy kontrastujący z pozostałą częścią. Było to bezpośrednim nawiązaniem do najnowszych realizacji światowej sławy architekta Richarda Rogersa.

6. ELEMENTY ROZWIĄZAŃ

6.1. Detale połączeń

Podstawowym rodzajem podpór stosowanych w przedstawionych zadaniach są różnego rodzaju dźwigary stalowe. W niektórych przypadkach membrana mocowana jest bezpośrednio do sztywnych elementów konstrukcji, a w innych wprowadzane są wiotkie elementy pośrednie. Jeśli chodzi o materiał membrany, to stosowane są dwa, znacznie różniące się rodzaje tkaniny – wykonanej z włókien poliestrowych lub włókien szklanych.

Dla tkaniny na bazie włókien szklanych pokrytych PTFE stosowane są trwalsze i droższe rozwiązania, natomiast dla tkaniny z włókien poliestrowych pokrytych PCW rozwiązania są prostsze i tańsze. Sposoby zamocowania membrany zależą też od firmy, która wykonała dane zadanie. Można nawet zauważyć rozwój technologiczny, pokazujący jak z biegiem lat zmieniały się rozwiązania. Pojawiły się nowe, wcześniej nieznane sposoby lub dotychczasowe zostały bardziej dopracowane, a w niektórych przypadkach bardziej uproszczone.

Analizowane sposoby łączenia membrany do elementów konstrukcji zostały pogrupowane zgodnie z podziałem podpór zamieszczonym na 68 stronie.

Łączenie brytów, czyli poszczególnych elementów tkaniny technicznej, obecnie wykonywane jest przez zgrzewanie za pomocą urządzeń wykorzystujących fale o wysokiej częstotliwości. Jest to ważne ze względu na technologię wykonania i wytrzymałość połączenia, natomiast nie ma to wpływu na formę architektoniczną. Jedynie linie szwów, ich układ decydują o wizualnym obrazie zadania. W niektórych przypadkach celowo podkreślają for-



Il. 215. Połączenie brytów w miejscu wzmocnienia powłoki

mę, a w klubie w Sopotcie zostały wykorzystane, jako dekoracja zadania.

Duże naprężenia, które pojawiają się w membranie w miejscu zamocowania do centralnego pierścienia, wymagają wzmocnienia. W przedstawionym przykładzie zostało to wykorzystane do stworzenia geometrycznej dekoracji. Wielkość tych wzmocnień zmienia się wraz z wymiarami poszczególnych stożkowych modułów.

6.1.1. Podpory liniowe sztywne

Zadanie zrealizowane pomiędzy budynkami biurowymi w Katowicach było pierwowzorem dla kolejnych. Zwłaszcza, że po raz pierwszy w Polsce została zastosowana tkanina z włókien szklanych pokrytych PTFE. Gotowa membrana wraz z łącznikami została przygotowana za granicą, a na miejscu już tylko połączona do wcześniej przygotowanej konstrukcji. Zadanie zostało zaprojektowane tak, że z jednej strony membrana zamocowana jest do sztywnego łuku, a z pozostałych stron wiotkimi cięgnami. Połączenie do wygiętej rury zostało zrealizowane w następujący sposób:



Il. 216. Zamocowanie membrany do łuku w Katowicach

wzdłuż tej rury przyspawano pasek blachy, od góry zastosowano specjalny metalowy profil w formie listew, które przytrzymują membranę. Wzdłuż krawędzi membrany znajduje się taśma z linką keder, aby zabezpieczyć połączenie przed wysunięciem się z zacisku. Takie połączenie nie daje możliwości regulowania położenia membrany, dlatego podczas montażu wykonywane jest jako pierwsze. Ułatwia to ustawienie membrany w przestrzeni.

Podobnie zrealizowane jest mocowanie membrany w amfiteatrze w Ustroniu. Głównymi elementami, do których zamocowana jest membrana są łuki. Wykonano je jako dwugąłzowe, z giętych rur połączonych blachą. Do górnej rury przyspawany został dodatkowy pas blachy służący do mocowania membrany. Do



Il. 217. Zamocowanie membrany do łuku w Ustroniu

tej blachy za pomocą metalowych listew dociskowych zamocowano krawędź membrany zakończonej przez keder. Listwy dociskowe nie mają specjalnych wyżłobień, co powoduje, że keder jest widoczny na zewnątrz.



Il. 218. Zamocowanie membrany do łuku w Węgierskiej Górze

W Węgierskiej Górze łuk jest położony bardzo płasko i tworzy rodzaj półpierzścienia. Membrana zamocowana jest do tego półpierzścienia w przedniej części sceny. Podobnie, jak we wcześniejszych przykładach, do łuku przyspawana jest wygięta blacha, a do niej przymocowana jest membrana. Duża średnica rury spełnia też rolę chroniącą krawędź zadaszenia przed spływaniem wody i spadaniem śniegu. Takie rozwiązanie wizualnie zwiększa ciężar konstrukcji, ponieważ cienka membrana zasłonięta jest grubą rurą.

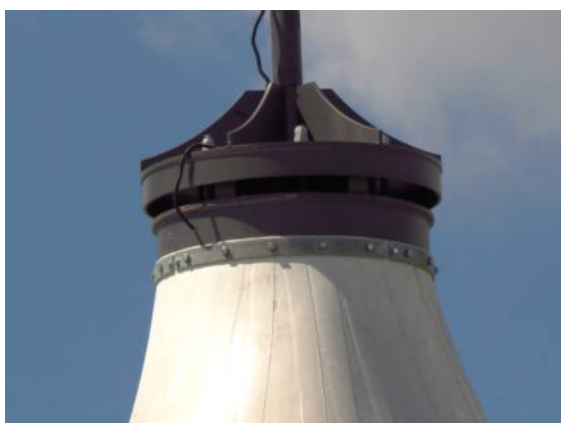
Podobnie zamocowana jest membrana w Brennej. Przestrzenny pierścień jest zamknięty i obejmuje membranę ze wszystkich stron. Takie rozwiązanie wymaga bardzo dużej precyzji, gdyż nie ma możliwości regulowania położenia membrany. Przy niewielkiej różnicy średnic pomiędzy membraną a pierścieniem mogą pojawiać się fałdy lub rozrywanie membrany. Dolny pierścień spełnia w tym przypadku dodatkową rolę – chroni przed spadaniem śniegu i wody.



Il. 219. Zamocowanie membrany do górnego pierścienia w Brennej

Powyżej przedstawione jest zamocowanie membrany do górnego pierścienia w Brennej. Pierścień ten utrzymuje większą część obciążeń działających na zadaszenie, pozwala też na wentylowanie przestrzeni pod membraną oraz służy do zapewnienia właściwego naprężenia powłoki. W tym przypadku woda deszczowa i śnieg nie gromadzą się w jego pobliżu, a raczej przemieszczają się od niego. Podczas montażu membrana w pierwszej kolejności mocowana jest do górnego pierścienia. Ułatwia to podnoszenie nienaprężonej jeszcze powłoki na odpowiednią wysokość.

Górny, centralny pierścień stosowany jest przy formach stożkowych. Układ brytów dla takiej formy jest promienisty, czyli do centralnego pierścienia dochodzą wszystkie szwy membrany. Pojawia się wtedy problem, jak zmieścić



Il. 220. Górny pierścień w Węgierskiej Górze

tak dużą liczbę szwów, zwłaszcza, że same szwy mają wymiar kilku centymetrów. Poza tym mała średnica pierścienia powoduje, że zwiększa się obciążenie membrany i np. przy dużych opadach śniegu może dojść do wyrwania materiału. W zadaszeniu w Węgierskiej Górze uzyskano najmniejszą średnicę górnego pierścienia. Wynosi ona 960 mm. To zamocowanie membrany można by potraktować jako przykład podpory punktowej, gdyż powierzchnia zadaszenia jest ponad 600 razy większa od powierzchni samego podparcia.



Il. 221. Widok od dołu podparcia pierścienia w Węgierskiej Górze

Na podkreślenie zasługuje precyzyjne dopasowanie membrany do pierścienia mocującego. Przy tego typu połączeniach nie ma możliwości korygowania niedokładności.

Kolejnym przykładem zamocowania membrany (il. 222) bezpośrednio do sztywnych elementów konstrukcji jest rozwiązanie, jakie zostało zastosowane przy połączeniu membrany do poziomych rygli na Stadionie Narodowym w Warszawie. Najbardziej zewnętrzny pas dachu znajduje się pomiędzy ścisłym pierścieniem a siatkami elewacyjnymi. Nad tymi siatkami zamocowany jest prostokątny rygiel, który celowo jest podniesiony. Stanowi element służący do zamocowania membrany, ale dodatkowo chroni przed wylewaniem się wody na zewnątrz zadaszenia. W tym przy-



Il. 222. Zamocowanie membrany w zadaszeniu Stadionu Narodowego w Warszawie

padku połączenie zrealizowane jest podobnie jak we wcześniejszych przykładach. Do prostokątnego rygla przyspawany jest pas blachy, do którego od góry dociśnięta jest membrana.

Podobnie zostało rozwiązane połączenie membrany do sztywnej ramy amfiteatru w Łagowie. Do okrągłej rury przyspawany jest pas blachy, do którego dociśnięta jest membrana za pomocą dodatkowych listew. Keder wzdłuż krawędzi zapobiega wysunięciu się z zacisku i powoduje, że membrana jest równomiernie naprężona, nie tylko w miejscach, gdzie znajdują się śruby.

Na kolejnej ilustracji pokazano różne sposoby zamocowania membrany do konstrukcji. Wynika to z kolejności montażu oraz z tego, czy podczas łączenia uzyskiwane jest naprężenie wstępne.



Il. 223. Zamocowanie membrany w zadaszeniu amfiteatru w Łagowie

Innym sposobem mocowania membrany do konstrukcji jest użycie profili aluminiowych, w które wsunięta jest krawędź membrany zaopatrzona w keder. Rozwiązania takie stosowane są w namiotach halowych, przy płaskich membranach. Trudnym zadaniem jest wtedy odpowiednie naprężenie membrany. W zadaniu w Chojnicach, minimalizując koszty, zastosowano właśnie takie rozwiązanie. Prosty, aluminiowy profil przymocowany jest bezpośrednio do górnej powierzchni kratownicowego dźwigara. Profile poszczególnych prętów w kratownicy są prostokątne, dlatego nie było potrzebne wprowadzenie dodatkowych, pośrednich elementów. Naprężenie membrany uzyskane zostało przez wypchnięcie łukami podporowymi. Poza tym projektant zastosował dodatkowe okucia, które pozwoliły na naciągnięcie membrany wzdłuż profilu.



Il. 224. Zamocowanie membrany w Chojnicach

Przedstawione do tej pory połączenia membrany z konstrukcją były sztywne, bez możliwości regulowania położenia membrany, a tym bardziej zmiany naprężenia. Połączenia takie są szczelne i nie wymagają wprowadzania dodatkowych warstw materiału, aby ograniczyć np. przesiąkanie wody deszczowej. Kolejne rodzaje połączeń różnią się od wcześniejszych tym, że używane są dodatkowe elementy pośrednie, np. taśmy lub linki, które pozwalają na regulację naprężenia. W przypadku niedo-

kładności wykonania membrany pozwalają też na drobne korekty i likwidowanie fałd.

Takie rozwiązanie zastosowano w zadaszeniu stadionu w Gdyni. Do głównego dźwigara wykonanego z rur przymocowano dodatkowy pręt, który służy do mocowania membrany. Krawędź membrany, wzmocniona przez keder, zaciśnięta jest prostymi listwami, a do nich przymocowano metalowe paski łączące listwy z prętem mocującym. Należy zwrócić uwagę na dodatkowe podkładki chroniące pręt mocujący przed zniszczeniem lakieru, aby nie pojawiła się korozja. Dla zapewnienia szczelności takiego połączenia wprowadzono dodatkowy pas membrany, który zakrywa połączenie. Często pas ten łączony jest wcześniej z jednym z paneli, a następnie na miejscu z drugim panelem. W tym przypadku połączenie występuje w dolnej części membrany, wzdłuż linii koszowej. Wzdłuż tego połączenia spływa woda, więc powinno to być bardzo starannie wykonane.



Il. 225. Zamocowanie membrany na stadionie w Gdyni

W podobny sposób zrealizowane jest połączenie membrany z dźwigarami kratownicowymi na stadionie miejskim w Warszawie. Duża średnica dźwigara powoduje, że dodatkowego pręta prawie nie widać. W tym przypadku krawędź łącząca znajduje się w górnej części zadaszenia. Chociaż woda deszczowa spływa



Il. 226. Zamocowanie membrany na stadionie miejskim w Warszawie

od tej krawędzi, to tutaj również został wprowadzony dodatkowy pas zasłaniający połączenie od góry. W obu przypadkach membrana wykonana jest z włókien szklanych pokrytych PTFE.

W zadaszeniu pętli autobusowej w Warszawie membrana mocowana jest do kratownicy o przekroju trójkątnym, wykonanej z rur. Podobnie jak w poprzednich przykładach, do górnego pasa kratownicy przymocowany został dodatkowy pręt mocujący. Krawędź membrany zakończona jest taśmą keder. W tym przypadku użyte zostały aluminiowe profile, które są zaciśnięte śrubami. Dzięki temu keder ukryty jest wewnątrz profilu. Dalej zastosowane są metalowe taśmy, które obejmują mocujący pręt. Dobór odpowiedniej długości taśm-



Il. 227. Zamocowanie membrany w zadaszeniu pętli autobusowej w Warszawie



Il. 228. Zamocowanie membrany do łuku w Sopocie

łączyjących zakończenie membrany z konstrukcją wsporczą podczas montażu pozwala na regulację położenia membrany oraz regulację wielkości naprężenia wstępnego.

Zadaszenie Opery Leśnej w Sopocie ma membranę mocowaną do olbrzymich łuków. Ze względu na wielkość poszczególnych płyt i występujące tam obciążenia, konieczne było zastosowanie następującego rozwiązania; wzdłuż krawędzi brzegowej membrany umieszczony jest keder, który zaciśnięto metalowymi listwami. Do tych listew przymocowano metalowe taśmy, które obejmują dodatkowy pręt, przymocowany do głównego łuku nośnego. Poza prętem do łuku przymocowano dodatkową listwę, która służy do zamocowania fartucha zapewniającego szczelność połącze-



Il. 229. Zamocowanie membrany do łuku w Sopocie, widok od dołu

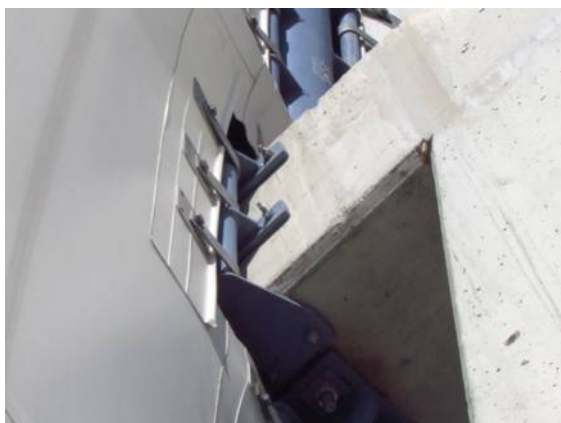
nia. Fartuch połączono z pozostałą częścią membrany.

W zadaszeniu antresoli amfiteatru w Sopocie, podobnie jak we wcześniejszych przykładach, zastosowany jest dodatkowy pręt służący do zamocowania membrany. Membrana ma zawinięty brzeg, tworzący tunel, w który wprowadzono drugi pręt, a dokładnie rurkę o podobnej średnicy. Wyjątkowo membrana nie jest zakończona taśmą keder, ponieważ jest to dolne zakończenie panelu i tędy spływa woda do zewnętrznej rynny (patrz il. 302). Obie rurki połączone są stalowymi taśmami. Połączenie od góry zasłonięte jest dodatkowym pasem membrany.



Il. 230. Zamocowanie membrany w amfiteatrze w Sopocie

Na stadionie w Poznaniu membrany mocowane są od góry i z boku, pełnią funkcję zadaszenia i osłony elewacji. W większości mocowane są do stalowych dźwigarów, ale są miejsca, w których konieczne było zamocowanie do żelbetowych elementów konstrukcji. Podobnie jak we wcześniejszych przykładach, zastosowane zostały dodatkowe pręty mocujące. Membrana wzmocniona jest taśmą keder i zaopatrzona w okucia. Do nich przykręcone są metalowe taśmy, które obejmują wcześniej wspomniany pręt mocujący.



Il. 231. Zamocowanie membrany do żelbetowego słupa na stadionie w Poznaniu

Zamiast taśm służących do mocowania membrany z konstrukcją w niektórych obiektach zastosowano elastyczną linkę. Przykładem może być zadaszenie kolejki górskiej w Poznaniu. W tym przypadku zamiast zacisków zastosowano oczka z elastyczną linką. Oczka (w żeglarskim nazywane są liwersami) wzmocniono specjalnymi nitami. Dzięki temu można łączyć membranę z innymi elementami konstrukcji, a przeciągnięta linka pozwala na regulowanie odległości i równomierne naprężenie.



Il. 232. Zamocowanie membrany w zadaszeniu w Poznaniu

Podobnie zamocowane są dodatkowe membrany w Łagowie. Ponieważ nie mają dużych wymiarów i nie przenoszą dużych obciążeń, więc zastosowano uproszczony system mocowania. Do głównych elementów konstrukcji



Il. 233. Zamocowanie membrany amfiteatru w Łagowie

przymocowano dodatkowe pręty, a do nich, za pomocą linki, membranę. Takie rozwiązania stosowane są w prostszych konstrukcjach, np. banerów reklamowych lub plandek na samochodach. Na il. 233 w dolnej części i po lewej stronie, przedstawione jest zamocowanie paneli bocznych i siatki spełniającej rolę półprzezroczystego tła sceny.

Przykładem uproszczenia może też być sposób zamocowania membrany w amfiteatrze w Płocku. Wzdłuż zewnętrznego pierścienia zadaszenia amfiteatru, a dokładnie wzdłuż prostych elementów rozpartych pomiędzy kolumnami podtrzymującymi zadaszenie, membrana została zamocowana bezpośrednio do konstrukcji. Taśmy mocujące obejmują zewnętrzny pierścień, gdyż nie ma tam dodatkowych



Il. 234. Zamocowanie membrany do zewnętrznego pierścienia amfiteatru w Płocku

elementów służących do zamocowania membrany. Krawędź membrany, podobnie jak w innych obiektach, wzmocniona jest przez keder. Metalowe listwy spełniają rolę zacisku, a do nich zamocowano elastyczne taśmy, które bezpośrednio obejmują rurę konstrukcyjną.



Il. 235. Zamocowanie membrany w zadaszaniu amfiteatru w Płocku

Natomiast w przypadku wewnętrznego łuku wykonano dodatkowe pręty mocujące. Łuk oddziela główną połąć dachu od części nad sceną. Krawędź membrany wzmocniono ze wszystkich stron przez keder. Krawędź zaciskają metalowe listwy, a do nich zamocowano elastyczną taśmę. W tym przypadku taśma obejmuje pręty mocujące, a nie łuk.

W niektórych przypadkach połączenia membrany są zupełnie zasłonięte tak, jak to zostało



Il. 236. Zamocowanie membrany w amfiteatrze w Opole

wykonane w Opolu. Aby uzyskać obłą formę pokrytą membraną, od góry i dołu, zastosowano zamocowanie za pomocą elementów brzegowych, podobnych jak we wcześniejszych przykładach. Wzdłuż krawędzi membrany wprowadzono dodatkowy fartuch, który zasłania zamocowanie, a dodatkowa metalowa listwa wszystko szczelnie zamyka.



Il. 237. Zamocowanie membrany do ściany w Sopocie

Jeszcze bardziej ukryte zamocowanie jest w klubie w Sopocie, gdzie membrana przymocowana jest do żelbetowej ściany. Dodatkowa, zewnętrzna izolacja termiczna powoduje, że zamocowanie zostało dokładnie zasłonięte. Dzięki temu, że membrana pochylona jest od budynku nie ma obawy o szczelność połączenia. Jedyne na tynku widoczny jest ślad ukrytego zamocowania.

6.1.2. Podpory liniowe wiotkie

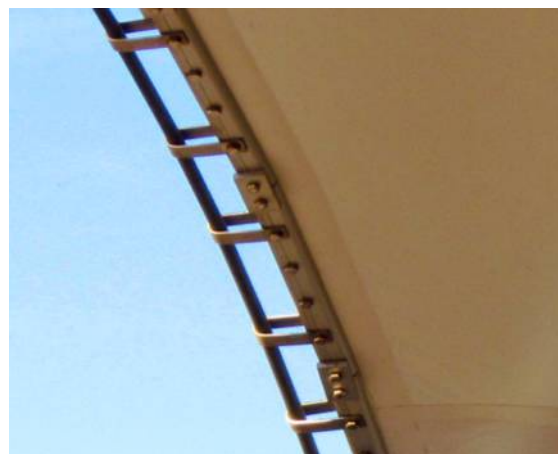
Cięgna brzegowe w formie stalowych lin są najprostszym i najczęściej stosowanym zamocowaniem membrany. Wiotkie cięgna pełnią rolę pośredniego elementu łączącego brzeg membrany z konstrukcją podporową. Pozwalają na ograniczenie liczby miejsc potrzebnych do zamocowania membrany. Zamiast stosować sztywne łuki lub belki wystarczy przygotować miejsce, w którym zamocowana jest lina.

W zależności od wielkości obciążeń i rodzaju materiału, z którego wykonana jest membrana, stosowane są różne rozwiązania. Jeśli obciążenie jest niewielkie i materiał membrany pozwala na mocne zagięcie bez obawy jego złamania lub przedarcia, to można stosować bezpośrednio wprowadzenie liny do tunelu brzegowego wykonanego z zawiniętej tkaniny. Wielkość tunelu powinna pozwolić na wsunięcie liny razem z jej zakończeniem, często dużo większym niż sama lina. Zbyt mała średnica liny może doprowadzić do przecięcia membrany. Natomiast celowe stosowanie większych średnic jest nieuzasadnione. Poza tym istotne jest, aby membrana nie przesuwała się po linie, bo może to spowodować jej przecięcie. Dlatego często w narożach stosowane są dodatkowe elementy zapewniające naprężenie wzdłuż cięgna brzegowego.



Il. 238. Zamocowanie membrany za pomocą cięgna brzegowego w Katowicach

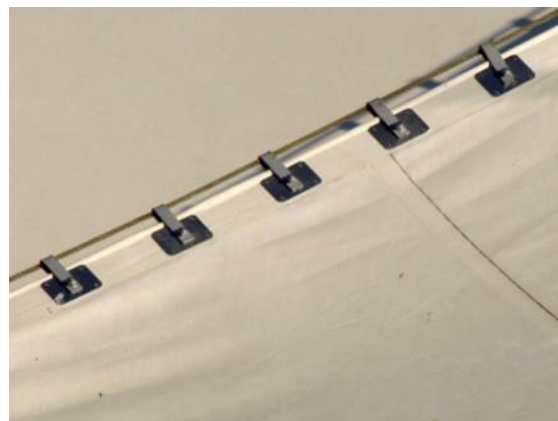
W pierwszym polskim zadaszeniu wykonanym z włókien szklanych pokrytych PTFE, w Katowicach, membranę z czterech boków zamocowano bezpośrednio do cięgien. Wzdłuż tych krawędzi zawinięto materiał, tworząc tunel, a następnie do środka wprowadzono cięgna brzegowe. Obecnie rozwiązanie takie budzi obawy, czy nie dojdzie do złamania lub przetarcia membrany na cienkiej linie, zwłaszcza, że membrana wykonana jest ze sztywniejszego



Il. 239. Cięgno brzegowe zadaszenia pętli autobusowej w Warszawie

materiału, którymi są włókna szklane. Mimo czasu, jaki upłynął od 2001 roku, materiał powłoki, a także elementy ją mocujące nie wykazują zużycia.

Bezpieczniejsze i obecnie częściej stosowane jest wzmocnienie wszystkich krawędzi przez keder, niezależnie od tego, do czego mocowana jest membrana. Przykładem jest zadaszenie pętli autobusowej w Warszawie. Wykorzystano takie zamocowanie zarówno w przypadku mocowania membrany do sztywnych dźwigarów, jak i do cięgna brzegowego. Linka keder jest ukryta wewnątrz wyłobienia w aluminiowych profilach. Do nich przykręcone są stalowe taśmy, które obejmują brzegowe cięgna. Poszczególne profile połączone są ze sobą, aby w miejscach styku nie dochodziło do złamania membrany.



Il. 240. Zamocowanie membrany w zadaszeniu w Mrągowie

Inne rozwiązanie zastosowane jest np. na stadionie w Poznaniu lub amfiteatrze w Mrągowie. Wzdłuż krawędzi brzegowej umieszczone są specjalne okucia przypominające klamry. Z obu stron membrany mocowane są prostokątne blachy, które łączone są za pomocą nitów. Znajdujący się na krawędzi keder nie pozwala na wyrwanie membrany. Do okuć tych mogą być mocowane obejmy, które łączą membranę ze sztywnymi elementami konstrukcji lub ciągnami brzegowymi. Wykonawca membrany nie musi różnicować okuć w zależności do czego jest mocowana membrana. Poza tym okucia te nie są połączone ze sobą i nie tworzą sztywnej krawędzi. Już w wytwórni można je połączyć z membraną. Membrana między okuciami może być zginana podczas transportu. Rozwiązanie takie może być stosowane dla membrany wykonanej z włókien poliestrowych pokrytych PCW.



Il. 241. Zamocowanie membrany w zadaszeniu w Kołobrzegu

W zadaszeniu w Kołobrzegu zamiast taśm łączących ciągnio brzegowe z okuciami zastosowano cienkie pręty. Na zdjęciu przedstawiono różnicę długości poszczególnych łączników.

Innym, nietypowym sposobem zamocowania membrany jest rozwiązanie, jakie zastosowano w zadaszeniu amfiteatru w Szczecinie. Zamiast zamkniętych obejm są specjalne haki, które

mogą się wyprostować i wypiąć przy zbyt dużych obciążeniach. Bardziej szczegółowe informacje na temat haków przedstawione są na il. 312, przy sposobach zabezpieczenia przed śniegiem. Należy zwrócić uwagę na brak



Il. 242. Zamocowanie paneli w Szczecinie

dotatkowego pasa materiału łączącego sąsiadujące bryty. Na zdjęciu widoczna jest wąska szczelina pomiędzy brytami. Ponieważ połączenie znajduje się wzdłuż krawędzi grzbietowej, więc nieuzasadnione okazały się obawy, że woda może przedostawać się pod zadaszenie. Zostało to potwierdzone przez wiele lat użytkowania. Poza tym brak szczelnego połączenia daje możliwość wymiany dowolnego z paneli, bez konieczności wymiany całej powłoki.



Il. 243. Ciągnio koszowe zadaszenia w centrum handlowym w Katowicach

Poza ciągami, które służą do zamocowania membrany wzdłuż krawędzi brzegowych w kilku obiektach występują ciąga służące do naprężenia wzdłuż krawędzi koszowej. Przytrzymują one membranę przy obciążeniach od wiatru, które próbują poderwać ją w górę. W dalszym opisie nazywane będą ciągami koszowymi. Najczęściej umieszczone są ponad membranę, czasami nawet są odsunięte od niej, co widać na zdjęciu zadaszenia z Katowic.



Il. 244. Ciągno koszowe na stadionie w Warszawie

Jednym z problemów przy projektowaniu tego typu cięgien jest ich zamocowanie. Aby zrównoważyć dużą siłę poziomą wynikającą z zamocowania cięgna koszowego oraz naciągu membrany, konieczne jest stosowanie odpowiednio ustawionych zastrzałów, rozpór albo odciągów. Kolejnym problemem jest połączenie cięgna koszowego z pozostałą częścią konstrukcji i jednocześnie umożliwienie zbierania wody. Ponieważ ciągno koszowe znajduje się wzdłuż dolnej krawędzi membrany, więc gromadzi się tam najwięcej wody i śniegu. Aby spływająca woda nie wylewała się poza zadaszenie, konieczne jest odpowiednie ukształtowanie elementów ograniczających wylewanie wody. Zatem niezbędne jest umiejętne połączenie mocno obciążonego elementu konstrukcji z wielkogabarytowymi elementami instalacji. Na il. 244 przedstawiony jest sposób za-



Il. 245. Ciągno koszowe zadaszenia przy pętli autobusowej w Warszawie

mocowania występujący w zadaszeniu stadionu miejskiego w Warszawie.

Duża powierzchnia membrany i mała krzywizna powodują, że materiał musi przenosić dużo większe obciążenia. Przykładem takiego obiektu jest zadaszenie pętli autobusowej w Warszawie. Proste dźwigary służą do zamocowania membrany, ale za to odpowiednią krzywiznę nadają jej cięgna koszowe. Na zdjęciu widać, że ciągno zostało dodatkowo pogrubione, znajduje się wewnątrz rury PCW, aby nie doprowadziło do przedarcia powłoki. Poza tym widać, że membrana w tym miejscu została dodatkowo wzmocniona przez zwiększenie grubości.

Innym rodzajem cięgna koszowego są cięgna promieniste na Stadionie Narodowym w War-



Il. 246. Zamocowanie łuków podtrzymujących membranę na Stadionie Narodowym w Warszawie

szawie. Znajdują się poniżej membrany. Poszczególne panele łączone są w miejscu tego ciągu. Wzdłuż linii łączącej poszczególne panele musi być zastosowane dodatkowy pas membrany pełniący rolę uszczelnienia krawędzi koszowej tak, aby spływająca woda nie przedostawała się pod zadaszenie. W tym przypadku raczej należy traktować takie ciągnie jako brzegowe dla siadających paneli. Na il. 246 widać, że do tego ciągu podwieszono są rurowe łuki, które nadają jej odpowiednią krzywiznę. Łuki zamocowano w pierwszej kolejności. Dopiero później na łukach rozłożono membranę, a następnie mocując – naprężano w obu kierunkach.

6.1.3. Podpory wewnętrzne

Niewiele jest przykładów na zamocowanie membrany w dodatkowych miejscach znajdujących się wewnątrz powłoki. W miejscach gdzie nie ma podziału na osobne panele, takie podparcie może przenosić jedynie niewielkie obciążenia, gdyż większa skupiona siła mogłaby rozerwać tkaninę.

Przykładem takiego punktowego podparcia membrany jest rozwiązanie zastosowane na stacjach paliwowych w Gdyni. Wewnętrzny układ kratownicy przestrzennej wzbogacony został dodatkowym trójnogiem zakończonym pionowym prętem, którym podparta jest mem



Il. 247. Podpora na stacji paliw w Gdyni – widok od dołu



Il. 248. Podpora punktowa na stacji paliw w Gdyni

brana. Aby nie doszło do przebicia lub rozerwania tkaniny, wykonano okrągłą końcówkę, zwiększając powierzchnię podparcia. Poza tym, membrana w tym miejscu jest wzmocniona przez zastosowanie podwójnej grubości. Od góry znajduje się dodatkowy element dociskowy, dzięki temu podczas podmuchów wiatru membrana nie może się przemieszczać. Membrana w tym miejscu jest wyraźnie wygięta, dlatego konieczne było odpowiednie ukształtowanie brytów. Wiąże się to z koniecznością umieszczenia szwu przechodzącego przez punkt podparcia.

Innym przykładem podparcia membrany wewnątrz powłoki jest rozwiązanie, które występuje w amfiteatrze w Mrągowie. Forma zadaszenia amfiteatru oparta jest na kilku łukach. Jeden z nich niejako przebija membranę i przechodzi na drugą stronę. Gdyby chodziło tylko



Il. 249. Podparcie membrany w Mrągowie

o przejście konstrukcji przez membranę bez jednoczesnego podparcia, powinno się zastosować dylatację przez wykonanie odpowiedniego otworu. Przykład taki jest przedstawiony w zadaszeniu na stadionie w Sulejówku (il. 269). W Mrągowie natomiast elementy konstrukcji stalowej przechodzą przez membranę, ale spełniają rolę dodatkowej podpory, mocującej membranę nad środkiem sceny. Wykonano to w następujący sposób. Konstrukcję podzielono na wysokości przewidywanego położenia membrany. Na zakończeniach elementów konstrukcji wprowadzono czołowe blachy, a membranę wzmocniono przez zwiększenie grubości. Przy obciążeniach od wiatru lub śniegu membrana ulega dużym przemieszczeniom, natomiast w tym miejscu jest wyraźnie ustabilizowana. Brak jest możliwości odkształcenia.



Il. 250. Zamocowanie membrany do cięgna w amfiteatrze w Szczecinie

Kolejnym przykładem punktowego podparcia membrany jest rozwiązanie zastosowane w amfiteatrze w Szczecinie. Naprężenie membrany uzyskane jest przez naciągnięcie jej układem cięgien, które znajdują się pod membraną. Aby możliwe było połączenie membrany ze stalową linką, wprowadzone zostały metalowe klamry. Tworzą rodzaj zacisku obejmującego dodatkową warstwę tkaniny. Membrana w tych miejscach wzmocniona jest

trzema taśmami, które przenoszą obciążenia na większą powierzchnię. Na końcach taśm zostały wprowadzone dodatkowe, metalowe łączniki, w celu wzmocnienia połączenia. Zostało to wykonane po częściowym uszkodzeniu zadaszenia, do którego doszło wiosną 2014 roku. Jak się okazało, obawa przed przeciążeniem spowodowanym zbyt dużą ilością śniegu była zawyżona. Większym problemem okazały się podmuchy wiatru podrywające całe zadaszenie.



Il. 251. Zamocowanie membrany do ruchomego wózka w amfiteatrze w Kielcach

Kolejnymi przykładami punktowego zamocowania membrany są rozwiązania zastosowane w ruchomych zadaszeniach Stadionu Narodowego w Warszawie i w amfiteatrze w Kielcach. Aby możliwe było zwijanie i rozwijanie membrany, konieczne jest elastyczne połączenie z ruchomymi wózkami poruszającymi się po linie nośnej. W Kielcach zastosowano składaną tuleję obejmującą cięgno nośne. Do niej, od dołu przymocowano taśmę, którą połączono z membraną. Taśmę umieszczono wzdłuż szwu łączącego poszczególne bryty membrany. Od góry do tulei przymocowano cieńszą linkę, która służy do poruszania skrajnymi wózkami. Ponieważ dach jest składany na zimę, więc obciążenia od śniegu nie są tak istotne jest podmuchy wiatru. Przy niebezpiecznym podrywaniu przez wiatr membrana dociskana jest



Il. 252. Pręt dociskowy w Sulejówku

do cięgien głównych, zatem połączenia punktowe nie przenoszą tych obciążeń.

Nieco innym rodzajem podpory wewnętrznej są pręty naprężające w Sulejówku. Membrana mocowana jest tradycyjnie, wzdłuż krawędzi brzegowych do sztywnej konstrukcji. Ponieważ elementy konstrukcji umieszczono w jednej płaszczyźnie stąd zamocowana do nich membrana jest płaska. Aby zapewnić jej minimalną krzywiznę, wprowadzono dodatkowe

pręty, które opierając się o membranę zwiększają jej naprężenie. W tym przypadku konstrukcję umieszczono ponad membranę, dlatego dociski liniowe działają od góry. Gdyby takie podparcie było od dołu, to przeciwdziałałoby obciążeniu. W tym przypadku ważniejsze było jednak uzyskanie gładkiej powierzchni od dołu, pozbawionej wszelkich elementów konstrukcyjnych. Natomiast uzyskanie odpowiedniego naprężenia jest potrzebne, aby membrana nie łopotała przy wietrze i nie uderzała o konstrukcję. Podobnie umieszczona membrana w zadaszeniu w Opolu (dolna powłoka) nie jest wyposażona w dodatkowe elementy naprężające. Konieczne tam było wyraźne zwiększenie naprężenia wstępnego, uzyskane go przez zamocowanie brzegowe. Naprężenie musiało być większe niż dla powłoki górnej, która obciążona jest śniegiem.

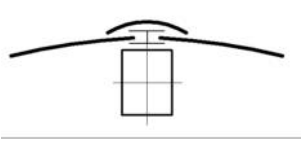
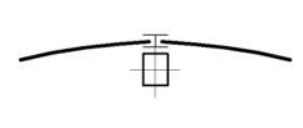
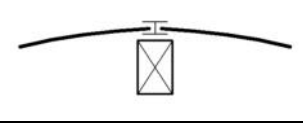
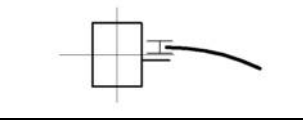
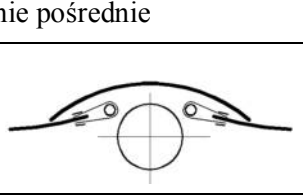
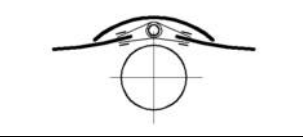
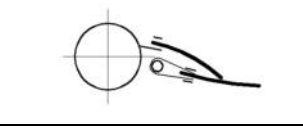
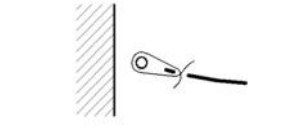
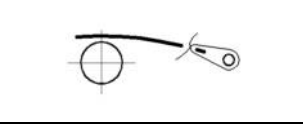
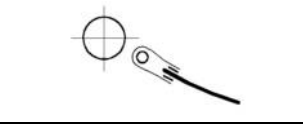
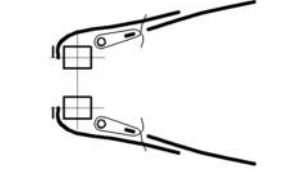
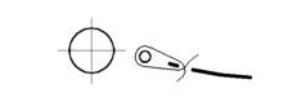
Na kolejnej stronie przedstawiona jest tabela, w której pogrupowane zostały charakterystyczne typy zamocowania membrany.

Tabela 10














Sposoby zamocowania membrany

Lp.	Sposób zamocowania	Schemat	Przykładowy obiekt
Podpora liniowa sztywna – zamocowanie bezpośrednie			
S1	łuk – profil okrągły, listwa dociskowa, keder		Katowice – bank Ustroń – amfiteatr Wisła – amfiteatr Wrocław – dworzec Włocławek – przystań
S2	pierścień – profil okrągły, listwa dociskowa, keder		Brenna – scena Węgierska Górka – scena Warszawa – Stadion Narodowy Katowice – centrum handlowe
S3	rygiel – profil prostokątny, listwa dociskowa, keder		Warszawa – Stadion Narodowy
S4	pierścień – profil prostokątny, listwa dociskowa, keder		Węgierska Górka - scena

cd. tabeli 10

S5	wygięty dźwigar wspornikowy – profil prostokątny, szyna, keder, fartuch		Puławy – stadion
S6	kratownica płaska – profil prostokątny, szyna, keder		Chojnice – stadion
S7	łuk z drewna klejonego – profil prostokątny, szyna, keder		Sopot- klub
S8	dźwigar wspornikowy – profil prostokątny, szyna, keder		Bytom – stadion
Podpora liniowa sztywna – zamocowanie pośrednie			
S9	przestrzenny dźwigar kratownicowy – profil okrągły, pręty mocujące, obejmy, zaciski, fartuch		Warszawa – pętla autobusowa, Warszawa – stadion miejski, Sopot – amfiteatr, antresola
S10	kratownica płaska – profil okrągły, pręt mocujący, obejmy, zaciski, fartuch		Gdynia – stadion
S11	łuk rurowy – profil okrągły, pręt mocujący, obejmy, zaciski, fartuch		Sopot – amfiteatr
S12	ściana budynku, pręt mocujący, linka, oczka		Rowy – scena
S13	łuk – profil okrągły, pręt mocujący, linka, oczka		Śliwice – amfiteatr
S14	łuk kratownicowy – profil okrągły, pręt mocujący, obejmy, okucia		Mrągowo – amfiteatr Stężycza – amfiteatr Poznań – stadion
S15	pierścień – profil prostokątny, pręt mocujący, linka, oczka, fartuch		Opole – amfiteatr
S16	pierścień – profil okrągły, pręt mocujący, linka, oczka		Poznań – centrum rekreacyjne

cd. tabeli 10

Podpora liniowa wiotka			
W1	ciągno brzegowe, obejmmy, zaciski		Warszawa – pętla autobusowa
W2	ciągno brzegowe, klamry, okucia		Mrągowo – amfiteatr
W3	ciągno brzegowe w tunelu		Zubrzyca – amfiteatr, Kielce – amfiteatr
W4	ciągno łączące panele, obejmmy, zaciski, fartuch		Kielce – amfiteatr
W5	ciągno łączące panele, elastyczne obejmmy, zaciski, fartuch		Płock – amfiteatr
W6	ciągno brzegowe, haki, okucia		Szczecin – amfiteatr
W7	ciągno wewnętrzne, grzbietowe		Częstochowa – stadion Warszawa Sowińskiego Warszawa Górczewska Łańcut – storczykarnia
W8	ciągno wewnętrzne, koszowe		Warszawa – pętla autobusowa Warszawa – stadion miejski
Podpora punktowa			
P1	sztynny słupek na kratownicy		Gdynia – stacje paliw
P2	ażurowy łuk niejako przechodzi przez powłokę		Mrągowo – amfiteatr
P2	naciąg cięgnem		Szczecin – amfiteatr
P3	pręt dociskowy		Sulejówek – stadion
P3	ruchomy wózek		Kielce – amfiteatr Warszawa – Stadion Narodowy

Źródło: opracowanie własne

6.1.4. Naprężanie membrany

Proces montażu poszczególnych części konstrukcji nie jest tak istotny dla architekta jak ich wygląd. Trzeba pamiętać, że w przypadku zadaszeń membranowych detale elementów podporowych są bardzo widoczne. Sposoby zamocowania membrany z podziałem na rodzaje podpór zostały przedstawione we wcześniejszym rozdziale, natomiast konieczność wprowadzania naprężenia wstępnego uzasadniona została w rozdziale 2.4. Naprężanie membrany może być uzyskane podczas montażu lub po czasie, gdy materiał ulegnie wydłużeniu.

Połączenie do sztywnych elementów podporowych nie daje możliwości regulowania położenia membrany. Dlatego, jeśli elementy te są wykorzystywane do naprężania, to muszą przemieszczać się wraz z membraną. Przykładem może być zadaszenie w Ustroniu. Dla naprężenia membrany nad widownią konieczne jest pochylenie całego łuku znajdującego się pomiędzy widownią a sceną.

W analizowanych obiektach regulowanie naprężenia jest uzyskiwane przez:

- zmianę długości obejm służących do połączenia krawędzi membrany z elementami konstrukcji (S3-S5),
- zmianę naciągu linki mocującej membranę z elementami konstrukcji (W1-W3),
- zmianę położenia końca membrany na ciągnie brzegowym za pomocą śruby rzymskiej lub zacisku,
- zmianę długości ciągnia brzegowego za pomocą śruby rzymskiej,
- zmianę długości ciągnia brzegowego za pomocą nakrętki opartej o płytę narożną,
- zmianę długości odciągu (śruba rzymska lub regulowane zakotwienie),
- wypchnięcie membrany przez dodatkowe podpory punktowe lub liniowe,

- zmianę położenia elementów podporowych, np. pochylenia łuku, słupa; najczęściej wiąże się to ze zmianą długości odciągu,
- zmianę położenia pierścienia mocującego,
- zmianę wysokości słupa lub długości zastrzału.

Do naprężania membrany najczęściej wykorzystywane są ciągnia. Skracanie długości wygiętego ciągnia brzegowego powoduje naprężanie membrany nie tylko w pobliżu jej narożników, ale też w środkowej części. Im większe wygięcie, tym bardziej środkowa część jest naprężona. Przeciwnie, jeśli krawędzie nie są wygięte, to środkowa część membrany nie jest wystarczająco naprężona; stąd charakterystyczne wygięcie krawędzi powłoki, dlatego między innymi nie można właściwie naprężyć prostokątnej plandeki.



Il. 253. Zamocowanie membrany do płyty węzłowej w Katowicach

Zamocowania ciągnien są tak projektowane, aby można było regulować długość ciągnia lub położenie elementów mocujących. Na il. 253 przedstawione jest zastosowanie śrub rzymskich, które dają możliwość zmniejszenia odległości pomiędzy mocowanymi elementami. Płyta węzłowa, która łączy ciągnio główne, przymocowana jest do budynku za pomocą śruby rzymskiej (u góry zdjęcia). Śruba ta ukryta jest w tulei z wewnętrznymi przeciw-

nymi gwintami. Podobne, mniejsze śruby rzymskie dają możliwość naciągnięcia membrany wzdłuż krawędzi brzegowych. Nie ma wtedy obawy o przesuwanie membrany wzdłuż cięgien, co groziłoby przedarciem materiału.



Il. 254. Zamocowanie membrany w Częstochowie

Podobne rzymskie śruby zastosowane są w zadaszeniu w Częstochowie. Służą one przede wszystkim do naprężania membrany wzdłuż cięgien brzegowych. Na zdjęciu przedstawione są dodatkowe zaciski, które stabilizują położenie krawędzi membrany względem cięgna brzegowego.



Il. 255. Zamocowanie membrany w zadaszeniu stadionu w Gdyni

Inny sposób zwiększenia naprężenia membrany wzdłuż głównych dźwigarów to zamocowanie membrany do płyty narożnej i zmiana

długości samego cięgna brzegowego. Jest to uzyskiwane dzięki zakończeniu cięgna brzegowego za pomocą nagwintowanego pręta. Nakrętka opierająca się o płytę narożną pozwala na zmniejszenie długości cięgna i zwiększenie naprężenia. Jest to widoczne w narożach membran na stadionie w Gdyni.

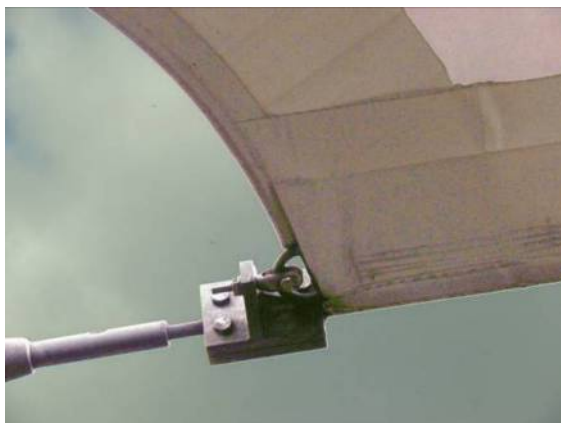


Il. 256. Dwa sposoby zamocowania membrany w zadaszeniu amfiteatru w Ustronie

W zadaszeniu w Ustronie widoczne są dwa sposoby zamocowania cięgna brzegowego. W starszej części, cięgna zamocowane są za pomocą połączenia sworzniowego z zakończeniem widełkowym. W nowszej części zastosowane jest zakończenie cięgna z gwintowanym prętem pozwalającym na regulację długości.



Il. 257. Górne zamocowanie membrany w Łańcut



Il. 258. Dolne zamocowanie membrany w Łańcucie

Innym sposobem naprężenia membrany wzdłuż cięgna jest stosowanie zacisku. Jest to bardzo proste rozwiązanie, ale wymaga zewnętrznych urządzeń służących do naciągnięcia membrany. Umieszczona w odpowiednim miejscu i właściwie naprężona membrana niejako przykręcana jest do linek, które ją przytrzymują.



Il. 259. Zacisk na cięgnie zadaszenia w Warszawie

W przypadku starszego zadaszenia w Warszawie zacisk połączony jest z dodatkową śrubą, pozwalającą na regulowanie naprężenia. Może to rozwiązanie jest wygodne w użyciu, ale za to bardziej złożone i mniej atrakcyjne.

Minimalizacja i upraszczanie elementów łączących niekoniecznie wiążą się z wielkością zadaszenia. W jednym z największych zadaszeń, w Operze Leśnej w Sopocie, nie ma śrub



Il. 260. Zaciski na cięgnoch w Sopocie

rzymskich do naprężania membrany wzdłuż cięgien brzegowych. Zastosowane są jedynie zaciski i to prawie niewidoczne.

Powyższe zdjęcie przedstawia połączenie kilku cięgien do głowicy słupa. Aby połączenie nie było zbyt skomplikowane, cięgna zostały pozbawione śrub pozwalających na regulację ich długości. W tym przypadku regulowanie naprężenia odbywa się przez zmianę położenia słupa. Słup oparty jest przegubowo o fundament, więc ma możliwość zmiany pochylenia. Siły poziome za to przenoszone są przez odciąg. Na kolejnym zdjęciu przedstawiona jest możliwość zmiany jego długości przez przygotowane do tego celu połączenie.

Innym sposobem na regulowanie naprężenia membrany jest możliwość wydłużenia słupa. W Częstochowie zadaszenie jest umieszczone



Il. 261. Regulowana długość odciągu w Sopocie



Il. 262. Możliwość wydłużenia słupa w Częstochowie

na słupach i naciąg membrany jest równoważony przez układ przestrzennej kratownicy z zastrzałami i rozporami. Brak odciągów i śrub na głównych cięgnach zrekompensovany został regulowaną długością słupa. Na górnym końcu słupa znajdują się dodatkowe śruby, które dają możliwość precyzyjnego naprężenia membrany. Wszystkie główne cięgna, jak to już zostało wspomniane, mają stałą długość.



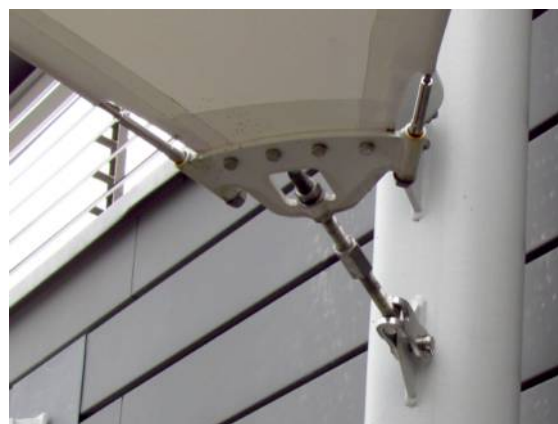
Il. 263. Zamocowanie membrany w Częstochowie

Na podobnej zasadzie działa naprężanie membrany w zadaszeniu w Sopocie. W głowicy słupa znajduje się pierścień, do którego podwieszane są kolejne pierścienie. Cztery śruby pozwalają na podniesienie dolnego pierścienia. Dzięki temu zostaje naprężona membrana, która jest przymocowana do dolnego pierścienia.



Il. 264. Zamocowanie pierścienia w Sopocie

Wykorzystanie regulowanych elementów mocujących pozwala też na eliminowanie fałd, które mogą wynikać z nieprecyzyjnego określenia kształtu lub wykonania. Należy tu podkreślić, że przedstawione powyżej zamocowanie ma możliwość zmiany położenia we wszystkich płaszczyznach. Dzięki temu membrana ma możliwość dopasowywania się do obciążeń. Zbyt sztywne zamocowanie powodują najczęściej nierównomierną pracę włókien w membranie, a to wizualnie skutkuje pojawieniem się fałd na powłoce. O kunszcie danego wykonawcy świadczą jakość i estetyka rozwiązania. Niestety zbyt uproszczone rozwiązania mogą prowadzić do szybszego zużycia membrany, rozerwania połączeń lub przedarcia na krawędziach.



Il. 265. Zamocowanie naroża membrany w Bydgoszczy



Il. 266. Przykład uproszczonego zamocowania membrany

6.1.5. Otwory w membranie

Membrana dobrze przenosi obciążenia i zachowuje swój kształt pod warunkiem właściwego zamocowania wzdłuż wszystkich krawędzi. Dodatkowe otwory, znajdujące się wewnątrz powłoki, mogą ją mocno osłabiać. Brak ciągłości powoduje lokalne zwiększenie naprężeń i może doprowadzić do rozerwania materiału. Wszystkie otwory powinny mieć odpowiednie wzmocnienia. Najczęściej są to pierścienie, które służą np. do zamocowania rzygaczy odprowadzających wodę z zadaszenia. Ciekawym przykładem są otwory, które zostały wykonane w membranie zadaszenia pętli autobusowej w Warszawie. Wynikają z wcześniejszych koncepcji, w której początkowo przez membranę miały przechodzić cięgna



Il. 267. Otwór w membranie pętli autobusowej w Warszawie

napinające. Cięgna te ostatecznie leżą na wzmocnionej powłoce. Mimo to sam otwór nie został zaślepiony i pełni funkcję ochronną. Chroni membranę przed ocieraniem się stalowej płyty węzłowej, która łączy cięgna. Mogłoby to doprowadzić do przetarcia powłoki. Otwór ma pierścień, który zabezpiecza membranę przed rozdarcie. Dodatkowo zastosowano kołnierz oraz osłonę od góry, aby podczas opadów nie przelewała się woda deszczowa.

Innym rodzajem otworów w membranie, o nieco większej średnicy, są wejścia na zadaszenie. Otwory takie zostały wykonane na obu stadionach w Warszawie, znajdują się bezpośrednio nad drabiną pozwalającą na wspięcie się na odpowiednią wysokość. Zamknięte są swego rodzaju pokrywą, aby woda nie dostała się do środka. Membrana wzdłuż krawędzi otworu podobnie wzmocniona jest stalowym pierścieniem.



Il. 268. Właz na zadaszenie Stadionu Narodowego w Warszawie

Otwory w membranie wykorzystywane są jako dylatacje pomiędzy membraną a innymi elementami konstrukcji lub instalacji, z którymi nie współpracuje, do których nie jest zamocowana. Jeśli membrana opierałaby się o sztywne elementy, a pod wpływem zmiennych obciążeń ulegałaby dużym przemieszczeniom, to w miejscu kontaktu mogłoby dojść do jej

zniszczenia. W takich miejscach celowo wprowadzane są większe otwory, aby nie doszło do tego kontaktu.

Przykładem takiego otworu jest rozwiązanie występujące w zadaszeniu stadionu w Sulejówku. Układ konstrukcyjny został tak zaprojektowany, że kilka cięgien przechodzi na drugą stronę naprężonej membrany. Otwory te znajdują się w tylnej części zadaszenia poza widownią, dlatego można było pozostawić je bez uszczelnienia. Większym problemem okazał się montaż zadaszenia. Teoretycznie cięgno można przelożyć przez otwór, zwłaszcza, że w jego pobliżu znajduje się śruba. Niestety cięgno było wcześniej zamontowane i podtrzymuje główną konstrukcję zadaszenia. Próba rozebrania cięgna wiązałaby się z koniecznością stawiania dodatkowej konstrukcji podporowej. Przyjęto inne rozwiązanie. Nacięto membranę do otworu, a następnie ponownie połączono.



Il. 269. Otwór w membranie w Sulejówku

Innym rozwiązaniem podobnego problemu jest przejście zastrzałów przez zadaszenie Stadionu Narodowego w Warszawie. Zewnętrzny ściśkany pierścień znajduje się pod zadaszeniem membranowym. Od tego pierścienia, ponad słupami, wystają ukośne zastrzały. Złożony kształt połączenia przegubowego utrudnił bezpośrednie połączenie membrany do zastrzału. Wybrano rozwiązanie polegające na odsunię-

ciu tych elementów od siebie. Wprowadzono dodatkowy kołnierz wokół otworu, a sam otwór zasłonięto dodatkowym fartuchem z membrany. W tym przypadku jest to prawie niewidoczne i wyjątkowo precyzyjnie zrobione. Autor nie chce w tym miejscu przedstawiać jak wyglądają tego typu osłony. Najczęściej wyraźnie różnią się od pozostałej części naprężonej membrany. Trudne jest precyzyjne wykonanie takiego połączenia, zwłaszcza, że zwykle jest to robione na miejscu na dużej wysokości. Poza tym pomarszczona tkanina nie wygląda estetycznie.



Il. 270. Zasłonięty otwór w Warszawie

Dużym błędem jest wykonanie konstrukcji bez przygotowanych elementów łączących. Membrana wymaga dodatkowych elementów nie tylko niezbędnych do połączenia, ale też elementów potrzebnych do samego montażu. Ponieważ wytrzymałość samej tkaniny jest zdecydowanie mniejsza niż pozostałych materiałów konstrukcyjnych, więc potrzebne są elementy pośrednie, zwiększające długość zamocowania. Innym sposobem jest wprowadzenie bardzo dużej liczby, gęsto położonych małych elementów łączących.

Niezależnie od tego istotne są sposób uzyskania naprężenia wstępnego oraz sposób jego regulowania. Membrana ulega relaksacji, czyli wydłużeniu spowodowanym długotrwałym działaniem obciążeń. Na początku, zwykle po

pierwszym roku, konieczna jest korekta naprężenia. Jeśli zamocowanie uniemożliwia taką regulację naprężenia, to może powodować powstawanie fałd.

Zadaszenie w Opolu – górna powłoka, napięta na ruszcie, przy obciążeniu śniegiem naturalnie jest obciążona od góry. Gorzej z dolną, mimo że nie była obciążona ani śniegiem, ani wodą, trzeba ją było napiąć mocniej niż górną, aby miała właściwy kształt i aby nie obwisła, bo jest bardziej widoczna.

Tkanina mocowana jest do elementów sztywnych lub wiotkich, jak liny. W przypadku lin łatwiej uzyskać właściwe, równomierne naprężenie membrany. Wprowadzanie podpór sztywnych zabezpiecza membranę przed przemieszczaniem podczas zmieniających się obciążeń oraz podczas montażu. Łatwiej wtedy określić położenie poszczególnych paneli. Od elementów sztywnych przeważnie rozpoczyna się montaż membrany, a dopiero przez napięcie elementów wiotkich uzyskuje się naprężenie wstępne. Dużo trudniej to uzyskać stosując same elementy sztywne, np. ramy, łuki, pierścienie, belki.

Architekt powinien mieć wpływ na dobór elementów i detali połączeń, ponieważ ich wygląd wpływa na ogólny odbiór estetyczny. Przeskalowanie poszczególnych części, ich niewłaściwy wybór może zepsuć ogólny efekt. Zamiast lekkiej konstrukcji powstaje pofałdowana forma z ciężkimi, niemal topornymi mocowaniami.

6.2. Sposoby odprowadzania wody

Membrana ze względu na to, że ma wygiętą powierzchnię oraz krzywoliniowe brzegi wymaga innych sposobów odprowadzania wody deszczowej niż tradycyjne dachy. Poza tym wykonana jest z materiału wiotkiego i pod wpływem obciążeń ulega dużym przemiesz-

zeniami, dlatego nie powinna być łączona ze sztywnymi elementami instalacji.

Aby przeanalizować sposoby odprowadzania wody, na wstępie trzeba dokonać podziału elementów zadaszenia, które służą do:

- kierowania, czyli zmiany kierunku spływania wody po powierzchni membrany,
- odprowadzania wody poza membranę,
- zbierania spadającej wody do instalacji,
- transportowania wody poza zadaszenie.

Wielkość i miejsce, gdzie znajduje się dane zadaszenie decydują o zastosowanym rozwiązaniu. Najprostszym sposobem jest brak jakichkolwiek elementów. Woda w takim przypadku spływa po powierzchni membrany i bez ograniczeń wylewa się poza krawędź brzegową tak, jak to się dzieje w typowym parasolu. Jeżeli kształt i wielkość danego zadaszenia są odpowiednio dobrane do zagospodarowania pod zadaszeniem, to nie ma konfliktu z wylewającą się wodą. Gorzej, kiedy pod spodem znajduje się przejście dla ludzi lub inne elementy zagospodarowania. Zadaszenia membranowe mogą być dowolnie formowane i woda nie musi koniecznie spływać wzdłuż wszystkich krawędzi. Wystarczy zaprojektować membranę tak, aby woda spływała w konkretnych wyznaczonych miejscach. Po raz kolejny potwierdza to, że podstawowym problemem jest dobór właściwej formy.

Jednym z wielu podobnych przykładów jest zadaszenie przed centrum handlowym w Katowicach (il. 243). Wzdłuż krawędzi brzegowych brak jest elementów ograniczających lub zbierających wodę do instalacji, dlatego woda spływa dokładnie wzdłuż wszystkich krawędzi. Stożkowa forma powoduje, że woda spływa równomiernie we wszystkich kierunkach. Natomiast w miejscu połączenia form stożkowych, wzdłuż linii koszarowej zwiększa się ilość spływającej wody podczas opadów, a na posadce w tym miejscu są bardziej wypłukane

spoiny. Zadaszenie nie jest zbyt duże, a przestrzeń pod spodem jest otwarta. Nie ma też potrzeby zatrzymywania, więc można ominąć spadającą wodę.

Gorzej jest w przypadku zadaszenia na stadionie w Częstochowie. Ukształtowane jest podobnie, ale powstało jakby z połączenia trzech form stożkowych. Znajduje się nad budynkiem sędziowskim i wystaje ponad sektor VIP. Niestety kończy się w połowie widowni, a pozbawione jest jakichkolwiek elementów ograniczających spływanie wody deszczowej. Przy przeważających południowo-zachodnich wiatrach zadaszenie najprawdopodobniej chroni większą część widowni, niż to wynika z planu. Natomiast miejsca, gdzie spływa strumień wody najprawdopodobniej szybko są puste.



Il. 271. Zakończenie zadaszenia w Częstochowie

Poza właściwym ukształtowaniem można stosować dodatkowe elementy, które ograniczają lub zmieniają kierunek spływania wody po membranie. Najlepiej, kiedy wykonane są z tego samego materiału, co membrana. Mogą to być dodatkowe fałdy, które umieszczone są w pobliżu krawędzi brzegowych. Aby były skuteczne, muszą mieć odpowiednią wysokość. Otrzymuje się to przez wypełnienie elastycznym materiałem, np. pianką lub rurą PCW. Takie dodatkowe elementy przymocowane do membrany nazywane są bortnicami. W niektórych zadaszeniach, jako wypełnienie

zostały zastosowane perforowane rury. Od strony napływającej wody, w dolnej części bortnicy wykonane zostały otwory, przez które przedostaje się woda z powłoki do wnętrza rury. Dzięki temu woda może spływać wzdłuż rury aż do kielichów połączonych z rurą spustową.



Il. 272. Bortnice w amfiteatrze w Ustroniu

Jednym z pierwszych obiektów, w którym zastosowano dodatkowe elementy służące do ograniczenia spływania wody po powierzchni membrany był amfiteatr w Ustroniu. Wzdłuż krawędzi brzegowych umieszczone zostały niewysokie bortnice. Przy delikatnych opadach woda spływa w kierunku krawędzi brzegowej, a następnie wzdłuż bortnicy do stalowego kielicha przymocowanego do membrany. Poniżej kielicha znajduje się otwór, rodzaj krótkiego rzygacza, przez który wylewa się woda. Przy bardzo intensywnym deszczu ilość wody jest tak duża, że potrafi przelewać się górą.

Kolejnym przykładem zastosowania bortnic jest stadion w Poznaniu. Duża powierzchnia poszczególnych paneli przy intensywnych opadach deszczu mogłaby powodować wylewanie wody na tylne części trybun. Przy dolnej krawędzi membrany przewidziano bortnice o stosunkowo dużej średnicy. Do górnej powierzchni membrany przymocowano dodatkowy pas materiału, który zawinięto wokół perforowanej rury melioracyjnej. Od strony



Il. 273. Bortnice na stadionie w Poznaniu

spływającej wody wykonano otwory, które pozwalają na przedostawanie się wody do wnętrza rury. Bortnice przedłużone są w formie rękawów i wchodzi bezpośrednio do stalowych kielichów. Dzięki temu woda nie wylewa się bokami. Dalej woda odprowadzana jest systemem podciśnieniowych rur spustowych.

W zadaszeniu w Wiśle znajdują się bortnice o bardzo małej wysokości. W dolnej części membrany przygotowany został otwór, najprawdopodobniej na rzygacz, ale nie został wykonany. Przygotowany otwór został zaślepiiony stalowymi blachami. Poniżej znajduje się rynna, do której spływa woda, a w narożniku membrany wykonano dodatkowy, metalowy kołnierz, który ogranicza wylewanie wody. Niewielka bortnica służy w tym przypadku do zmiany kierunku spływającej wody.



Il. 274. Bortnice w amfiteatrze w Wiśle



Il. 275. Zaślepiiony otwór i narożny kołnierz w amfiteatrze w Wiśle

Bortnice zastosowano również na stadionie miejskim w Warszawie. Umieszczone są wzdłuż zewnętrznej krawędzi zadaszenia, do których spływa woda. Wewnętrzna krawędź membrany jest wyżej, a wzdłuż niej znajduje się pas zadaszenia wykonany z poliwęglanów. Bortnice umieszczono na całej długości krawędzi zewnętrznej, mimo że woda spływa przede wszystkim w kierunku kielicha zbierającego. U góry płynie raczej wzdłuż krawędzi, co jest przedstawione na stronie 261.



Il. 276. Bortnice na stadionie miejskim w Warszawie

Najbardziej uzasadnione jest stosowanie bortnic na zakończeniach powłoki, znajdujących się nad obszarem, w którym przebywają ludzie. Zadaszenie nad peronami we Wrocławiu kończy się w połowie ostatniego peronu, dla



Il. 277. Bortnice na dworcu we Wrocławiu

tego bardzo ważne było umieszczenie tam bortnic. Jest to przykład użycia najwyższych bortnic, jakie zostały zastosowane w analizowanych obiektach. Umieszczone są wzdłuż wygiętej krawędzi dolnej oraz częściowo wzdłuż krawędzi bocznych. Pozostawiona niewielka przerwa pozwala na spływanie wody do kielicha.



Il. 278. Bortnice na stadionie w Puławach

Na stadionie w Puławach wykonano bortnice wzdłuż dolnej krawędzi membrany. Położone są prawie poziomo. Niewielkie wygięcie krawędzi brzegowych miało powodować spływanie do wykonanych w narożach stalowych kielichów. Niestety niewielka wysokość samych bortnic oraz duża ilość spływającej po powłoce wody powodowały, że podczas opadów woda przelewała się górą. Jeszcze więk-

szym problemem był zsuwający się śnieg, który uszkadzał zamocowane bortnice. Ostatecznie wprowadzono nowe bortnice, większe, położone wyżej i pod innym kątem. Dzięki temu spływająca woda wcześniej kierowana jest do narożnych kielichów.



Il. 279. Zamocowanie dolnej krawędzi membrany w zadaszeniu amfiteatru w Brennej

Rolę elementów ograniczających spływanie wody z krawędzi zadaszenia może pełnić np. pierścień, do którego przymocowana jest membrana. Takie zabezpieczenie zastosowano w Brennej. Duża średnica rury, z której wykonany jest zewnętrzny pierścień skutecznie zatrzymuje wodę, a nawet śnieg.

Zadaszenie membranowe przez swoją formę powoduje, że woda może bardzo szybko przemieszczać się po powierzchni. W niektórych przypadkach powstała konieczność ogranicze-



Il. 280. Kołnierz na membranie w klubie w Sopocie

nia prędkości przez stosowanie dodatkowych buforów. Przykładem może być rodzaj kołnierza, który zastosowano w klubie w Sopocie. Do płyty narożnej przymocowano dodatkowy element wykonany z pasów blachy. Dzięki temu woda spływa w narożniku, a nie wylewa się daleko poza zadaszenie.



Il. 281. Bufor nad rynną w amfiteatrze w Płocku

Forma zadaszenia amfiteatru w Płocku powoduje, że woda deszczowa w większości spływa w dwa najniższe położone miejsca. Ponieważ woda w tym miejscu osiąga dużą prędkość, więc konieczne było wprowadzenie dodatkowych buforów zatrzymujących jej strumień. Nie są one przymocowane bezpośrednio do membrany, ale do elementu mocującego cięgna dachowe. Gdyby tych buforów nie było, to woda z dużą prędkością przelewałaby się ponad rynną.



Il. 282. Rzygacz w Ustroniu

Poza elementami służącymi do zmiany kierunku lub zatrzymania przepływającej wody opadowej po powłoce membrany wprowadzane są elementy służące do wylania wody poza membranę. Często są to dowolnie ukształtowane rzygacze. Na il. 282 przedstawiony jest rzygacz w formie krótkiej rury będącej częścią blachy narożnej. Rozwiązanie takie zastosowano między innymi w amfiteatrze w Ustroniu.



Il. 283. Rzygacz z łańcuchami w Brennej

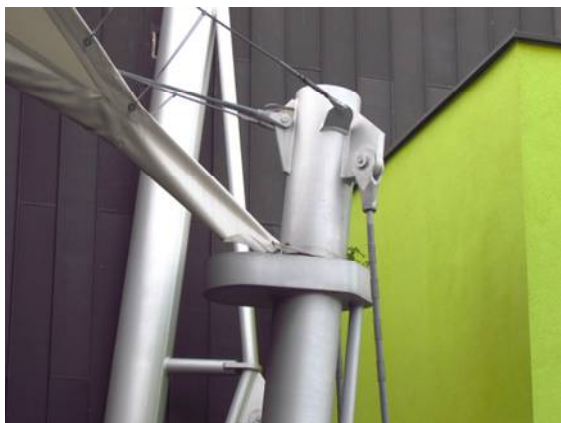
Ponieważ zadaszenie w Brennej zakończone jest na stosunkowo dużej wysokości, a w pobliżu przebywają ludzie, więc przymocowano do niego łańcuchy, które ograniczają rozlewanie wody.

Bardziej uproszczonym rozwiązaniem jest stosowanie rękawa wykonanego z tego samego materiału, co membrana. Rozwiązanie takie



Il. 284. Rzygacz w Zubrzycy Górnej

przyjęto np. w zadaszeniu w Zubrzycy Górnej. W dolnej części krawędzi brzegowych zastosowane są bortnice, a do nich przymocowany jest niewielki rzygacz. Woda spływając przy bortnicy dostaje się do rękawa, a stamtąd wydostaje się poza zadaszenie.



Il. 285. Rękaw łączący membranę z kielichem w Kołobrzegu

Podobne rozwiązanie zastosowano w Kołobrzegu. W tym przypadku rękaw wykonano z membrany, zbiera on wodę i przelewa ją do stalowego kielicha umieszczonego bezpośrednio pod nim. Rękaw w tym przypadku pełni rolę elementu łączącego część ruchomą z częścią nieruchomą zadaszenia, czyli membranę z instalacją.

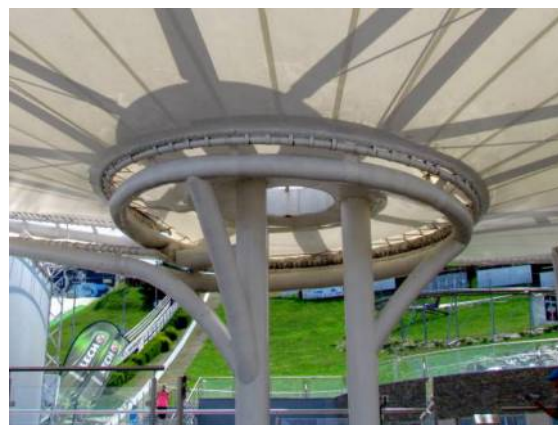
W amfiteatrze w Kielcach zamiast rękawów zastosowano fartuch, który łączy główną



Il. 286. Fartuch łączący membranę z rynną w Kielcach

membranę ruchomego dachu z rynną umieszczoną w portalu scenicznym.

W centrum rekreacyjnym w Poznaniu zadaszenia mają nietypową, spiralną formę. Aby woda podczas opadów nie spadała na przebywających pod zadaszeniem ludzi zastosowano specyficzny system, który ją odprowadza. Zainstalowano stałą rurę spustową. W okresie letnim wprowadzany jest dodatkowy fartuch łączący membranę z rurą, a w okresie zimowym jest on zdejmowany, aby ułatwić usuwanie śniegu. Dla porównania na il. 318 przedstawiono zadaszenie w okresie zimowym, ze zdjętym fartuchem.



Il. 287. Fartuch łączący membranę z rurą spustową w Poznaniu

Kolejnym elementem służącym do odprowadzania wody deszczowej są różnego rodzaju kielichy lub rynny zbierające wodę do instalacji. Ponieważ instalacja jest najczęściej sztywno połączona z konstrukcją zadaszenia, a membrana mocno się przemieszcza, więc najprostszym rozwiązaniem jest oddzielenie tych elementów od siebie. Konieczne wtedy są elementy o dużych wymiarach, aby skutecznie zbierać lejącą się wodę.

Jednym z przykładów takiego kielicha jest rozwiązanie występujące na stadionie miejskim w Warszawie. W najniższych miejscach zadaszenia znajdują się ciągną napinające powłokę. W tych miejscach podczas opadów leje



Il. 288. Kielich na stadionie w Warszawie

się woda, dlatego umieszczone tam zostały specjalne kielichy. Nietypowy kształt spowodowany jest tym, że przez kielich przechodzi cięgną. Bortnice przymocowane do powierzchni membrany dodatkowo kierują wodę w pobliże kielicha.



Il. 289. Kielich zadaszenia pętli autobusowej w Warszawie

Zadaszenie pętli autobusowej w Warszawie jest podobnie ukształtowane jak stadion. Woda deszczowa zbierana jest w pięciu punktach, co daje powierzchnię zlewni 680 m². Woda spływa w kierunku linii koszowej, która leży na powłoce. Następnie przemieszcza się wzdłuż tej linii i spada do kielicha umieszczonego poniżej membrany. Stalowy kielich o szerokości 50 cm zamocowany jest do słupa poniżej zastrzałów. Dalej woda odprowadzana jest rurą spustową do kanalizacji deszczowej. Niewiel-

ka wysokość zadaszenia, mała odległość od miejsc oczekiwania podróżnych budziły obawy, czy spadająca woda nie będzie oblewać pasażerów. Okazało się, że duża prędkość pozioma płynącej wody powoduje, że wylewa się poza zadaszenie. Spowodowało to między innymi rezygnację z wcześniej przewidzianych bortnic.



Il. 290. Kielich zadaszenia na dworcu we Wrocławiu

Na dworcu kolejowym we Wrocławiu również zastosowano kielichy do zbierania spływającej wody deszczowej. Umieszczono je wzdłuż dolnej krawędzi membrany, mają prostą formę i wydłużony kształt. Dzięki takiemu rozwiązaniu spadająca z różną prędkością woda trafia zawsze do wnętrza kielicha. Zbliżone rozwiązanie zastosowano w amfiteatrze w Kielcach.



Il. 291. Kielich zadaszenia amfiteatru w Kielcach

Podobną rolę pełnią rynny zastosowane w amfiteatrze w Wiśle. Mają one tradycyjny kształt, ale nie są przymocowane wzdłuż krawędzi membrany tylko wzdłuż podtrzymujących ją łuków. Dzięki takiemu rozwiązaniu woda przy niewielkich opadach wpada na początku rynny. Natomiast przy intensywnych opadach spływa z dużą prędkością i wpada do rynny na drugim jej końcu.



Il. 292. Rynna w Wiśle

W zadaszeniu membranowym amfiteatru w Szczecinie zamiast kielichów zastosowano dodatkowe daszki z blachy trapezowej. Daszki te nie tylko zbierają wodę, ale też chronią scenę przed pryskaniem. Woda rozprężona jest do bardzo dużej prędkości, ponieważ spływa na długości ponad 50 m po pochyleniu 14°. Woda z membrany wylewa się na daszki i dalej



Il. 293. Stalowe osłony w amfiteatrze w Szczecinie

spływa do rynny znajdującej się po drugiej stronie żelbetowych słupów. Rynna została zaprojektowana w formie przymkniętego koryta. Takie rozwiązanie spowalnia prędkość strumienia wody, zapobiega wylewaniu i tworzeniu intensywnych wodospadów i częściowo tłumi hałas.



Il. 294. Kielich na stadionie w Bytomiu

Na stadionie w Bytomiu zastosowano rozwiązanie zbliżone do rozwiązania z Poznania. W kielichach zbierających wodę kończą się perforowane rury, będące wypełnieniem borbaczki. Dodatkowo membrana jest przedłużona i tworzy rodzaj rękawa, łączącego powłokę z kielichem.

Zbliżoną zasadę działania systemu zrealizowano na stadionie w Chojnicach. Najnowsze rozwiązanie opiera się już na bezpośrednim połączeniu membrany z elastyczną, szczelną



Il. 295. Elastyczne rury spustowe w Chojnicach

rurą. Stalowy pierścień przymocowany do membrany połączono z instalacją bez jakiegośkolwiek kielicha. Niewielka bortnica dodatkowo ogranicza możliwość wylewania wody wzdłuż krawędzi membrany.

Innym rodzajem kielicha jest rozwiązanie występujące na stadionie w Gdyni. W narożach paneli membrany, w dolnych miejscach zamocowania do dźwigarów zostały zaprojektowane specjalne elementy łączące, z dodatkowymi osłonami ograniczającymi wylewanie wody poza zadaszenie. Stanowią rodzaj leżących na membranie kielichów spustowych. Do każdego takiego kielicha przymocowana jest stała rura spustowa.



Il. 296. Kielich spustowy leżący na membranie stadionu w Gdyni

Podobnie zostało rozwiązane odprowadzenie wody na Stadionie Narodowym w Warszawie. Kielichy zbierające wodę połączone są bezpośrednio z membraną. Powłoka w tym miejscu połączona jest z zewnętrznym ściskanym pierścieniem i nie ma obawy, że będzie ulegać dużym przemieszczeniom. Do kielichów połączone są sztywne rury spustowe. Wykorzystanie kielichów pozwala na zastosowanie podciśnieniowego systemu odprowadzania wody, co znacznie zmniejsza średnice rur spustowych. W pobliżu kielichów zostały wykonane dodatkowe otwory przelewowe dla zabezpieczenia zadaszenia przy ponadnormatywnych opadach

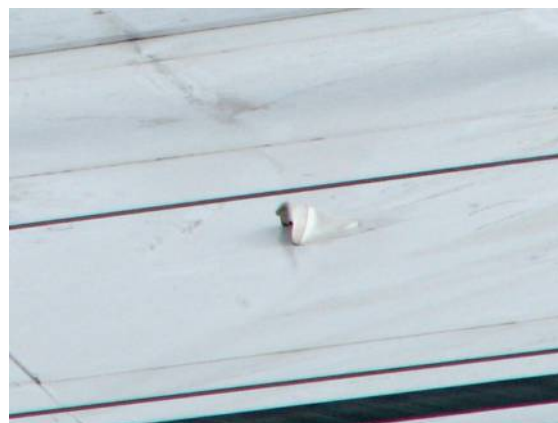
deszczu. Przy innych formach zadaszeń nadmiar wody może wylewać się poza krawędź membrany. Natomiast w tym przypadku, najniższa część membrany położona jest w pobliżu zewnętrznego pierścienia. Otwór przelewowy zabezpieczony jest stalowym kołnierzem ograniczającym możliwość wylewania się wody.



Il. 297. Odprowadzenie wody na Stadionie Narodowym w Warszawie

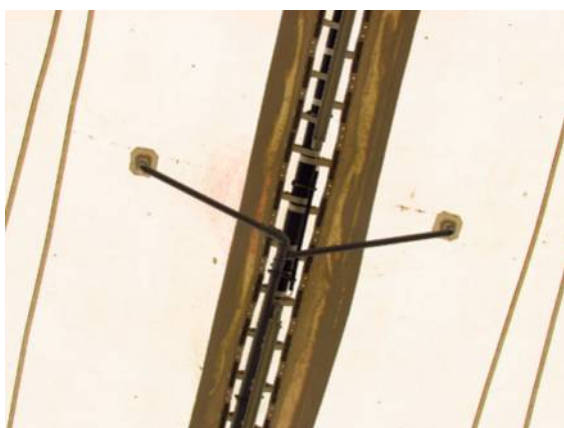
Dopiero przy bardzo intensywnych opadach następuje przelewanie przez kołnierz. Ponad otworami znajdują się dodatkowe osłony chroniące przed opadami. Niestety pod tymi otworami zlokalizowane są schody, którymi po meczu widzowie opuszczają stadion.

Stosowanie dodatkowych otworów w zadaszeniu membranowym czasami wynika z innych



Il. 298. Zabezpieczenie otworu w membranie amfiteatru w Kielcach

względów. Przykładem jest ruchoma część zadaszenia amfiteatru w Kielcach. Zastosowano tam dodatkowe otwory, które pozwalają na wypływanie gromadzącej się wody w okresie, kiedy membrana jest zwinięta. Natomiast, gdy membrana jest rozwinięta otwory, te muszą być zasłonięte, aby nie dopuścić do kapania wody na widownię. Na górnej powierzchni membrany wprowadzone zostały osłony w formie kapturków ustawionych zgodnie z kierunkiem spływania wody.



Il. 299. Dodatkowe rury spustowe w Płocku

Innym problemem jest odprowadzenie wody z miejsc, w których z różnych powodów gromadzi się woda podczas opadów lub pozostaje po opadach. Przykładem takiej dodatkowej instalacji są elastyczne rury, które zostały wprowadzone w zadaszeniu w Płocku.



Il. 300. Dodatkowy odpływ w zadaszeniu w Zubrzycy Górnej



Il. 301. Rynna w zadaszeniu w amfiteatrze w Opolu

Podobne rozwiązanie zastosowano w zadaszeniu w Zubrzycy Górnej. Zamocowana w membranie końcówka pozwala na okresowe podpięcie przewodów odprowadzających nadmiar wody poza zadaszenie.

Jedynie w dwóch analizowanych obiektach zastosowano rozwiązanie zbliżone do tradycyjnych rynien umieszczonych wzdłuż krawędzi zadaszenia. Jest to nietypowy układ, jak na zadaszenie membranowe. W amfiteatrze w Opolu membranę zamocowano wzdłuż krawędzi brzegowej do stalowego, wydłużonego pierścienia ukrytego pod membraną. Dodatkowy pas membrany zasłania połączenie z konstrukcją, a metalowe listwy dociskowe mocują całość bezpośrednio nad rynną. Dzięki temu woda sływa do stalowego, prostokątnego koryta umieszczonego dookoła zadaszenia.



Il. 302. Rynna w zadaszeniu antresoli amfiteatru w Sopocie

Stalowy profil o prostokątnym przekroju naturalnie komponuje się z zadaszeniem.

Podobnie rozwiązane jest zbieranie wody do rynny w zadaszeniu antresoli amfiteatru w Sopocie. Wzdłuż krawędzi dolnej membranę zamocowano do sztywnego elementu brzegowego (il. 230). Od zewnętrznej strony zamocowano sztywną rynnę o profilu prostokątnym.



Il. 303. Podciśnieniowy system rur spustowych w Płocku

Ostatnim, istotnym elementem systemu odprowadzenia wody deszczowej są rury spustowe lub inne rozwiązania służące do transportowania wody poza zadaszenie. Ze względu na dużą powierzchnię zadaszeń i dużą ilość przewidywanej wody deszczowej często stosowane są systemy podciśnieniowe. Dzięki temu można ograniczyć średnice rur spustowych. Przykładem jest przedstawione na il. 303 rozwiązanie występujące w amfiteatrze w Płocku.



Il. 304. Wiązka łańcuchów do odprowadzania wody

Interesująco wygląda wiązka łańcuchów zamiast rury spustowej w tylnej części zadaszenia w opolskim amfiteatrze.

Łańcuchy u dołu powinny być zamocowane do instalacji zbierającej wodę lub studni chłonnej, jak to jest np. w Brennej.



Il. 305. Zamocowanie wiązki łańcuchów w Brennej

W przypadku stosowania rzygaczy, strumień spływającej wody jest ukierunkowany, dlatego w miejscu zrzutu należy wprowadzić np. studnię chłonną. Powinno się też zabezpieczyć przed pryskaniem na boki, np. przez zastosowanie tłucznia lub siatki, tak jak to zostało rozwiązane w Poznaniu. Pomiędzy gałęziami słupa znajduje się zagłębienie w posadce, które od góry zasłonięto siatką. Jest to rodzaj studzienki podłączonej do instalacji drenażowej, odprowadzającej wodę dalej do instalacji deszczowej.



Il. 306. Studnia chłonna pod zadaszeniem w Poznaniu



Il. 307. Utwardzony grunt w rejonie splywu wody przy amfiteatrze w Warszawie

Ciekawie zostało rozwiązane odprowadzenie wody w amfiteatrze Bemowo w Warszawie. Zaprojektowano utwardzone koryta, rodzaj suchej rzeki, którymi spływa woda.

Niestety nie wszystkie obiekty mają tak przygotowane miejsca, w które zlewa się woda deszczowa. W skrajnych przypadkach bezpośrednio pod krawędzią zadaszenia znajdują się przejścia lub inne istotne elementy zagospodarowania.

Tabela 11

Sposoby odprowadzania wody deszczowej

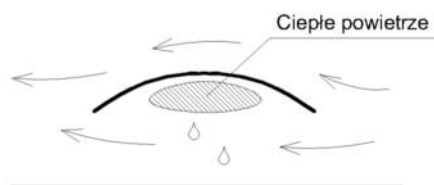
	Rodzaj	Przykłady
Kierowanie wody po powłoce	bortnice zamknięte – wypełnione pianką, bez otworów	Wrocław – dworzec Warszawa – stadion miejski Puławy – stadion Wisła – amfiteatr Ustroń – amfiteatr Zubrzyca Górna – amfiteatr
	bortnice otwarte – wypełnione elastyczną rurą melioracyjną, z otworami pozwalającymi na przedostawanie się wody do wnętrza	Bytom – stadion Poznań – stadion Kołobrzeg – scena
	stalowy pierścień lub łuk – o dużej średnicy umieszczony wzdłuż krawędzi brzegowej	Brenna – amfiteatr Węgierska Górka – scena Wisła – amfiteatr
	metalowy kołnierz w narożniku membrany – powoduje zmianę kierunku lub spowalnia strumień wody	Sopot – klub muzyczny Płock – amfiteatr Gdynia – stadion
	osłony otworów – metalowy kołnierz ograniczający możliwość wylewania się wody w miejscach tzw. przelewów, czyli rezerwowych otworów bezpieczeństwa	Warszawa – Stadion Narodowy
	osłony otworów usuwających wodę z zagłębień zwiniętej membrany	Kielce – amfiteatr
	brak dodatkowych elementów	Chorzów – centrum handlowe Częstochowa – stadion

cd. tabeli 11

Odprowadzanie z membrany	rzygacz – sztywny element służący do kierowania strumienia wody	Ustroń – amfiteatr
	rękaw – elastyczny rzygacz wykonany z tego samego materiału co membrana	Zubrzyca Górna – amfiteatr Kołobrzeg – scena
	fartuch – pas membrany służący do elastycznego połączenia membrany i sztywnej rynny	Kielce – amfiteatr Sulejówek – stadion
	rzygacz z łańcuchami	Brenna – amfiteatr
	brak dodatkowych elementów	Chorzów – centrum handlowe
Zbieranie do instalacji	kielich – sztywne zakończenie rury spustowej o zwiększonej średnicy w formie stożka lub ostrosłupa	Warszawa – stadion miejski Warszawa – pętla autobusowa
	kielich leżący na membranie	Gdynia – stadion
	koryto – specjalnie ukształtowana rynna	Kielce – amfiteatr Szczecin – amfiteatr Płock – amfiteatr
	rynna	Sopot – amfiteatr Opole – amfiteatr
	podłużny kielich	Wrocław – dworzec Kielce – amfiteatr
Zbieranie do instalacji	osłony chroniące przed pryskającą wodą	Szczecin – amfiteatr
	elastyczne rury spustowe służące połączeniu pierścienia umieszczonego na membranie z rurą spustową	Chojnice – stadion
	studnia chłonna – miejsce przygotowane do zbierania strumienia spadającej wody	Brenna – amfiteatr
Transportowanie poza zadaszenie	podciśnieniowy system rur spustowych – rury spustowe zaopatrzone w specjalne końcówki	Warszawa – Stadion Narodowy Warszawa – stadion miejski Poznań – stadion
	rura spustowa	Chojnice – stadion Bytom – stadion
	wiązka łańcuchów	Opole – amfiteatr
	instalacja podziemna lub wewnątrz budynku	Bydgoszcz – hotel
	kamienne koryto – rodzaj suchego, utwardzonego kanału umieszczonego na skarpie	Warszawa Bemowo – amfiteatr
	brak	Chorzów – centrum handlowe

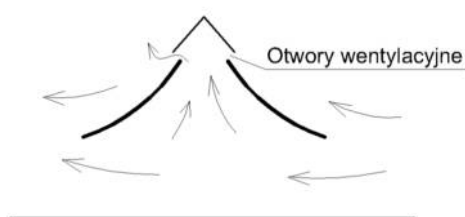
Źródło: opracowanie własne

Projektowanie zadaszeń membranowych wiąże się z koniecznością rozwiązania wielu problemów związanych z nietypowymi właściwościami tkaniny technicznej. Brak pojemności cieplnej powoduje, że bardzo szybko zmienia się temperatura powierzchniowa membrany. Można to zaobserwować przy gwałtownych zmianach pogodowych, kiedy pod zadaszeniem znajduje się nagrzane powietrze, a nad zadaszeniem gwałtownie spada temperatura. Może wtedy nastąpić zjawisko kondensacji pary wodnej. Najczęściej jest to spowodowane brakiem wentylacji w górnej części niewłaściwie uformowanego zadaszenia.



Il. 308. Schemat powstawania kondensacji pary

Część nagrzanego powietrza, które unosi się w górę, jest niejako zamknięte przez zadaszenie. Powstaje poduszka ciepła, która nie może się wymieszać z zewnętrznym powietrzem i obniżyć temperaturę. Opady deszczu przyspieszają spadek temperatury membrany. Dodatkowo następuje wzrost wilgotności powietrza i zwiększa się ilość skroplonej pary. Kondensacja występuje na dolnej powierzchni membrany lub na metalowych elementach konstrukcji.



Il. 309. Wentylowanie przestrzeni pod zadaszeniem

Objawia się to spadającymi kroplami wody, które często są mylnie postrzegane, jako nieuszczelnności dachu. Im większa objętość przymkniętego pod zadaszeniem powietrza, tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia tego zjawiska. Zostało to zaobserwowane w kilku obiektach, choć podejrzewano nieuszczelnności zadaszenia. W Szczecinie mimo braku szczelnego połączenia paneli wzdłuż krawędzi grzbietowej przez tyle lat nie było potrzeby zmiany tego na inne (porównaj il. 242).

Kondensacja pary występuje również w przypadku wieczornego spadku temperatury. Autor zauważył to przy zadaszeniu stadionu w Gdyni. Prawdopodobnie betonowe trybuny, nagrzane promieniami słonecznymi, utrzymywały wyższą temperaturę pod membraną. Wieczorem, gdy na okolicznych trawnikach można było zaobserwować zjawisko osiadania rosy, nastąpiła kondensacja pary pod membraną. Znaczna powierzchnia dachu spowodowała, że spadające krople utworzyły na posadce wyraźne widoczne, mokre plamy. Położone były na zewnątrz stadionu, w pobliżu miejsc, w których znajdowały się kielichy zbierające wodę. Kielichy przygotowane są do zbierania wody spływającej po górnej powierzchni membrany, a nie dolnej. Plamy nie były małe, bo ich wielkość częściowo wynikała z tego, że krople spadały z dużej wysokości i rozбивały się na siatce elewacyjnej. Mimo wszystko, istnieje prawdopodobieństwo, że takie zjawisko może pojawić się na widowni, przy źle ukształtowanym dachu. Można temu zapobiec przez właściwą wentylację przestrzeni pod zadaszeniem. Ciekawe jest to, że zadaszenie stadionu w Gdyni nie jest zamknięte, a nawet podniesione od wewnętrznej strony, co powinno ułatwiać wentylację. Może to też wynikać z lokalizacji. Od zachodniej strony stadionu znajdują

się wzgórze porośnięte lasem, a to może powodować lokalnie szybsze spadki temperatury. Podsumowując, przy projektowaniu tak złożonej formy, jaką jest zadaszenie membranowe, trzeba brać pod uwagę wiele aspektów między innymi odprowadzenie wody deszczowej i śniegu.

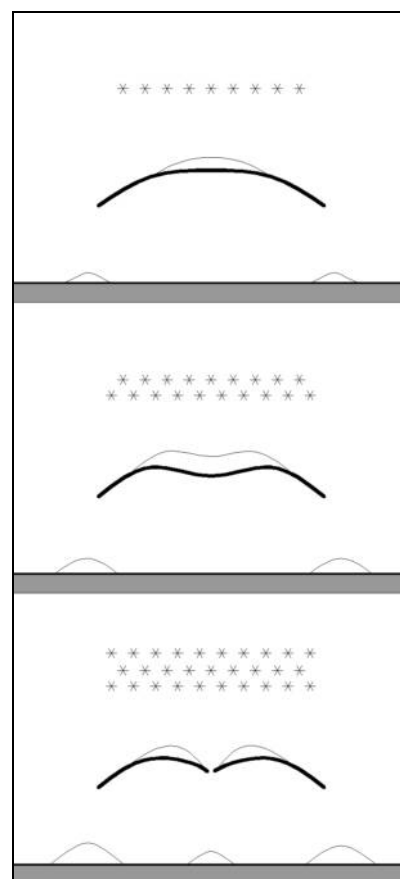
Przykładem jest zadaszenie na stadionie w Puławach. Prawdłowo ukształtowane zadaszenie i właściwie wygięta membrana są odporne na podmuchy wiatru i obciążenie od śniegu. Problemem okazał się jednak kierunek spływania wody. Przy dźwigarach, w narożnikach membrany przewidziane zostały kielichy zbierające wodę deszczową do instalacji. Natomiast główny strumień wody nie spływa w kierunku narożników, ale środkiem pomiędzy dźwigarami (tab. 15, s. 258). Przy intensywnych opadach ilość wody była tak duża, że zastosowane bortnice nie wystarczały do zatrzymania i zmiany kierunku spływania wody. We wszystkich przykładach, w których membranę zamocowano do łuków można zauważyć, że woda spływa środkiem powłoki, pomiędzy łukami.

Położenie bortnic może być prostopadłe, ale wtedy najczęściej woda przelewa się górą. Natomiast, jeśli bortnice położone są skośnie do kierunku spływu, to uzyskiwana jest większa skuteczność, a poza tym nie stanowi to tak dużego oporu dla zsuwającego się śniegu. Jest to bardzo ważne, bo zdarzało się, że w innych obiektach zsuwający śnieg zrywał bortnice.

6.3. Sposoby zabezpieczenia przed śniegiem

6.3.1. Obawy

Stosowanie zadaszeń membranowych w Polsce jako stałych, całorocznych powoduje powstawanie problemu zabezpieczenia ich przed śniegiem lub zamarzającą wodą. Okresowe obciążenie śniegiem znacznie przewyższa ciężar własny pokrycia. Poza tym niewłaściwie ukształtowana powłoka może powodować, że podczas opadów gromadzi się duża ilość śniegu. Dodatkowo duża wysokość, na której znajduje się zadaszenie utrudnia usuwanie śniegu.



Il. 310. Schemat zniszczenia powłoki spowodowanego śniegiem

²⁹⁷ Krzysztof Gerlic, *Design elements for snow-load resistant membrane roofs* [in:] *Beyond the limits of man*. Proceedings of the IASS 2013 Symposium, Wrocław, Poland, 23-27 September 2013, (eds.): J.B. Obrębski, R. Tarczewski. International Association for Shell and Spatial Structures. Oficyna Wydaw. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.

²⁹⁸ PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3 Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem.

Mała wytrzymałość tkaniny na rozdarcie uniemożliwia wprowadzanie mechanicznych metod usuwania śniegu, a duża powierzchnia zadaszienia zwykle gromadzi taką ilość śniegu, że ręczne usuwanie jest bardzo pracochłonne i kosztowne.

Właściwym rozwiązaniem jest takie ukształtowanie membrany, aby śnieg nie gromadził się, aby dochodziło do jego samoczynnego zsuwania z powłoki. Ponadto powierzchnia membrany powinna być jeszcze odpowiednio pochylona, aby zapobiegać tworzeniu się worków wodnych i śniegowych. Chwilowy zastój powoduje lokalne zwiększenie obciążenia powłoki, a w rezultacie jej obniżenie i jeszcze większe, szybsze gromadzenie opadów zwiększających obciążenie. Potwierdzeniem istoty problemu właściwego formowania zadaszień membranowych może być analiza przykładów uszkodzeń spowodowanych śniegiem, do jakich doszło w Dreźnie i Gelsenkirchen w 2010 roku, o czym pisał autor²⁹⁷.

Niestety elementy, które są potrzebne dla ograniczenia spływającej wody, utrudniają zsuwanie śniegu. Czasami nawet dochodzi do ich uszkodzenia przez zsuwający śnieg. Zsuwanie śniegu zmniejsza problem obciążenia, ale za to zwiększa się niebezpieczeństwo poniżej. Zwłaszcza, jeśli teren jest otwarty i w każdej chwili mogą tam przebywać ludzie.

6.3.2. Wytrzymałość konstrukcji

Budowle projektowane są z zachowaniem wszelkich zasad zapewniających bezpieczeństwo konstrukcji oraz jej użytkowników. Określone to jest w Polskich Normach²⁹⁸ i na ich podstawie przyjmowane są przewidywane wartości obciążeń, np. śniegiem. W zależności od rejonu Polski i wysokości nad poziomem morza, gdzie będzie znajdować się projektowane zadaszienie, konstruktor do obliczeń przyjmuje wartość charakterystyczną obciążenia śniegiem ($Q_k=0,7\div 2,0 \text{ kN/m}^2$). Dalej,

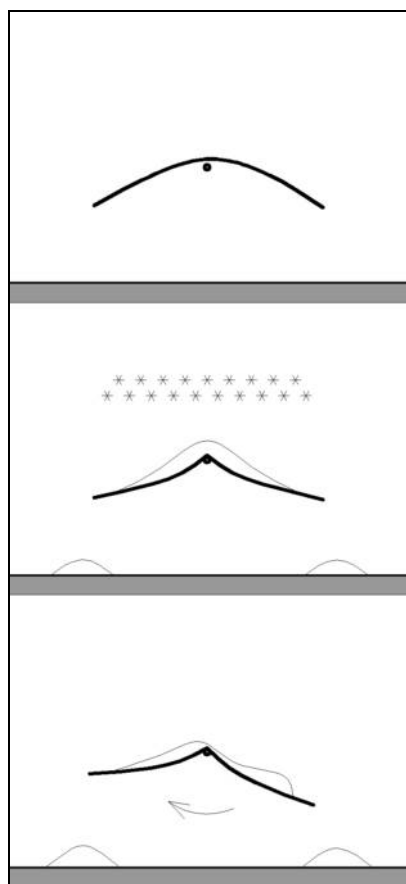
uwzględniając współczynnik kształtu zadaszienia i współczynnik obciążenia, wyznacza obciążenie obliczeniowe dla sprawdzenia nośności konstrukcji.

Jak już wcześniej wspomniano obliczenia statyczno-wytrzymałościowe membran wykonywane są za pomocą specjalnego oprogramowania, które pozwala między innymi na sprawdzenie, czy pod wpływem przyjętych obciążeń nie dojdzie do przekroczenia nośności konstrukcji, ale też czy nie powstaną zastoje, czyli worki wodne i śniegowe. Obrazowo może to być przedstawione za pomocą warstwic. W przypadku, kiedy tworzą się zagłębienia spowodowane obciążeniem można próbować zwiększyć naprężenie wstępne. Najczęściej będzie się to wiązać ze zmianą materiału membrany, aby przenieść większe obciążenia, ale też ze wzrostem obciążeń bocznych dla konstrukcji podporowej. Można też zmienić odległość pomiędzy podporami, wtedy większą część obciążeń przeniesie konstrukcja podporowa, a mniejszą sama membrana. Jeśli te rozwiązania nie wystarczą, to należy wrócić do początkowego etapu, gdzie określany był kształt membrany. Trzeba wtedy zmienić pochylenie lub krzywiznę membrany za pomocą zmiany kształtu lub położenia elementów podporowych. Zwiększenie krzywizny powoduje zmniejszenie sił wewnętrznych w membranie, a to pozwala na przeniesienie większych obciążeń. Było to już wyjaśnione w rozdziale 2.3.

6.3.3. Zabezpieczenia

Innym rozwiązaniem jest zastosowanie dodatkowych elementów zabezpieczających. Aby ograniczyć odkształcenia membrany pod wpływem obciążenia śniegiem mogą być wprowadzane tzw. liny przeciwsniegowe. Stalowa lina umieszczona poniżej membrany nie przenosi obciążeń, dopóki nie dojdzie do takiego przemieszczenia, że membrana oprze się o linę.

Większa wytrzymałość liny powoduje, że nie przemieszcza się tak jak membrana. Tworzy ona się wtedy krawędź grzbietowa, która dzieli powłokę na dwie połacie. Zmienia się też pochylenie w górnej części membrany. Może to rozpocząć proces samoczynnego odśnieżania dachu. Śnieg zsuwa się z wyższych partii dachu do niższych. Jeśli wzdłuż krawędzi nie ma elementów ograniczających, to rozpuźniony śnieg spada poza zadaszenie. Czasami tylko przemieszcza się w dolne partie, skąd łatwiej go zrzucić. Najczęściej powoduje to, że powłoka jest obciążona niesymetrycznie. Jeśli konstrukcja na to pozwala, to pod wpływem zmiany obciążenia dochodzi do przechylenia powłoki, a to jeszcze bardziej ułatwia przemieszczanie śniegu. Brak śniegu na jednej z części powoduje natychmiastowe przechyle-



Il. 311. Schemat wpływu liny przeciwśniegowej na powłokę

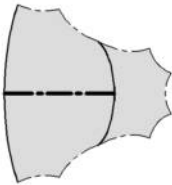

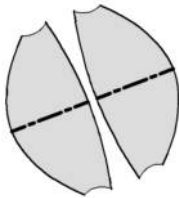
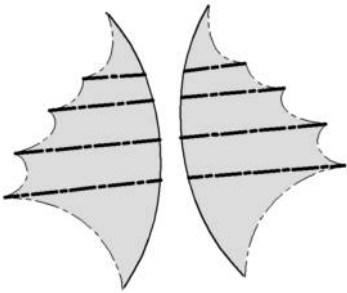

nie powłoki w przeciwną stronę, a to z kolei ułatwia zrzucenie pozostałej części śniegu. Zjawisko takie zostało zaobserwowane przez gospodarza jednego z obiektów, który porównał to do otrząsania się z wody.

Przy tej okazji można zwrócić uwagę, że wykorzystanie lin jako podpór dla membrany jest rozwiązaniem niejako zgodnym z jej naturą. Liny są wiotkie i ulegają przemieszczeniom podobnie jak membrana. Stosowanie innych elementów podporowych powoduje, że cały ustrój jest bardziej sztywny. Dzięki temu, że membrana zamocowana jest na linach przemieszcza się wraz z podmuchami wiatru i innymi zmianami obciążeń. Nawet drobne drgania naprężonej membrany przekazywane są na sąsiadujące panele, a to powoduje, że śnieg nie przywiera i przesuwa się po zadaszeniu.

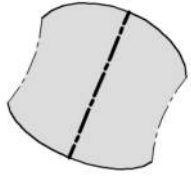
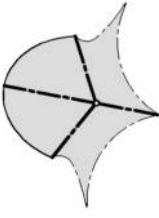
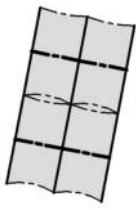
W tabeli 12 przedstawione są obiekty, w których zastosowane są liny przeciwśniegowe. We wszystkich przedstawionych obiektach kierunek lin przeciwśniegowych pokrywa się z linią spływu na powierzchni membrany. Poza tym liny te zamocowane są do sztywnych elementów podporowych. W przedstawionych przykładach liny przechodzą przez punkty wysokie membrany, a w 4 przypadkach pokrywają się z linią wododziału na powierzchni membrany. Liny te nie powinny pokrywać się z liniami warstwic, bo tworzyłyby progi utrudniające zsuwanie śniegu i spływ wody. W przypadku amfiteatru w Sopotcie liny dzielące poszczególne panele zostały nazwane linami przeciwśniegowymi, chociaż nie są to typowe dodatkowe elementy wzmacniające powłokę, ponieważ nie są umieszczone pod powłoką. W tym przypadku liny o większej wytrzymałości niż membrana przyjmują rolę pośrednich elementów podporowych dla membrany, a to powoduje, że membrana nie ulega takim przemieszczeniom pod wpływem obciążeń. Dzięki tym linom membrana może mieć mniejszą krzywiznę, co jest szczegółowo wyjaśnione na stronie 257.

Tabela 12

Rozmieszczenie lin przeciwniegowych

Obiekt	Schemat (bez skali)	Opis
Ustroń – amfiteatr		forma kolebkowa, podparta łukami – lina przeciwniegowa łączy najwyższe punkty przeciwległych łuków
Sopot – klub		układ połączonych form stożkowych, liny przeciwniegowe łączą pierścienie górne największych segmentów, ponadto w miejscu przecięcia krawędzi trzech segmentów wprowadzono płytę pozwalającą na okresowe podparcie membrany dla zabezpieczenia przed zbyt dużym obciążeniem
Wisła – amfiteatr		układ dwóch pochylonych powierzchni podpartych łukami – liny przeciwniegowe łączą najwyższe punkty łuków podporowych
Sopot – amfiteatr		dwie powłoki, każda podzielona czterema linami przeciwniegowymi, ułożonymi prostopadle do głównych łuków nośnych, nie są to typowe liny przeciwniegowe, gdyż umieszczone są wewnątrz powłoki, wzdłuż tych lin łączone są płyty membrany
Łańcut – storczykarnia		jedna powłoka, bez podziału na mniejsze panele, pod membraną umieszczonych jest sześć cięgien, które podpierają powłokę i tworzą wyraźne krawędzie; liny zamocowane są do masztów – centralnego i zewnętrznych

cd. tabeli 12

Stężyca – scena		forma kolebkowa, oparta na łukach kratownicowych, lina przeciwniegowa łączy wierzchołki łuków
Węgierska Górka – scena		forma stożkowa, cztery liny przeciwniegowe, wszystkie wychodzą z najwyższego punktu, trzy dochodzą do łuku, a jedna do tylnej podpory
Wrocław – dworzec		forma kolebkowa, membrana napięta na łukowych ramach, liny przeciwniegowe dzielą każdy segment na środku, umieszczone są pomiędzy wierzchołkami przeciwnych łuków

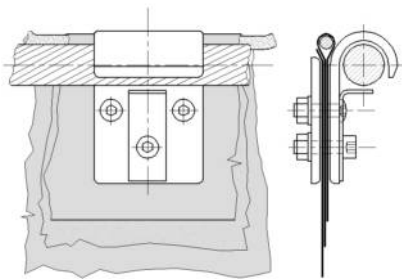
Źródło: opracowanie własne.

Zadaszenie klubu w Sopocie uzyskane jest z połączonych form stożkowych. Najtrudniejszym do odśnieżenia miejscem jest środkowy fragment membrany połączenia trzech form stożkowych. W tym miejscu jest bardzo małe nachylenie, a powyżej znajdują się duże fragmenty powłoki. Śnieg zsuwa się w to miejsce. Nawet zastosowanie lin przeciwniegowych przy takim układzie nie jest w stanie zapewnić właściwego podparcia. W tym miejscu umieszczono stalową płytę zamocowaną do membrany, która służy do okresowego podparcia powłoki. Dzięki temu w okresie zimowym jest o jeden słup więcej. Jest to jedyne takie rozwiązanie w Polsce.

Innym, ciekawym rozwiązaniem jest zabezpieczenie przed nadmiernym obciążeniem śniegiem membrany w Teatrze Letnim w Szczecinie. Zadaszenie o wymiarach 47×45 m zawieszono pod historycznym, żelbetowym łukiem za pomocą układu lin. Powstało jako pierwsze w Polsce całoroczne zadaszenie

membranowe, czyli przewidziane do obciążenia śniegiem. Podczas projektowania należało uwzględnić obciążenie śniegiem. Projektant przewidział ewentualne przekroczenie dopuszczalnego obciążenia. Aby zminimalizować skutki ponadnormatywnych opadów śniegu, zastosowano specjalnie zaprojektowane zamocowania membrany do lin nośnych.

Zaprojektowano odpowiednio dobrane haki, które pod wpływem zbyt dużego obciążenia mogą się wyprostować i spowodować odzepienie membrany. Dzięki temu niespodziewane opady śniegu nie powinny doprowadzić do zniszczenia całej konstrukcji. Odzepienie jednego lub kilku haków byłoby wyraźnie widoczne, gdyż spowodowałoby to obwiśnięcie membrany. W takim przypadku konieczna byłaby interwencja odpowiednich służb. Trzeba by wtedy usunąć śnieg oraz wymienić zużyte zamocowanie. Chociaż zadaszenie zostało wykonane w 2000 roku, to do dnia dzisiejszego nie nastąpiło odzepienie żadnego z haków.



Il. 312. Hak zabezpieczający przed przeciążeniem

Mimo tego zabezpieczenia kilka razy prowadzone było ręczne usuwanie śniegu.

Kolejnym przykładem wartym omówienia jest zadaszenie na dworcu kolejowym we Wrocławiu. Układ składa się z 12 głównych membran o wymiarach $21 \times 11,4$ m. Zamocowane są do łukowych ram co powoduje, że mają formę kolebkową. Połączone są wzdłuż krawędzi bocznych i wzdłuż krawędzi dolnych, czyli miejsc, w które przesuwają się śniegi. Wzdłuż krawędzi głównych membran znajdują się ciągną naprężające panele. Pomiędzy nimi zastosowano przerwę, którą wypełniono pasem mniejszej membrany. Pas ten napięty jest dodatkowym środkowym ciągnem, wzdłuż którego spływa woda do kielichów. Zachowana jest też pewna odległość pomiędzy membraną a konstrukcją, aby możliwe było usuwanie śniegu. W Dreźnie w 2010 roku, doszło do uszkodzenia membrany dachowej w kilku

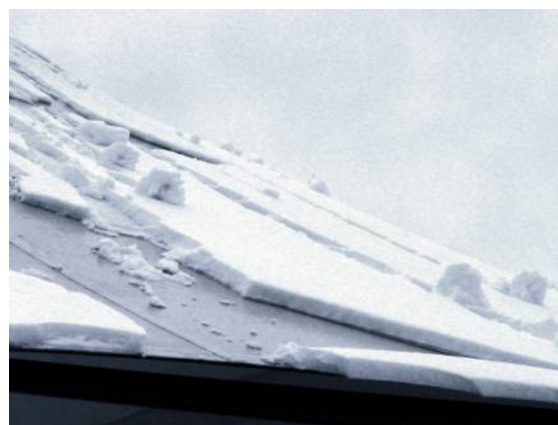


Il. 313. Dodatkowy pas membrany w krawędzi koszowej we Wrocławiu

miejscach. Zadaszenie tam jest tak ukształtowane, że membrana ma zagłębienia, które na stałe połączone są z konstrukcją. W przypadku dworca we Wrocławiu, gdyby doszło do ponadnormatywnych opadów, można by usunąć śnieg, a w najgorszym przypadku można by nawet zniszczyć dolny pas, aby nie doprowadzić do uszkodzenia całej powłoki.

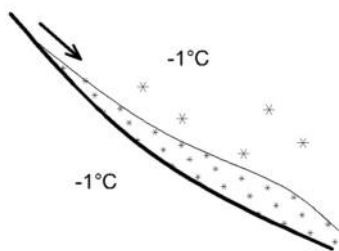
6.3.4. Pochylenie

Na podstawie rozmów z gospodarzami obiektów i własnych obserwacji autor może wyjaśnić niektóre zjawiska powstające na powierzchni membrany podczas opadów śniegu.



Il. 314. Zjawisko samoczynnego zsuwania, a nawet toczenia śniegu

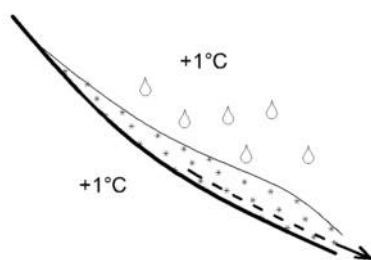
Materiał membrany, ze względu na niewielką grubość, nie jest izolatorem ciepła, dlatego po jednej i drugiej stronie jest podobna temperatura. Jeżeli temperatura powietrza jest ujemna, to na membranie zaczyna gromadzić się opadający śnieg. Podobna temperatura powoduje, że brak jest warstwy poślizgowej i śnieg się nie zsuwa, chyba że pochylenie i ciężar śniegu są na tyle duże, że zaczynają tworzyć się niewielkie osuwiska wynikające z braku spójności samego śniegu lub zbyt małej przyczepności do gładkiej powierzchni membrany. Górne partie śniegu napierają na dolne i powodują jego przesuwanie w dół. Na il. 314 widoczne



Il. 315. Gromadzenie śniegu przy ujemnej temperaturze

są fragmenty śniegu, które nie tylko przesuwają się, ale nawet samoczynnie toczyły.

Jeśli temperatura powietrza przekroczy 0°C , śnieg zaczyna się topić nie tylko od góry, ale też od dołu. A to wystarczy, żeby wytworzyła się warstwa poślizgowa i nastąpiło samoczynne przesuwanie śniegu. Wydaje się, że częściej dochodzi do podgrzewania membrany od dołu z powodu konwekcji. Przebywanie ludzi, pojazdów lub nawet podgrzanej posadzki może powodować unoszenie ciepłego powietrza, które ogrzewa membranę od dołu. Celowe podgrzewanie membrany od dołu wykorzystywane jest do ochrony przed śniegiem dużych zamkniętych hal o konstrukcjach pneumatycznych.



Il. 316. Powstawanie warstwy poślizgowej przy dodatniej temperaturze

W przypadku innych materiałów pokryciowych, np. dachówki, pojawia się zjawisko akumulacji ciepła, która spowalnia te procesy. Poza tym w obiektach zamkniętych, z izolacją cieplną nie dochodzi do tak gwałtownych zmian temperatury po drugiej stronie pokrycia.

Jedynie ciemna blacha w promieniach słonecznych może się szybciej nagrzewać i przewodzić ciepło pod warstwę śniegu, ale tylko na wąskim pasie.

Wydaje się, że można przyspieszyć zjawisko samoczynnego zsuwania śniegu przez instalowanie kabli grzejnych. W Polsce są dwa obiekty, które mają takie rozwiązanie: zadaszenie IV trybuny stadionu w Poznaniu oraz zadaszenie trybuny stadionu w Sulejówku. W obu przypadkach gospodarze obiektów potwierdzają, że takie kable nie sprawdzają się w praktyce.



Il. 317. Kable grzejne zamocowane pod membraną

W przypadku zastosowania kabli grzejnych powstaje zjawisko lokalnego topienia śniegu. Topi się tylko ten fragment, który przylega do kabla. Tworzy się pusta przestrzeń w rodzaju tunelu o wymiarach zaledwie kilku centymetrów. Śnieg, który znajduje się ponad kablem zasklepia się i nie opada. Roztopiona woda spływa po membranie i teoretycznie powinna zapoczątkować proces przesuwania śniegu. Niestety do tego nie dochodzi, bo następuje ponowne jej zamarzanie. Membrana jest zbyt cienka, żeby przewodzić ciepło, a to powoduje tylko lokalny wzrost temperatury. W pozostałych miejscach temperatura pozostaje bez zmian. Kable grzejne stosowane na dachach z blachy lepiej się sprawdzają, ponieważ metal lepiej przewodzi ciepło i jest podgrzana większa powierzchnia śniegu. Podobnie dzieje się

w kablach, które instalowane są w elementach, betonowych, np. pochylniach lub schodach. Ciepło w tych przypadkach przekazywane jest dalej przez materiał podłoża. Dlatego stosowanie kabli grzejnych nie sprawdza się, jako sposób usuwania śniegu z membrany. Jedynie w instalacjach odprowadzających wodę można je stosować, aby zabezpieczyć przed zamarzaniem spływającej wody.

Z rozmów przeprowadzonych z producentami namiotów halowych wynika, że prostszym rozwiązaniem na usuwanie śniegu z membrany jest polewanie wodą. Woda o temperaturze kilku stopni przedostaje się przez śnieg i tworzy warstwę poślizgową. W przypadku membrany, która nie ma bezwładności termicznej następuje szybkie jej ogrzanie. Oczywiście nie wszędzie można stosować takie rozwiązanie, gdyż woda spływająca na betonową posadzkę natychmiast zamarza.

Innym sposobem inicjowania samoczynnego zsuwania śniegu jest wprowadzanie membrany w drgania. Trzeba uważać żeby nie wykorzystywać do tego ostrych przedmiotów, bo można uszkodzić membranę. Bardzo dobrym narzędziem okazuje się piłka. Można nią rzucać w zadaszenie i odbijać. Duża, gładka powierzchnia piłki nie uszkadza membrany, a za to wprowadza zdecydowane drgania całej powłoki. Powoduje to podrzucanie, odrywanie i łamanie większych fragmentów śniegu. Dzięki temu śnieg zsuwa się samoczynnie. Metoda ta była parę razy stosowana między innymi na mniejszych obiektach sportowych.

W dwóch obiektach usuwane są części zadaszenia lub osłon, aby ułatwić samoczynne zsuwanie śniegu. W Szczecinie w tylnej części zadaszenia znajdują się blachy, które chronią scenę przed chlapaniem wody podczas opadów (il. 293). W okresie zimowym osłony te są opuszczane, aby umożliwić samoczynne zsuwanie dużych ilości śniegu. Podobnie jest

w zadaszeniach w centrum sportowo-rekreacyjnym w Poznaniu. Na okres zimowy zdejmowane są fartuchy ochronne, które latem kierują spływającą wodę do rury spustowej. Dzięki temu większa ilość śniegu może samoczynnie spaść z zadaszenia. Na il. 287 zostało przedstawione zamocowanie membrany z założonym fartuchem.



Il. 318. Zdjęty fartuch pod membraną w Poznaniu

Jest on zdejmowany na zimę, aby nie utrudniać ręcznego usuwania śniegu. Przy mniejszych ilościach powinien zsunąć się samodzielnie. Natomiast przy większych opadach potrzeba ręcznego działania. Jest to ułatwione, gdyż nie ma potrzeby wchodzenia na zadaszenie, a jedynie na niewielką wysokość słupa podporowego.



Il. 319. Ochrona rynny przed zsuwającym śniegiem

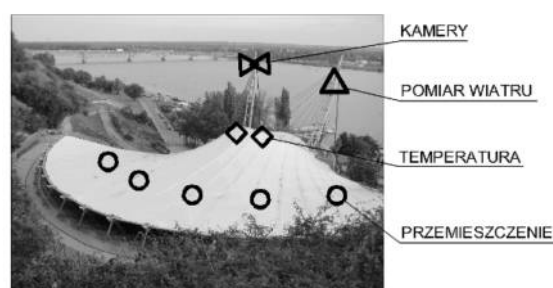
Zsuwający śnieg może doprowadzić do uszkodzenia innych elementów konstrukcji lub instalacji, dlatego należy przewidzieć odpowiednie wzmocnienia. Dobrym przykładem są pręty znajdujące się nad rynną w amfiteatrze w Wiśle. Rozbijają większe fragmenty śniegu i chronią rynnę przed uszkodzeniem.

6.3.5. Monitoring

W Prawie budowlanym²⁹⁹ jest napisane: „Właściciel lub zarządca obiektu budowlanego jest obowiązany zapewnić, dochowując **należytej staranności**, bezpieczne użytkowanie obiektu w razie wystąpienia czynników zewnętrznych oddziałujących na obiekt, związanych z działaniem człowieka lub sił natury, takich jak: wyładowania atmosferyczne, wstrząsy sejsmiczne, silne wiatry, **intensywne opady atmosferyczne**, osuwiska ziemi, zjawiska lodowe na rzekach i morzu oraz jeziorach i zbiornikach wodnych, pożary lub powódzie, w wyniku których następuje uszkodzenie obiektu budowlanego lub bezpośrednie zagrożenie takim uszkodzeniem, mogące spowodować zagrożenie życia lub zdrowia ludzi, bezpieczeństwa mienia lub środowiska.” W związku z tym gospodarze obiektu podczas opadów śniegu na bieżąco starają się kontrolować, czy nie zostały przekroczone wartości obciążenia przewidziane w projekcie.

Wartości charakterystycznego obciążenia śniegiem w normie³⁰⁰ podane są w kN/m^2 , a nie w centymetrach pokrywy śnieżnej, gdyż w zależności od warunków atmosferycznych ciężar śniegu może się znacznie różnić ($1,0 \div 9,0 \text{ kN/m}^3$). Niestety tak podane wartości powielane są np. w instrukcji użytkowania danego zadaszenia. Po katastrofie budowlanej,

do której doszło w Chorzowie w styczniu 2006 roku, gdzie zginęło 65 osób obawy są uzasadnione. Niestety tak podane wartości obciążeń przekazują całą odpowiedzialność na gospodarza obiektu, który aby określić ciężar objętościowy śniegu, powinien wykonać następujące czynności – pomiar np. polegający na zważeniu śniegu z powierzchni $0,25 \text{ m}^2$ gruntu, aby wyliczyć, czy obciążenie nie przekracza założonego. Na tej podstawie powinien podjąć decyzję, czy należy przeprowadzić proces ręcznego odśnieżania. W większości przypadków jest to trudne w realizacji.



Il. 320. Schemat rozmieszczenia elementów monitoringu w amfiteatrze w Płocku

Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie systemu monitoringu obciążenia. Pierwszym obiektem z zadaszeniem membranowym, gdzie zastosowano taki monitoring jest amfiteatr w Płocku. Ze względu na problemy występujące w czasie budowy i obawy o bezpieczeństwo całej konstrukcji³⁰¹ uruchomiono tam taki system. Jego celem jest przede wszystkim kontrola stanu konstrukcji oraz zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania obiektu. System monitoringu³⁰² został opracowany już w 2008 roku. Na podstawie analizy statyczno-wytrzymałościowej konstrukcji wskazano rodzaj urządzeń i położenie poszczególnych punktów pomia-

²⁹⁹ Art. 61 ust. 2 ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz.U. z 2013 r., poz. 1409, z późn. zm.).

³⁰⁰ PN-EN 1991-1-9: 2005, *op.cit.*

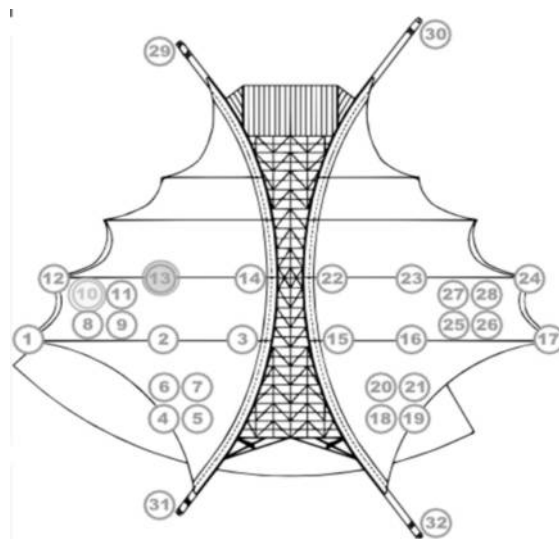
³⁰¹ Dagmara Koblą, *Amfiteatr – worek bez dna*, <http://plock.naszemiasto.pl/archiwum/amfiteatr-worek-bez-dna,1543980,art,t,id,tm.html> (27-08-2008).

³⁰² Krzysztof Żółtowski, *Projekt monitoringu konstrukcji zadaszenia Amfiteatru w Płocku*. 2008.

rowych. Określono też, że najbardziej reprezentatywnym wskaźnikiem zmian konstrukcji zadaszania są przemieszczenia pionowe. W środkowej części zadaszania przewidziano 5 czujników przemieszczeń, zamocowanych w punktach węzłowych cięgien. Do tego zainstalowano: czujniki temperatury nad i pod powłoką, czujniki pomiaru prędkości wiatru oraz kamery pozwalające na obserwację zadaszania i jego najbliższego otoczenia. Pozwala to ocenić przyczyny występujących przemieszczeń. Całość połączona jest z jednostką centralną, która na bieżąco rejestruje wyniki. Zapewniony jest też stały dostęp do wyników przez Internet.

Na podstawie analizy statyczno-wytrzymałościowej określone zostały progowe deformacje. Dzięki temu obsługa obiektu wie, że jeśli ugięcie przekroczy 150 mm na dowolnym czujniku, należy przystąpić do usunięcia śniegu z dachu. Natomiast po przekroczeniu 200 mm należy ewakuować ludzi z obiektu i zabezpieczyć go przed dostępem z zewnątrz. Po ustąpieniu obciążenia należy dokonać szczegółowego przeglądu konstrukcji. Podobnie zostały określone progowe prędkości wiatru. Jeśli średnia prędkość wiatru liczona z 10 minut wynosi powyżej 15 m/s, nie powinno się organizować imprez w obiekcie, a powyżej 20 m/s obowiązuje zakaz przebywania osób w bezpośrednim sąsiedztwie konstrukcji. Dodatkowo w opisie systemu monitoringu zostało zaznaczone, że niedopuszczalne jest gromadzenie śniegu w postaci pryzm w czasie odśnieżania.

Innym przykładem jest Opera Leśna w Sopocie, która wyposażona jest w najwyższej klasy system monitoringu konstrukcji. System ten jednocześnie obserwuje 32 punkty pomiarowe.



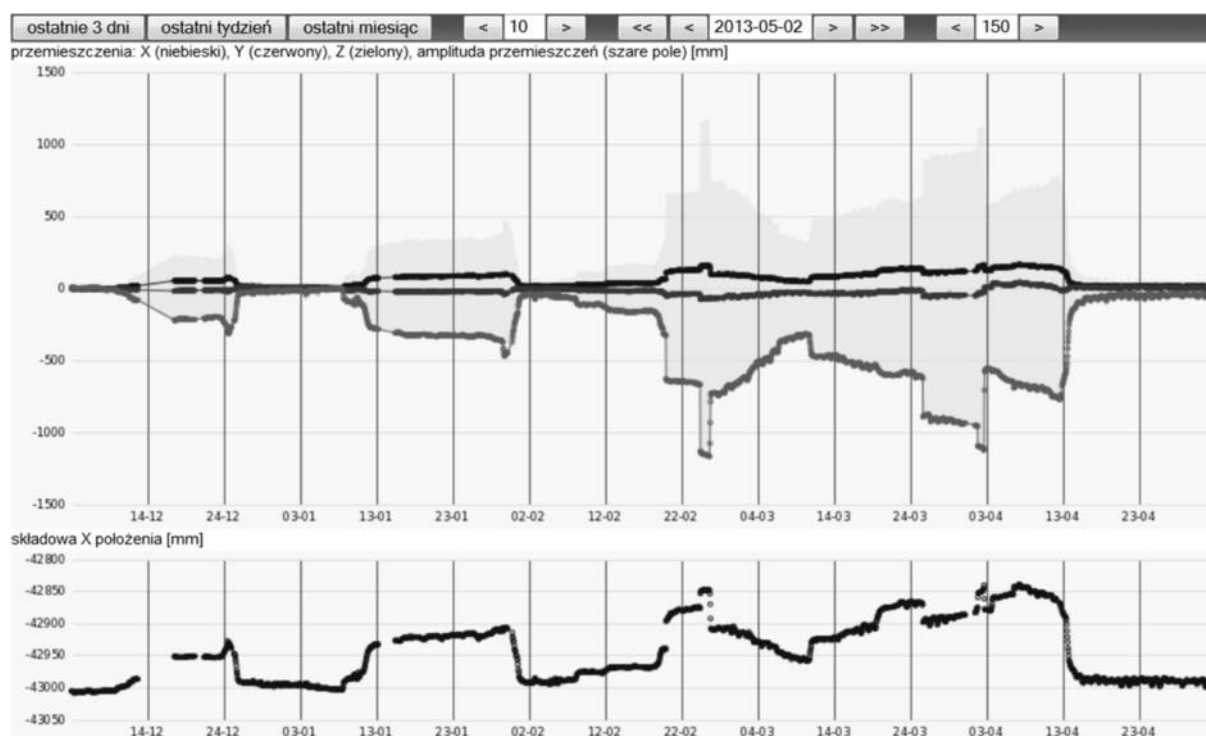
Il. 321. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych³⁰³

Część obserwowanych punktów umieszczona jest na konstrukcji podporowej (miejsca oparcia głównych łuków stalowych), co stanowi punkty odniesienia dla pomiarów. Jeszcze ciekawsze dla tego obiektu jest to, że część punktów pomiarowych znajduje się bezpośrednio na membranie. Głównym elementem modułu pomiarowego jest tachimetr automatyczny wykonujący pomiary położenia pryzmatów. Pomiar przemieszczeń pozwala na ocenę stanu technicznego obiektu oraz ocenę pracy membrany. Pozwala to na określenie



Il. 322. Zamocowanie pryzmatów pomiarowych bezpośrednio do membrany

³⁰³ Krzysztof Wilde, Jacek Chróścielewski, Mikołaj Miśkiewicz, Magdalena Rucka, *Diagnostyka i monitoring nowego przekrycia Opery Leśnej w Sopocie*, [w:] *Awarie Budowlane 2013 – Diagnostyka w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji*, XXVI konferencja naukowo-techniczna, Szczecin - Międzyzdroje, 20-24 maja 2013.



Il. 323. Wykres przemieszczeń punktu pomiarowego nr 10 pomiędzy listopadem 2012 a majem 2013³⁰⁴

relaksacji na podstawie pomiarów w początkowej fazie użytkowania obiektu i procesów pełzania wynikających z długotrwałych obciążeń, np. zalegającego śniegu. System dokonuje także pomiary drgań i temperatury konstrukcji w czterech punktach oraz wykonuje pomiary podstawowych danych meteorologicznych, takich jak temperatura powietrza, wilgotność, prędkość i kierunek wiatru. Andrzej Ambroziak³⁰⁵ przedstawił analizę statyczno-wytrzymałościową projektowanego zadaszenia Opery Leśnej. Największe przewidywane przemieszczenia membrany znajdują się przy dolnych krawędziach największych paneli. Tam też zostały umieszczone punkty pomiarowe.

Na podstawie materiału udostępnionego z monitoringu obciążenia i prezentowanego przez Krzysztofa Wilde³⁰⁶ przedstawiony jest przykładowy wykres przemieszczeń punktu pomiarowego. Jest to punkt nr 10, położony najniżej,

na najdłuższym panelu. Umieszczony jest na połaci zachodniej, od strony przylegającego wysokiego lasu. Wykres przedstawia wyniki pomiarów ze 150 dni (od listopada 2012 do maja 2013). Można na nim zaobserwować:

- okresy kiedy zadaszenie było obciążone śniegiem,
- jak zmieniło się obciążenie spowodowane kolejnymi opadami (wzrost obciążenia bez gwałtownych skoków),
- gwałtowne zmiany obciążenia spowodowane zsuwaniem się śniegu z górnych części zadaszenia i obciążanie dolnych,
- zmniejszanie obciążenia spowodowane samoczynnym zsuwaniem śniegu z dachu lub w wyniku odśnieżania dachu przez wyspecjalizowane ekipy. Skrajne ugięcie zadaszenia dla punktu pomiarowego nr 10 wynosiło 120 cm.

³⁰⁴ Krzysztof Wilde, *Systemy monitoringu konstrukcji obiektów budowlanych*, [w:] *ibidem*. s.123-140.

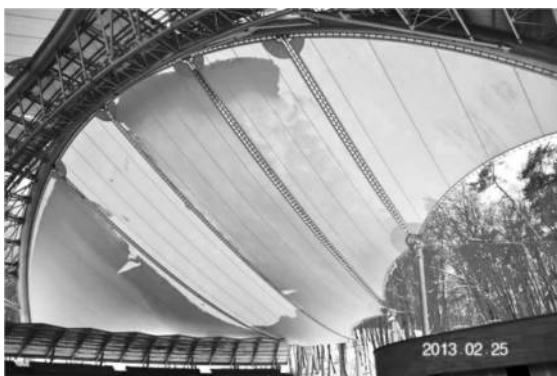
³⁰⁵ Andrzej Ambroziak, *Geometrycznie nieliniowa analiza membran stosowanych do konstrukcji przekryć wiszących z uwzględnieniem różnych typów związków konstytutywnych*, Autoreferat Pracy Doktorskiej, Gdańsk 7 czerwiec 2006.

³⁰⁶ Krzysztof Wilde, *Systemy monitoringu konstrukcji...*, *op.cit.*, s. 123-140.



Il. 324. Zadaszenie membranowe obciążone śniegiem³⁰⁷

Wyniki pomiarów dają jedynie informację o obciążeniu dachu, a to powoduje, że można uruchomić stosowne służby. Przykładem może być sytuacja, do jakiej doszło 25.02.2013 roku, po zsunięciu się dużej ilości śniegu, który początkowo znajdował się w górnej części zadaszenia. Niestety śnieg nie zsunął się poza zadaszenie, ale zatrzymał się przed krawędzią brzegową. Lina brzegowa utworzyła rodzaj progu, który wyhamował zsuwający się śnieg. Problemem okazała się wielkość przemieszczenia membrany, gdyż główna membrana zadaszenia oparła się o elementy konstrukcji dolnego zadaszenia, znajdującego się nad antresolą. Dzięki monitoringowi natychmiast przystąpiono do zrzucenia części śniegu, co jest widoczne na wykresie przemieszczeń.



Il. 325. Widoczny efekt zsunęcia śniegu³⁰⁸

Podobny system monitoringu obciążenia konstrukcji ma Stadion Narodowy w Warszawie. System ten składa się z następujących elementów³⁰⁹:

- czujników odkształceń montowanych na linach nośnych i konstrukcji stalowej,
- czujników temperatury,
- stacji meteorologicznej mierzącej temperaturę, wilgotność powietrza i prędkość wiatru,
- akcelerometrów mierzących drgania,
- kamer do oceny wizyjnej,
- rejestratorów,
- serwera z wyposażeniem i zasilaniem.

Większość urządzeń pomiarowych jest umieszczona w szafkach zapewniających odpowiednią temperaturę w okresie zimowym. Często znajduje się w trudno dostępnych miejscach, na bardzo dużej wysokości. System analizuje położenia charakterystycznych punktów, między innymi rozciąganego wewnętrznego pierścienia oraz iglicy. System sprawdził się w zimie 2012/2013, kiedy to duża ilość opadów wymusiła konieczność usuwania śniegu z zadaszenia, co zostało wykonane ręcznie przez wyspecjalizowane ekipy alpinistów.

Niestety większość zrealizowanych w Polsce zadaszeń membranowych nie jest wyposażona w urządzenia służące do oceny obciążenia konstrukcji. Niektórzy nawet nie wiedzą, że są takie systemy, a słowo monitoring sprowadzają do systemów zabezpieczenia mienia przed niepowołanymi osobami. Podczas intensywnych opadów osoby dozorujące obiekty przede wszystkim obserwują, czy grubość pokrywy śnieżnej nie jest zbyt duża oraz czy nie powoduje wyraźnego ugięcia, które mogłoby być początkiem procesu zniszczenia części lub całości konstrukcji. Ponieważ ocena dokonywana jest wizualnie, bez jakichkolwiek pomiarów, więc nie jest precyzyjna.

³⁰⁷ Krzysztof Wilde, *Systemy monitoringu konstrukcji...*, op.cit.

Proste rozwiązanie zastosowane jest w Śliwicach, gdzie pod powłoką umieszczone są dodatkowe linki. Nie zostały tam wprowadzone, aby spełniać rolę elementów przenoszących obciążenia od śniegu, ale po to, by można było kontrolować położenie membrany.

6.3.6. Spadanie

Innym problemem związanym z zadaszeniami membranowymi obciążonymi śniegiem jest zapewnienie bezpieczeństwa poniżej zadaszenia. Przy odpowiednim pochyleniu połączy da-



Il. 326. Spadający śnieg wzdłuż krawędzi zadaszenia

chowych śnieg zaczyna się samoczynnie zsuwać. Dla właściciela obiektu niezbędne jest zabezpieczenie miejsc, na które spada. Najczęściej jest to dokonywane przez czasowe ogrodzenie terenu wokół zadaszenia lub ostrzeżenie przed niebezpieczeństwem. W przypadku niektórych amfiteatrów lub stadionów teren jest stale ogrodzony i zamknięty, zwłaszcza, że nie są użytkowane w okresie zimowym. Gorzej jest, jeśli obiekt jest użytkowany w zimie.

Z obserwacji wynika, że najczęściej temperatura w nocy jest wyraźnie niższa i spadający śnieg zatrzymuje się na zadaszeniu. Natomiast w ciągu dnia temperatura powoli rośnie, co rozpoczyna proces spadania śniegu. Niestety są

to godziny, w których rozpoczyna się największy ruch, np. przed centrum handlowym. Przykładem może być zadaszenie w Katowicach. Ma ono formę dwóch połączonych stożkowych parasoli. Jak się okazuje, nietypowa konstrukcja stwarza duże problemy gospodarzom obiektu. Stożkowe formy powodują, że większa część dachu jest stroma. Śnieg podczas opadów gromadzi się tylko w dolnych fragmentach powłoki, skąd jest spychany przez śnieg z górnych fragmentów. Podczas opadów lub bezpośrednio po nich dochodzi do spadania śniegu. Zwykle nie jest on zbity, ale sypki. Mimo to gospodarze próbują przeciwdziałać spadaniu śniegu i dbają o to, aby w porę usunąć cały śnieg z zadaszenia. Zwłaszcza, że tragiczna historia hali Międzynarodowych Targów Katowickich nakazuje bardziej dbać o zadaszenia na Śląsku. Okazuje się, że odśnieżanie tego typu dachu nie jest proste. Brak jest możliwości wchodzenia na to pochyłe zadaszenie. Próba odśnieżania za pomocą zewnętrznych podnośników podobnie nie jest prosta, a w dodatku jest droga. Samo zadaszenie znajduje się na wysokości kilku metrów, więc odśnieżanie z ziemi też jest utrudnione. Polewanie wodą nie wchodzi w rachubę, ponieważ spadająca woda na betonowej posadce natychmiast uległaby zamarznięciu, a to generowałoby dużo większe niebezpieczeństwo dla użytkowników. Jedynym rozwiązaniem jest obserwowanie zadaszenia i ręczne strącanie fragmentów nawisów śnieżnych wystających poza brzeg dachu. Usuwanie śniegu z tego zadaszenia jest bardziej działaniem likwidującym potencjalne obawy klientów centrum handlowego w trosce o dobry wizerunek firmy. Podobne problemy okresowo pojawiają się przy zadaszeniu pętli autobusowej w Warsza-

³⁰⁸ Krzysztof Wil de, *Systemy monitoringu konstrukcji...*, *op.cit.*

³⁰⁹ Krzysztof Żółtowski, Michał Drawc, *Stadion Narodowy. Model statyczny do monitoringu konstrukcji*, [w:] *Awarie budowlane...*, *op.cit.*, s. 285-292.

wie. Mimo mniejszego pochylenia zdarzało się, że śnieg w okresie zimowym spadał w pobliżu pasażerów oczekujących na peronie. Duże ograniczenia wynikające z wielkości działki nie pozwoliły na wydłużenie zadaszenia, poza tym wąski peron bardzo ogranicza miejsce, gdzie mogą przebywać ludzie. Zaobserwowano tam zjawisko szybszego topienia śniegu na membranie z powodu postoju kilku autobusów z rozgrzаныmi silnikami. Ciepłe powietrze unosząc się pod zadaszenie, ogrzewa membranę od dołu, co ułatwia topienie śniegu i tworzy warstwę poślizgową. Śnieg wyraźnie szybciej zaczyna zsuwać się z zadaszenia.

Do membrany trudno jest przymocować elementy ograniczające spadanie śniegu, np. w formie płotków, tak jak to jest robione na tradycyjnym dachu. Projektant stacji paliwowych w Gdyni, obawiając się o bezpieczeństwo pod zadaszeniem, przewidział dodatkowe, wystające elementy pełniące rolę buforów lub magazynów, gdzie gromadzi się zsuwający śnieg. Największą obawę budził problem ewentualnych odszkodowań, gdyby fragmenty zbitego lodu spadały z zadaszenia na karoserie drogich samochodów. Zadaszenia o podobnej wielkości w Fuldzie w Niemczech nie mają takich elementów ochronnych, mimo że klimat tam jest podobny.

Spadanie śniegu z powłoki może być wykorzystane pod warunkiem, że kształt zadaszenia jest właściwie wkomponowany w zagospodarowanie znajdujące się poniżej. Przykładem może być zadaszenie amfiteatru w Ustroniu. Teren amfiteatru jest ogrodzony i udostępniany tylko podczas imprez. Mimo dużej powierzchni (1700 m²) nie ma problemów z usuwaniem śniegu. Prawdłowo ukształtowana powłoka powoduje samoczynne zsuwanie śniegu, w kierunku punktów niskich zadaszenia. W tych miejscach tworzą się nieraz bardzo wysokie pryzmy. Gospodarz obiektu w takich

przypadkach za pomocą koparki usuwa pryzmy, aby pozostałe partie śniegu mogły również zsunąć się z powłoki.



Il. 327. Pryzmy śniegu pod zadaszeniem

Drugim, wydaje się bezpieczniejszym rozwiązaniem jest zadaszenie w Wiśle. Prawdłowo zaprojektowana konstrukcja podtrzymuje dobrze ukształtowane połacie dachowe, które skutecznie inicjują zsuwanie śniegu. W tym przypadku teren nie jest zamknięty. Amfiteatr położony jest w samym centrum miasta, w pobliżu krzyżujących się ciągów pieszych. Nie ma ogrodzenia, co ułatwia bezpośredni dostęp o każdej porze dnia i roku. Dodatkowe podświetlenia zachęcają nawet do przychodzenia wieczorem i przebywania pod zadaszeniem. Mimo swobodnego dostępu do przestrzeni, którą oferuje zadaszenie amfiteatru nie ma problemów z jego utrzymaniem. Duże pochylenie połaci prawidłowo ułatwia zsuwanie się śniegu. Rozmieszczenie podpór oraz wejść tworzy taką konfigurację, że nie powstaje zagrożenie dla ludzi i mienia. Amfiteatr w Wiśle jest chyba jedynym obiektem, w którym mimo zimowej aury odbywały się duże imprezy. Podczas Zimowych Igrzysk Olimpijskich w Vancouver w amfiteatrze odbywały się transmisje skoków narciarskich słynnego mieszkańca Wisły – Adama Małysza. Przy ujemnej temperaturze, w śniegu, z pochodnia- mi utworzono namiastkę igrzysk.



Il. 328. Po opadach śniegu w Wiśle

6.3.7. Usuwanie ręczne

Niezależnie od tego, czy obiekt ma system monitoringu czy tylko gospodarz wizualnie obserwuje zadaszenie, to człowiek podejmuje decyzję, co zrobić w przypadku niebezpieczeństwa. Jeśli ilość śniegu znacznie przekracza dopuszczalne wielkości, to niezbędne jest jego usunięcie. Jest to możliwe pod warunkiem właściwego ukształtowania zadaszenia.

Wytrzymałość membrany pozwala na przemieszczanie się po niej pojedynczych osób. Mogą one, używając odpowiedniego zabezpieczenia, usuwać śnieg. Przy czym nie wolno używać ani ostrych narzędzi, ani nieodpowiedniego obuwia, aby nie uszkodzić membrany. Najlepiej, aby podczas usuwania śniegu pozostawić dolną warstwę, przylegającą do membrany. Nie dochodziłoby wtedy do przypadkowego zdzierania warstw ochronnych membrany.



Il. 329. Odśnieżanie zadaszenia membranowego

Sam proces usuwania śniegu musi być prowadzony przez wyspecjalizowane ekipy. Istotne jest, aby nie tylko potrafiły poruszać się na dużych wysokościach, ale aby były świadome, że zmieniający się rozkład obciążeń bardzo istotnie wpływa na pracę całego ustroju. Niebezpieczne jest gromadzenie śniegu w jednym miejscu, aby go później przesunąć w inne. Tworzenie pryzmy może spowodować lokalne przekroczenie wytrzymałości membrany i zniszczenie powłoki lub jeszcze gorzej – całej konstrukcji. Podobnie jest z poruszaniem się ludzi po membranie. Niedopuszczalne jest przebywanie w jednym miejscu kilku osób jednocześnie.

Ważne też jest, aby odśnieżanie odbywało się równomiernie i symetrycznie, aby brak obciążenia jednej strony nie doprowadził do przemieszczeń skutkujących zmianą układu statycznego, a w konsekwencji do zniszczenia membrany. Autorowi znany jest przypadek, kiedy częściowe zdjęcie warstwy śniegu spowodowało uszkodzenie konstrukcji podporowej. Wydawało się, że odśnieżanie kolejnych segmentów zadaszenia jest naturalne, ale doprowadziło to do momentu, w którym jedna strona zadaszenia była jeszcze mocno obciążona, a druga była już bez obciążenia. Dopóki nie przystąpiono do odśnieżania, konstrukcja stała stabilnie. Natomiast w momencie nierównomiernego obciążenia, stalowe kratownice uległy na tyle dużej deformacji, że trzeba było później wymienić kilka dźwigarów.

Przy tradycyjnych konstrukcjach obciążenie śniegiem stanowi tylko niewielki procent ciężaru własnego, natomiast przy zadaszeniach membranowych jest ono największe i to wiele razy przewyższające ciężar samej konstrukcji. Dlatego tak ważne jest opracowanie instrukcji procesu odśnieżania danego zadaszenia. Projektant powinien określić w niej: sposób wchodzenia na zadaszenie, sposób zabezpie-

czenia osób oraz narzędzi przed upadkiem oraz miejsce zrzucania śniegu. Cały proces powinien być wykonywany pod kontrolą odpowiedzialnych osób z odpowiednią wiedzą.

6.3.8. Podsumowanie sposobów zabezpieczenia przed śniegiem

Na podstawie przeanalizowanych przykładów można wskazać formy membran, które lepiej sprawdzają się przy obciążeniu śniegiem i nie stwarzają dodatkowych problemów podczas użytkowania w zimie. Przede wszystkim są to formy stożkowe. Zastosowano je w Węgierskiej Górcie, Łańcucie, centrum handlowym w Katowicach i klubie w Sopocie. Znajdujący się na środku zadaszenia słup podpira pierścieni, do którego zamocowana jest membrana. W Brennej zamiast wewnętrznego słupa jest zewnętrzny trójnóg, który podtrzymuje środkowy pierścień i nadaje membranie podobną formę. Dzięki temu, przy obfitych opadach śniegu, membrana ma solidne zamocowanie na środku, gdzie występuje największe obciążenie. Membrana przenosi tylko siły rozciągające, dlatego krawędzie brzegowe nie są podporami dla powłoki, tak jak w innych rodzajach konstrukcji. Występujące w formach stożkowych duże pochylenie, środkowej części membrany, przyspiesza proces samoczynnego zsuwania śniegu. Czasami fragmenty śniegu rozpędzają się i wypadają poza krawędź dachu. Mniejsze pochylenie przy krawędzi powoduje, że śnieg gromadzi się tam i dłużej zalega. Na szczęście jest to niżej i blisko krawędzi, gdzie łatwiej jest go usunąć.

Drugim korzystnym kształtem jest forma podparta łukami. Wysokie łuki podporowe nadają membranie duże pochylenie i odpowiednią krzywiznę. Śnieg zsuwa się zgodnie z liniami spadu, czyli od łuków na środek, a następnie na boki. Niestety środkowa część takiej formy położona jest prawie płasko, co sprzyja gromadzeniu śniegu. Można temu przeciwdziałać

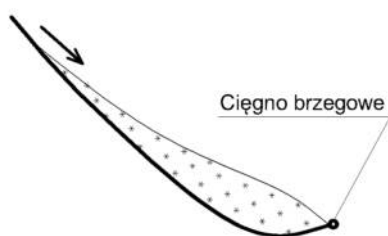
wprowadzając liny przeciwsniegowe, tworzące rodzaj dodatkowej, mocnej podpory. Powstaje wtedy krawędź, która przełamuje pokrywą śnieżną i przyspiesza proces samoczynnego odśnieżania. Natomiast wzdłuż krawędzi brzegowych nie powinno być dodatkowych, sztywnych elementów, aby nie ograniczały spadania śniegu. Powłoka w tych miejscach jest mocniej pochylona niż w pozostałej części.

Podobnie zachowują się formy siodłowe przy obciążeniu śniegiem. Brak jest co prawda łuków wzdłuż krawędzi, ale wysoko położone punkty podporowe nadają powłoce podobne pochylenie. Gorzej, gdy różnice wysokości są niewielkie i brak jest odpowiedniego pochylenia. Wprowadzenie liny przeciwsniegowej może podobnie wzmocnić zadaszenie, a występujące wiotkie krawędzie brzegowe ułatwiają spadanie śniegu z zadaszenia.

Forma fałdowa zapewnia duże pochylenie poszczególnych fragmentów powłoki, ale przesuwający się śnieg gromadzi się wzdłuż krawędzi koszowych. W tych miejscach znajdują się liny, które spełniają funkcję cięgien napinających powłokę, zabezpieczających ją przed poderwaniem przez wiatr. Natomiast nie są podporami i nie mogą przenosić obciążenia od śniegu. Dlatego cały ciężar śniegu przenoszony jest przez membranę rozpiętą między cięgnami grzbietowymi. Niestety małe pochylenie cięgien koszowych nie powoduje procesu przesuwania śniegu i samoczynnego odśnieżania, a nawet pojawia się zjawisko niejako klinowania śniegu w krawędziach koszowych. W przypadku bardzo intensywnych opadów konieczne jest przeprowadzenie ręcznego odśnieżania. Plusem tej formy jest to, że nie ma obawy przed niekontrolowanym spadaniem śniegu.

Wydaje się, że najgorszym rozwiązaniem, jeśli chodzi o obciążenia śniegiem, jest zastosowanie formy z falującą krawędzią. Mocne różni-

cowanie wysokości poszczególnych punktów brzegowych nadaje jej ciekawą postać wizualną. Niestety środkowa część powłoki nie jest niczym podparta, ponieważ jest oddalona od podpór. To powoduje, że wszystkie obciążenia bardzo mocno ją odkształcają. W dodatku najczęściej jest płaska i prawie pozioma, co potęguje efekt gromadzenia śniegu i wody. Nawet jeśli śnieg zacznie się topić, to nie przesuwa się w kierunku krawędzi brzegowych. Dlatego należy unikać takich form w naszym klimacie. Pewnym rozwiązaniem jest stosowanie dużego otworu w środkowej części lub nawet obniżenie tej części przez wewnętrzny pierścień. Powstaje wtedy kształt zbliżony do leja. Należy pamiętać, aby średnica zastosowanego otworu pozwalała na swobodne spadanie śniegu. W takim przypadku membrana mniej chroni przed opadami, a jedynie zbiera je w jedno miejsce. Należy pamiętać o odpowiednim zabezpieczeniu przestrzeni poniżej zadaszenia, aby nie było problemu ze spadającym śniegiem.



Il. 330. Próg utrudniający spadanie śniegu

Na podstawie sytuacji przedstawionej na il. 324, do której doszło w Sopotcie, można powiedzieć, że krawędzie brzegowe nie powinny być sztywne, a ciężna brzegowe nie powinny być mocno naprężone. Jeśli przewidywane jest, że śnieg będzie tam spadał, to napięcie ciężna brzegowego powinno być zbliżone do napięcia membrany, aby nie tworzyły się progi utrudniające spadanie śniegu. Napięcie ciężna związane jest między innymi z jego

kształtem. Im bardziej jest wyprostowane, tym większe przenosi siły. Jeśli wygięcie linii brzegowej jest większe, to siły wewnętrzne są mniejsze, to znaczy bardziej zbliżone do sił wewnętrznych w membranie; czyli, aby zmniejszyć różnicę pomiędzy siłami w ciężnie a siłami w membranie należy zastosować większe wycięcia. Powinno to być zastosowane przynajmniej wzdłuż krawędzi dolnych, gdzie przewidywane jest spadanie śniegu z zadaszenia. Poza tym w projekcie należy przewidzieć miejsce na ewentualne zrzucanie śniegu.

Niektóre pierwotne koncepcje architektoniczne w trakcie uzgodnień z konstruktorem lub wykonawcą membrany musiały być zmienione. Najczęściej wynikało to z konieczności uzyskania odpowiedniego pochylenia lub krzywizny. Zdarzały się pomysły, których nie można było zrealizować, np. „szczelina do usuwania śniegu” w naprężonej membranie.

Zaobserwowano, że w niektórych realizacjach podstawowym sposobem zabezpieczenia membrany przed śniegiem jest zwiększona liczba elementów podporowych. Przewidywany jest taki układ konstrukcji, który przeniesie obciążenia nawet przy ponadnormatywnych opadach śniegu, bez nadmiernego obciążenia membrany, ale w takich przypadkach membrana spełnia tylko rolę materiału pokryciowego, bez wykorzystania jej wszystkich możliwości.

Tabela 13

Sposoby zabezpieczenia przed śniegiem

	Zastosowane rozwiązanie	Przykład	Uwagi
1.	duże pochylenie	<ul style="list-style-type: none"> – Bytom – stadion – Częstochowa – stadion – Łańcut – storczykarnia – Warszawa – amfiteatr Sowińskiego 	wymaga wysokich podpór; duże różnice wysokości powodują, że zadaszenie mniej chroni
2.	lina przeciwsniegowa	<ul style="list-style-type: none"> – Ustroń – amfiteatr – Sęczyca – amfiteatr – Wrocław – dworzec 	dobrze rozwiązanie, zwiększa wytrzymałość powłoki, ale musi być właściwie umieszczona, aby nie tworzyła progów utrudniających zsuwanie śniegu
3.	kable grzejne	<ul style="list-style-type: none"> – Poznań – stadion – Sulejówkę – stadion 	z obserwacji wynika, że nie spełniają swojej funkcji na zadaszeniach membranowych
4.	bufory brzegowe	<ul style="list-style-type: none"> – Gdynia – stacje paliwowe – Brenna – amfiteatr – Warszawa – stadion miejski 	powodują częściowe przysłanianie zadaszenia, psują wizualną lekkość membrany, ale zwiększają bezpieczeństwo pod brzegiem zadaszenia
5.	dotatkowa podpora	<ul style="list-style-type: none"> – Sopot – klub muzyczny 	ciekawe rozwiązanie, choć nie wszędzie możliwe
6.	gęsty rozstaw podpór	<ul style="list-style-type: none"> – Opole – amfiteatr – Chojnice – stadion – Gdynia – stadion – Sopot – Opera Leśna (nad antresolą) 	nie zawsze uzasadniony – wynika raczej z braku zrozumienia właściwości membrany i próby ukształtowania niezgodnego z jej naturą
7.	małe wymiary	<ul style="list-style-type: none"> – Katowice – bank – Ełk – scena 	nie stwarza problemu, ale też mało chroni
8.	usuwanie ręczne	<ul style="list-style-type: none"> – Płock – amfiteatr – Warszawa – Stadion Narodowy – Szczecin – Amfiteatr – Warszawa – pętla autobusowa 	trudne rozwiązanie – powinno być wykonywane tylko w razie konieczności, należy przygotować zadaszenie, narzędzia, ludzi itp., może prowadzić do uszkodzenia membrany, dlatego w miarę możliwości należy go unikać
9.	ruchomy dach	<ul style="list-style-type: none"> – Kielce – amfiteatr – Warszawa – Stadion Narodowy 	bardzo drogie rozwiązanie, uzasadnione tylko w prestiżowych obiektach

cd. tabeli 13

10.	zdejmowany dach	– Rowy – scena – Zubrzyca górna – scena	drogie rozwiązanie, bo wiąże się z corocznymi pracami, ale nie stwarza problemów w zimie
11.	zdejmowany fartuch	– Poznań – kolejka górską	częściowy demontaż zadaszenia może być dobrym i najtańszym rozwiązaniem, pod warunkiem prawidłowo zaprojektowanej konstrukcji
12.	monitoring konstrukcji	– Płock – amfiteatr – Sopot – Opera Leśna – Warszawa – Stadion Narodowy	dobre rozwiązanie, uzasadnione tylko w największych obiektach, w mniejszych można przewidzieć inne sposoby informowania o wielkości przemieszczeń

Źródło: opracowanie własne

6.4. Korzyści zacienienia

Zadaszenia membranowe stawiane w Polsce pełnią dwie podstawowe funkcje: ochronę przed promieniowaniem słonecznym i ochronę przed opadami deszczu. O skuteczności danego zadaszenia podczas deszczu świadczy mokra posadzka. Zależy to przede wszystkim od wysokości, na jakiej znajduje się zadaszenie oraz prędkości wiatru, który zmienia kierunek spadania kropli. Dużo trudniej jest sprecyzować, na ile skuteczne jest zadaszenie w okresie letnim, w upalne dni, kiedy powinno chronić przed intensywnym promieniowaniem słonecznym. Dzięki wykorzystaniu membrany pod zadaszeniem nie jest ciemno jak pod typowymi zadaszeniami pokrytymi dachówką, papą czy blachą. Poza tym biała tkanina odbija promieniowanie słoneczne, co lokalnie obniża temperaturę.

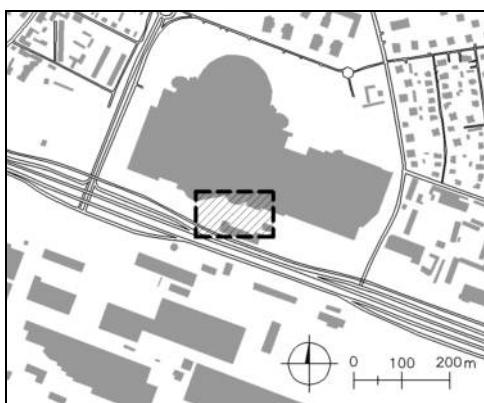
Aby określić skuteczność zacieniania przestrzeni znajdującej się pod zadaszeniem membranowym, przeprowadzone zostały badania. Przede wszystkim dotyczyły one wpływu takiego zadaszenia na mikroklimat pod nim. Ponieważ większość takich zadaszeń to budowle otwarte, więc wymiana powietrza jest

swobodna. Jedynie od góry zadaszenie stanowi barierę częściowo ograniczającą przepływ powietrza. Aby przeprowadzić pomiary w przestrzeni otwartej, ale pozbawionej wpływu zewnętrznych czynników, np. zjawisk atmosferycznych, niezbędne byłoby wykonanie skomplikowanej instalacji pomiarowej. Poza tym, aby wyniki pozwoliły wysunąć, niezależne wnioski, należało wykluczyć wpływ innych czynników.

Dla przeprowadzenia tego typu pomiarów poszukiwano zadaszenia o znacznych wymiarach, znajdującego się w przestrzeni otwartej. Poza tym, aby nie potrzeba było wykonywać skomplikowanej instalacji pomiarowej, poszukiwano miejsca, gdzie można uprościć pomiary, np. miejsca, gdzie występują materiały, o podobnych właściwościach. Kolejnym problemem był wpływ warunków atmosferycznych na otwartą przestrzeń. Podmuchy wiatru w przestrzeni otwartej gwałtownie zmieniają warunki środowiska. Dlatego pomiary przeprowadzono w dniu, kiedy przewidywane były wyjątkowe warunki atmosferyczne. Dostyc dużo czasu trzeba było poświęcić na oczekiwanie i obserwacje prognoz meteorologicznych, aby uzyskać bardzo intensywne promie-

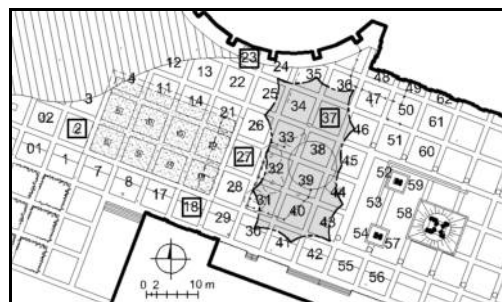
niowanie słoneczne, bardzo wysoką temperaturę i bezwietrzną pogodę.

Po przeanalizowaniu możliwości zrealizowania takich pomiarów autor podjął decyzję o wyborze przestrzeni pod zadaszeniem przed wejściem do centrum handlowego w Katowicach. Wybór tego obiektu dawał możliwość precyzyjnego określenia na ile znajdujące się tam zadaszenie zmienia temperaturę przestrzeni, w której intensywnie przebywają ludzie. Uniemożliwiało także zastosowanie instalacji pomiarowych, które przeszkadzałyby w użytkowaniu obiektu, zwłaszcza w pobliżu jego wejścia.



Il. 331. Miejsce przeprowadzenia pomiarów

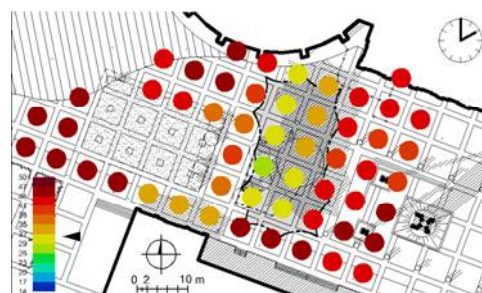
Ostatecznie badania zostały ograniczone jedynie do pomiaru temperatury posadzki. Wykonane zostały za pomocą pirometru z laserowym celownikiem wskazującym miejsce pomiaru. Pozwoliło to na kontrolę mierzonego materiału, aby pominąć wpływ jego właściwości. Próba użycia kamery termowizyjnej wiązała się z tym, że uzyskany obraz przedstawiałby temperaturę wszystkich występujących w danym obszarze materiałów. Poza tym nie ma możliwości jednoczesnego objęcia całego obszaru pomiarowego, zwłaszcza tego, który



Il. 332. Położenie punktów pomiarowych

znajduje się pod zadaszeniem. Dodatkowo istotne w pomiarach były zmiany temperatury, które dokonywały się w określonym czasie. Dzięki wykorzystaniu bezdotykowego pirometru można było precyzyjnie i szybko wykonać pomiary w kilkudziesięciu punktach.

Wyniki pomiarów zostały zestawione z precyzyjnymi danymi meteorologicznymi uzyskanymi ze stacji pomiarowej Głównego Instytutu Górniczego, znajdującej się w tej samej dzielnicy Katowic.

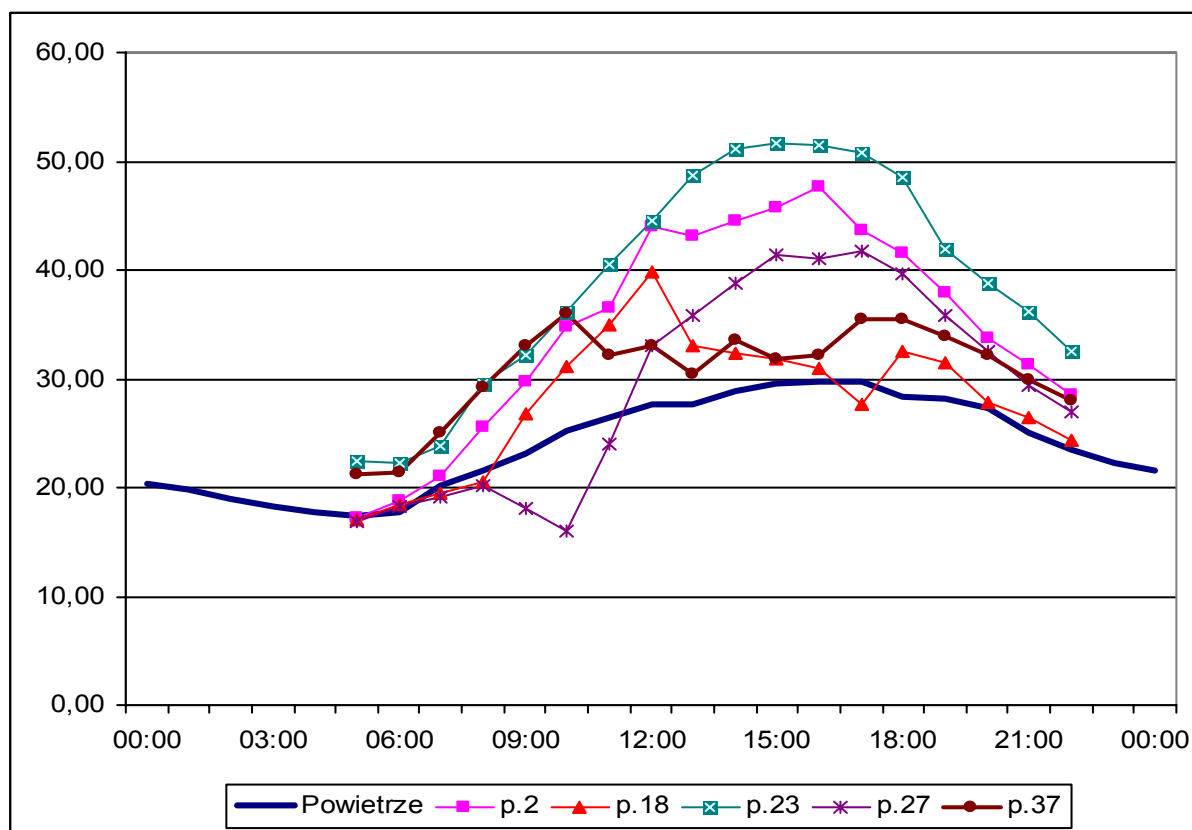


Il. 333. Rozkład temperatury posadzki o godzinie 14:00

Szczegółowo zostało wszystko opisane w autorskiej publikacji w 2014 roku³¹⁰. Poza precyzyjnymi wynikami w poszczególnych punktach pomiarowych zostały wysunięte następujące wnioski:

- w miejscach oświetlonych przez cały dzień posadzka osiąga najwyższą temperaturę między godzinami 12:00 a 18:00,

³¹⁰ Krzysztof Gerlic, *The membrane roof effect on the microclimate of open space of a mall in Katowice*, [in:] *Lightweight structures in civil engineering. Contemporary problems*. Monograph from Scientific Conference of IASS Polish Chapters. XX LSCE 2014, Warsaw, 25-28 September 2014, (eds.) J.B. Obrębski. Warsaw 2014.



II. 334. Porównanie zmian temperatury w wybranych punktach do temperatury powietrza

- przy bardzo intensywnym nasłonecznieniu temperatura posadzki pod zadaszeniem może być nawet o 20°C niższa niż poza nim,
- temperatura posadzki utrzymuje się na poziomie zbliżonym do temperatury, jaką osiągnęła w momencie, gdy zadaszenie rozpoczęło rzucać na nią cień, czyli temperatura powietrza pod zadaszeniem mniej wpływa na wzrost temperatury posadzki niż bezpośrednie działanie promieni słonecznych,
- o godzinie 22:00 (4 godziny po zachodzie słońca) temperatura zaczyna się wyrównywać, czyli można przyjąć, że jest to czas, w którym następuje wymiana zgromadzonego ciepła,
- przy braku intensywnych podmuchów wiatru, pod zadaszeniem wolniej spada temperatura posadzki, a w nocy utrzymuje się różnica około 2-3°C.

Można założyć, że zadaszenie znajdujące się np. na stadionie podobnie chroni przed nagrzewaniem tych sektorów, na które pada cień. Natomiast mniejszy przepływ powietrza, spowodowany ukształtowaniem trybun, może powodować większy wzrost temperatury – posadzki i siedzeń, w przestrzeni, gdzie przebywają widzowie.

Dobrym przykładem wykorzystania zadaszenia membranowego w przestrzeni publicznej jest pętla autobusowa w Warszawie. Zadaszenie jest prawie płaskie, co powoduje, że wszystkie perony mają podobną osłonę przed intensywnym promieniowaniem słonecznym w okresie letnim. Natomiast w okresie zimowym promienie słoneczne głęboko docierają pod zadaszenie, ze względu na większą wysokość od strony południowej.

6.5. Zapewnienie trwałości

Membrana jest delikatnym materiałem budowlanym. Może służyć przez wiele lat, pod warunkiem, że nie ulegnie celowemu lub przypadkowemu uszkodzeniu. Do takich zdarzeń może dojść podczas transportu, montażu, ale też podczas użytkowania, np. mycia, odśnieżania, a nawet instalowania scenografii. W obiektach takich jak amfiteatry często umieszczane są dodatkowe elementy dekoracji oraz ciężkie systemy nagłośnienia i oświetlenia. Aby je podnieść na odpowiednią wysokość, potrzebne są dodatkowe konstrukcje. Niezbędne jest wtedy użycie ciężkiego sprzętu: różnego rodzaju dźwigów lub podnośników. Trudno jest precyzyjnie nimi operować, zwłaszcza pod zadaszeniem. Projektując takie zadaszenie, należy przewidzieć i umieścić dodatkowe elementy konstrukcji, służące do mocowania tego typu systemów. W niektórych obiektach zgłaszane były problemy braku możliwości zamocowania do membrany, np. oświetlenia. W każdym rodzaju zadaszenia można wprowadzić dodatkowe obciążenia jedynie w miejscach do tego przygotowanych. Nie jest to wina zastosowanego materiału, ale źle zaprojektowanego zadaszenia, konstrukcji nieprzygotowanej do dodatkowego obciążenia.



Il. 335. Naprawiony fragment membrany

Niebezpieczny też jest proces odśnieżania, ponieważ nieumiejętne użycie ostrych narzędzi lub niewłaściwego obuwia osób poruszających się po membranie może doprowadzić do lokalnych rozdarć. Nawet zamrznięta woda na powierzchni membrany może mieć ostre krawędzie i próba przesuwania takiego lodu może przeciąć membranę. W niektórych obiektach autor zauważył, że w rejonie zamocowania, bezpośrednio pod membraną znajdują się wystające elementy konstrukcji. Podczas chodzenia po zadaszeniu nogi najczęściej stawiane są w miejscach, gdzie znajduje się konstrukcja podtrzymująca, ponieważ membrana jest śliska i mocno się ugina. Chodzenie po samej membranie wymaga odwagi i umiejętności, a zwłaszcza pokonania obaw o jej wytrzymałość. Natomiast stawianie stóp na ostrych elementach może powodować uszkodzenie membrany. Skrajnym przypadkiem jest zadaszenie, w którym niektóre zamocowania zostały wykonane z wystającymi w górę niezabezpieczonymi śrubami. Dlatego proces odśnieżania należy wykonywać tylko w wyjątkowych przypadkach.

Podmuchy wiatru lub obciążenie śniegiem powodują duże przemieszczenia membrany. Jeśli powłoka będzie umieszczona w niewielkiej odległości od niezabezpieczonych elementów konstrukcji lub instalacji, to może dojść do jej przetarcia lub przebicia. Dlatego ważne jest przewidywanie zachowania struktury membrany pod wpływem obciążeń. W innych rodzajach konstrukcji odkształcenia te są wyraźnie mniejsze.

Inną przyczyną uszkodzeń są celowe działania, które pojawiają się w przypadku obiektów ogólnodostępnych. Mała wysokość, brak ogrodzenia oraz brak monitoringu obiektu powodują, że wandalę próbują podziurawić membranę, pociąć ją lub nawet podpalić. Dlatego bardzo istotne jest należyte zabezpieczenie przed do-

stępem osób niepowołanych. Materiały dopuszczone do użycia w zadaszeniach membranowych nie mogą być palne, dlatego nie ma obawy o spalenie całego zadaszenia. Niestety próby przyłożenia otwartego ognia, np. zapalniczki albo rac, powodują lokalne przedziurawienie membrany. Tego typu uszkodzenie obniża estetykę powłoki i trudno je naprawić. Nawet niewielkie uszkodzenie może być początkiem dalszego, bardzo szybkiego procesu niszczenia całej membrany. Bardzo ważne dla gospodarza obiektu jest niezwłoczne naprawianie takich uszkodzeń. Aby zabezpieczyć takie miejsce, konieczne jest naklejenie kawałka materiału. Wprowadzenie dodatkowej warstwy często powoduje, że naprawa jest bardziej widoczna niż samo uszkodzenie. Transparentność materiału sprawia, że nie można ukryć takiego miejsca. Naklejenie takiej warstwy jest jednak konieczne, aby zatrzymać proces rozrywania membrany.



Il. 336. Uszkodzenie spowodowane racą

W przypadku uszkodzenia innych materiałów budowlanych można stosować różnego rodzaju metody wypełniania uszkodzeń i pokrywania warstwami maskującymi. Natomiast w przypadku membran przepuszczających światło jedynie wymiana uszkodzonego panelu likwiduje całokształt skutki uszkodzenia. Jeśli wielkość danej membrany nie jest zbyt duża, to można zastosować takie rozwiązanie. Niestety

panele w większości obiektów mają znaczne wymiary. Poza tym membrany zwykle są tak projektowane, aby minimalizować liczbę połączeń i szwów. Aby zapewnić szczelność, połączenia poszczególnych płatów, dodatkowo są zakrywane pasami materiału, które zgrzewane są na miejscu. Próba wymiany wiąże się z koniecznością uszkodzenia tych elementów. Analizując membrany w wybranych obiektach, zauważono ciekawą metodę maskowania uszkodzeń przez stosowanie nakładek kształtem przypominających liście. Zadaszenia często znajdują się w pobliżu drzew, dlatego liść leżący na membranie wygląda bardziej naturalnie niż prostokątny, mniej przezroczysty element.



Il. 337. Naklejka w kształcie liścia

Poza uszkodzeniami mechanicznymi tkaniny może dochodzić do uszkodzenia warstwy ochronnej. Są one mniej widoczne, ale powodują szybsze zużycie i zmianę parametrów, np. wymagają częstszego mycia, o czym jest mowa w następnym rozdziale.

Podsumowując najprostszym sposobem ochrony membrany przed uszkodzeniami jest umieszczenie jej na dużej wysokości. Mimo braku ograniczeń w dostępie do niektórych zadaszeń, to w analizowanych obiektach nie zaobserwowano zbyt dużej liczby uszkodzeń.

6.6. Zapewnienie czystości

Każdy z materiałów budowlanych po pewnym czasie traci swoje początkowe właściwości. Membrana ze względu na swój kolor, zwykle bardzo jasny, ulega zabrudzeniom, traci na połysku i zaczyna być matowa. Poza tym brud zmniejsza przepuszczanie światła dziennego, co powoduje, że pod zadaszeniem widać ciemniejsze plamy. Ostatecznie całe zadaszenie traci na estetyce i atrakcyjności. Próbą zaradzenia tym problemom jest stosowanie materiałów nieprzepuszczających światła typu *blackout*. W takim przypadku pod zadaszeniem jest ciemno nawet, jeśli wykonane jest ono w kolorze srebrnym. Bardziej wtedy przypomina pokrycie blachą, a w okresie letnim mocno się nagrzewa.



Il. 338. Proces mycia zadaszenia

Aby przywrócić początkowe cechy każdego materiału, można odświeżyć go przez odpowiednie czyszczenie. Ze względu na kształt danego zadaszenia, jego powierzchnię i wysokość, proces mycia jest często skomplikowany. Na pewno nie wolno stosować myjek wysokociśnieniowych, gdyż może to spowodować pęknięcie lub nawet zdzieranie powłoki ochronnej. Podobnie może stać się w przypadku stosowania niewłaściwych środków chemicznych, które mogą nawet rozpuścić warstwy ochronne. Membrana wtedy zaczyna szybciej ulegać zabrudzeniu i jeszcze częściej trzeba ją czy-

ścić. Dopuszczalne jest jedynie ręczne, delikatne przecieranie membrany z odpowiednimi środkami zalecanymi przez producenta. Poza tym, mogą je wykonać jedynie wyspecjalizowane ekipy a to wyraźnie zwiększa to koszty. Konieczne jest odpowiednie wykształcenie i stosowanie środków zapewniających bezpieczeństwo. Dlatego stale poszukiwane są takie materiały, których nie trzeba często myć.

Przywieranie brudu zależy od właściwości danego materiału. Powierzchnia tkaniny bazowej nie jest gładka, gdyż uzyskiwana jest z przeplatania nitek przędzy. Powoduje to gromadzenie się we wszystkich zagłębieniach drobnych nieczystości. Aby temu zapobiegać, tkaniny techniczne używane w budownictwie pokryte są dodatkowymi warstwami, które zwiększają odporność na zabrudzenie i promieniowanie ultrafioletowe. Najlepsze efekty dają membrany samoczyszczące (*self cleaning*). Tkanina z włókien szklanych pokrytych PTFE pozwala na zminimalizowanie przywierania brudu do powłoki. Właściwości chemiczne PTFE powodują, że nie łączy się on z innymi związkami chemicznymi i brud nie przywiera do powierzchni. Nawet małe ilości wody deszczowej powodują wypłukiwanie drobnych cząstek kurzu i przywrócenie stanu początkowego membrany. Niestety materiał ten jest droższy. W Polsce jedynie 8 obiektów z 39 opisanych ma zastosowaną membranę z włókien szklanych pokrytych PTFE. Materiał ten lepiej przepuszcza światło, co zostało już przedstawione na il. 173.

Tańszym rozwiązaniem jest stosowanie tkaniny z włókien poliestrowych pokrytych PCW. Pokrycie chroni tkaninę bazową przed promieniowaniem ultrafioletowym oraz wyrównuje nierówności powierzchni. Ze względu na niskie koszty jest materiałem bardzo często stosowanym. Niestety właściwości PCW powodują, że materiał ten elektryzuje się, a to przy-

spiesza proces przylegania brudu. Obecnie stosowane materiały pokryte są dodatkowymi, zewnętrznymi warstwami ochronnymi na bazie fluoru, przypominającymi lakierowanie powłoki.

Wszystkie dodatkowe powłoki nie są zbyt trwałe i podczas transportu, montażu, a przede wszystkim podczas chodzenia po membranie może dochodzić do ich uszkodzenia. Niestety przy odśnieżaniu i myciu jest to konieczne.

Producenci materiałów starają się uzyskać bardziej gładką powierzchnię przez wprowadzenie naprężenia wstępnego przędzy podczas procesu powlekania PCW. Jak twierdzą, takie naprężenie przędzy powoduje wyprostowanie włókien i polepsza właściwości membrany, a nawet zmienia wytrzymałość materiału. Już wcześniej zauważono, że stosowanie w tkaninie bazowej splotu panama zamiast splotu płóciennego jest bardziej korzystne. Jest to splot uzyskiwany z na przemian przeplecionych dwóch włókien przędzy, a nie pojedynczych, jak w przypadku splotu płóciennego.



Il. 339. Rozwój glonów w miejscu zastoju

Poza wyborem odpowiedniego materiału ważny jest właściwy kształt, pozbawiony zagłębień, nierówności i fałd. Jak to już parę razy zostało wyjaśnione, można to uzyskać przez właściwe przygotowanie geometrii powłoki i odpowiednie naprężenie membrany.

Wszystkie zadaszenia narażone są na zabrudzenia od góry ze względu na opadający kurz. Dlatego projektant powinien przede wszystkim przewidzieć możliwość zmycia membrany od góry. W przypadku zadaszenia na dworcu kolejowym zauważono zabrudzenia od dołu membrany. Były to ślady spalin z lokomotywy. Najprawdopodobniej spowodowane to było niesprawnym silnikiem. Niestety, może się okazać, że próba wyczyszczenia membrany od dołu jest bardziej niebezpieczna, ze względu na sieć trakcyjną znajdującą się pod zadaszeniem.



Il. 340. Ślady usuwania brudu na membranie

Najmocniej widoczne zabrudzenia zaobserwowano w pobliżu drzew. Opadające liście, może związki organiczne z drzew lub żerujących na nich owadów powodują najbardziej intensywne zabrudzenia. Inne przyczyny mocniejszych zabrudzeń to duże zanieczyszczenie środowiska i większa wilgotność powietrza. Membrana ulega mocniejszemu zabrudzeniu w miejscach, gdzie jest dłużej mokra i wolniej wysycha po opadach. Może to wynikać z mniejszego pochylenia, gorszej orientacji względem stron świata lub gorszego przewietrzania. Na il. 339 widoczna jest zmiana barwy spowodowana rozwojem glonów w zastoju wodnym, w obniżeniu membrany. Jak wynika z przeprowadzonych analiz kształt zadaszenia

wpływa również na zachowanie czystości membrany.

Jeśli warstwa brudu jest równomierna, to prawie nie jest zauważalna, ale za to widoczne są miejsca przetarcia, lokalnego czyszczenia membrany, ocierających się gałęzi, swobodnie leżących linek, a nawet napisów i rysunków wykonanych palcem.

Występujące, w różnych miejscach, brudne zadaszenia membranowe mogą powodować zniechęcenie do stosowania tego typu rozwiązań budowlanych. Tkanina techniczna jest wtedy postrzegana, jako zło konieczne, a nie jako profesjonalny, wysokiej klasy materiał budowlany. Często membrany porównywane są ze szkłem, które jest idealnie czyste. Jednak w tym przypadku pomijany jest problem, ile „potrzeba zachodu”, aby utrzymać je w takim stanie. Poza tym nieporównywalny jest ciężar całej konstrukcji potrzebnej do utrzymania pokrycia szklanego. Ciekawe, że membrany nie są porównywane z innymi materiałami budowlanymi, które może rzadziej, ale też trzeba czyścić.

Stosowanie zadaszeń membranowych w miejscach narażonych na zwiększone zanieczyszczenie powietrza lub w pobliżu wysokich drzew nie jest najlepszym rozwiązaniem. Jeśli walory jasnej, przepuszczającej membrany mają stanowić o atrakcji danego obiektu, to należy wziąć pod uwagę konieczność częstego i kosztownego mycia membrany. Przy projekcie należy wtedy uwzględnić miejsca zamocowań dla ekip utrzymujących powierzchnię membrany w należyтым stanie. Należy przewidzieć możliwość w miarę prostego wejścia i zapewnienie miejsca na potrzebny sprzęt.

6.7. Odbijanie światła

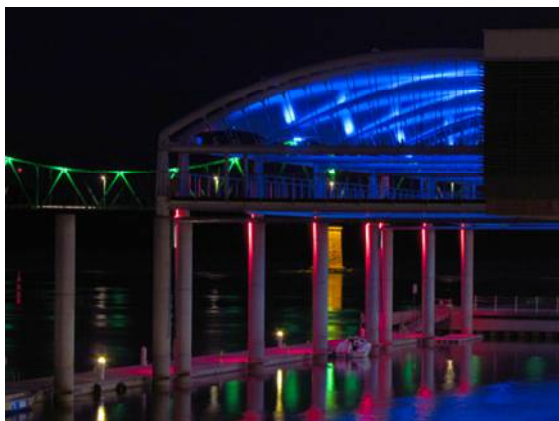
Materiał membrany odbija światło słoneczne i zapewnia przyjemny cień poniżej zadaszenia. Dobrze też odbija światło sztuczne, co często wykorzystywane jest przez architektów przy tworzeniu iluminacji. Odpowiednio dobrana forma zadaszenia, właściwie umieszczone reflektory pozwalają na tworzenie niesamowitych nocnych scenografii. Światło może być odbijane zarówno po stronie zewnętrznej, jak i wewnętrznej membrany. Prawie wszystkie analizowane obiekty są podświetlone i wykorzystywane, jako elementy nocnego krajobrazu.



Il. 341. Podświetlenie amfiteatru w Płocku

Przykładem jest zadaszenie amfiteatru w Płocku, które widoczne jest na tle panoramy doliny Wisły. Zadaszenie to obserwowane jest z góry, od strony starego miasta. Duża, biała powierzchnia podświetlona bezbarwnym światłem wyraźnie kontrastuje z nocnym krajobrazem. Znajdujące się w pobliżu moło oraz dalej położony most przez Wisłę podświetlone są kolorowymi reflektorami.

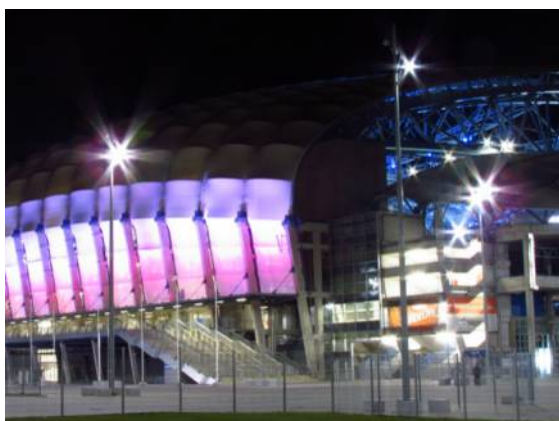
Innym przykładem jest przystań we Włocławku. W tym przypadku membrana została podświetlona na niebiesko tak, jak górna część konstrukcji. Natomiast dolna część, znajdująca się przy wodzie, dla kontrastu została podświet-



Il. 342. Podświetlenie przystani we Włocławku

łona na kolor czerwony. Znajdujący się w pobliżu most przez Wisłę podświetlony jest na kolor zielony. Razem z odbiciami w wodzie powstaje niesamowita gra barw.

Neutralny, biały kolor membrany pozwala na podświetlenie dowolną barwą. Przykładem jest podświetlenie stadionu w Poznaniu. Zastosowana iluminacja powoduje, że co jakiś czas zmienia się kolor podświetlenia, dzięki czemu zmienia się wizualnie cały obiekt.



Il. 343. Podświetlenie stadionu w Poznaniu

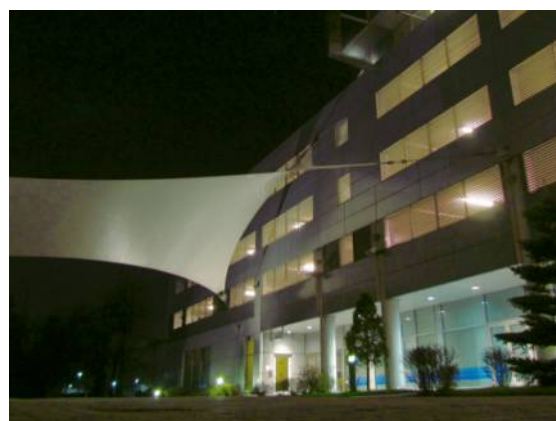
Często zadaszenia membranowe wykorzystywane są, jako odbłyśniki, dla podświetlenia wnętrza. Przykładem, który już został wcześniej omówiony (il. 196) są stałe zadaszenia przy plaży w Gdyni. Ich główną funkcją jest odbijanie światła. Nawet przez wykonawcę nazywane są lampami, a nie zadaszeniami, ze względu na małe wymiary.

Innym przykładem wykorzystania membrany, jako odbłyśnika jest zadaszenie w Katowicach. Reflektory celowo skierowane są w kierunku membrany i podświetlają ją od dołu. Dopiero światło odbite powoduje bardzo równomierne oświetlenia przestrzeni poniżej. Duża po



Il. 344. Podświetlenie zadaszenia w Katowicach

wierzchnia odbicia sprawia, że światło nie rzuca ostrych cieni, a to jest bardzo korzystne dla oczu. Przebywając w tak oświetlonej przestrzeni nie odczuwa się zmęczenia wzroku. Część światła skierowanego na membranę przedostaje się na zewnątrz i powoduje efekt żarzenia się powłoki.



Il. 345. Podświetlenie zadaszenia pomiędzy budynkami w Katowicach

W niektórych przypadkach światło odbite od membrany przeszkadza, np. podczas wieczornych imprez w amfiteatrze. Dlatego celowo wygaszane jest podświetlenie, aby nie konku-

rowało ze światłem oświetlającym scenę i wykonawców. Membrana może też być wykorzystywana, jako ekran pozwalający na przedłużenie scenografii sceny, o czym już była mowa przy zadaszeniu amfiteatru w Kielcach.

Podsumowując, jasna powierzchnia membrany może zwiększać walory architektury przy sztucznym oświetleniu. W miejscach, które użytkowane są po zmroku można uzyskać efekty, które trudno jest osiągnąć innymi środkami. Przede wszystkim przebywanie w przestrzeni równomiernie oświetlonej, przez delikatnie rozproszone światło, bez efektu olśnienia, jest wyjątkowo pozytywnie odbierane przez użytkowników. Dodatkową korzyścią ze stosowania ciekawie ukształtowanych membran jest stworzenie charakterystycznych podświetlonych form, które stają się łatwo identyfikowanymi ikonami w nocnym krajobrazie miasta.

7. FORMY ZREALIZOWANYCH MEMBRAN

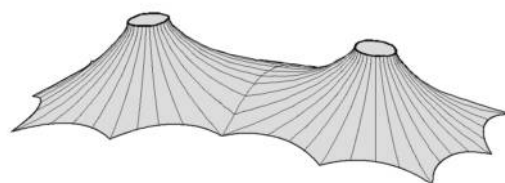
7.1. Zestawienie analizowanych przykładów

Na podstawie przeprowadzonej analizy poszczególnych obiektów można wskazać wspólne cechy, jakie występują w zadaszeniach membranowych. Zgodnie z głównym celem chodzi o formy napiętych powłok występujących w zadaszeniach. Powierzchnie te mogą być traktowane jak formy geometryczne. Autor w 2002 roku przedstawił³¹¹, które geometryczne zależności danej powierzchni są istotne w projektowaniu zadaszeń membranowych. Przede wszystkim są to:

- linie warstwic,
- linie spadu,
- linie wododziału,
- kierunki stycznych,
- promienie krzywizny,
- wielkości krzywizny.

Dodatkowym, widocznym elementem membrany są linie szwów. Związane są z formą, ale jej nie definiują. W niektórych przypadkach układ szwów ułatwił określenie, do jakiego typu zaklasyfikować formę danej membrany. Szwy są dobrze widoczne, gdyż w miejscu połączenia poszczególnych brytów nakładane są na siebie warstwy materiału. Powoduje to zmniejszanie przepuszczalności światła i szew jest ciemniejszy od pozostałej części materiału. Pod zadaszeniem bardzo dobrze widać rytm powtarzalnych wygiętych linii, które z cięgnami brzegowymi tworzą przestrzenną kompozycję podkreślającą złożoność formy, tak bardzo odróżniającą ją od ortogonalnych ele-

mentów architektury. Zrezygnowano jednak z analizy kierunków szwów, gdyż są bardziej związane z technologią wykonania danej membrany i przygotowaniem wykrojów. W kilku obiektach linie szwów zostały wykorzystane, jako elementy dekoracyjne membrany. Linie te przede wszystkim związane są z przebiegiem sił wewnętrznych w membranie. Gładka powierzchnia nie ujawnia nitek w tkaninie technicznej, ale jak podkreślają architekci – szwy pokazują strukturę powłoki.



Il. 346. Linie szwów na zadaszeniu

W tabeli 14 zostały przedstawione charakterystyczne wymiary analizowanych zadaszeń. Wymiary dotyczą największych paneli znajdujących się w danym zadaszeniu. Zostały też sklasyfikowane formy poszczególnych membrany. Kryterium określającym typy był układ elementów podporowych, do których zamocowana jest membrana, a w niektórych przypadkach, co wspomniano wyżej, układ szwów. Porównując kształty poszczególnych membrany, określono ich charakterystyczne cechy i wielkości. Wykorzystane do tego zostały modele komputerowe, aby nie wykonywać skomplikowanych pomiarów na wybranych

³¹¹ Krzysztof Gerlic, *Geometrical aspects of surface in the membrane structures designing*, [in:] *Lightweight structures in civil engineering*. International IASS symposium organized by Polish Chapter of International Association for Shell and Spatial Structures, Warsaw, 24-28 June 2002.

Tabela 14

Porównanie zadaszén

Nr	Obiekt	Pow. zadaszona [m ²]	Długość paneli [m]	Szer. rozpiętość [m]	Liczba paneli	Forma	
1.	Brenna – scena	343	5,7–10	–	1	stożkowa	
2.	Bydgoszcz – hotel	18	6,5	4,0	1	siodłowa	
		38	7,0	7,0	1	siodłowa	
		85	15,1	7,0	1	wieloboczna	
3.	Bytom – stadion	1 040	6 22	6,0 6,0	7 7	kolebkowa kolebko- wa/fałdowa	
4.	Chojnice – stadion	384	9,8	5,3/1,5	8	kolebkowa	
5.	Częstochowa – stadion	1 000	15	11	1	stożkowa	
6.	Elk – scena	164	16	11,0	1	kolebkowa	
7.	Gdynia – bulwar	320	2	–	34	stożkowa	
8.	Gdynia – stadion	10 040	18,5	10,0/5,0	36 16	kolebkowa kolebkowa	
9.	Gdynia – stacja paliwowa	300	7-9	–	1 3	stożkowa wieloboczna	
10.	Katowice – bank	162	15	18,0	1	siodłowa	
11.	Katowice – centrum handlowe	430	8,5	–	2	stożkowa	
12.	Kielce – amfiteatr	stałe	2 500	47	70/7,0	1	stożkowa
		ruch.	1 500	32	6,0	8	fałdowa
13.	Kołobrzeg – scena letnia	680	21	6,0	10	siodłowa/ fałdowa	
14.	Łagów – amfiteatr	175	11	6,0	1	kolebkowa	
15.	Łańcut – storczykarnia	178	6-10	–	1	stożkowa	
16.	Mragowo – amfiteatr	~1 200	28 2–7	24,0 –	1 2	kolebkowa lejowa	
17.	Opole – amfiteatr	356	10	2,0	1+1	kolebkowa	
18.	Płock – amfiteatr	2 800	36	4,5/3,0	24	kolebkowa/ stożkowa	
19.	Poznań – kolejka gór- ska	2 x 170	7,5	–	2	stożkowa	
20.	Poznań – stadion	~30 000	~90	9	80	kolebkowa	
21.	Puławy – stadion	3 036	13	8,4	11+12	kolebkowa kolebkowa	
			19	4,1	11		
22.	Rowy – scena	94	14	13,7	1+3+2	siodłowa	

cd. tabeli 14

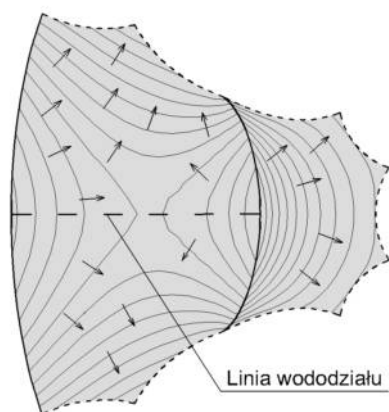
23.	Sopot – klub		2 300	5-12,5 5 10	– 4,8 12	5 18 1	stożkowa kolebkowa siodłowa
24.	Sopot – Opera Leśna	nieistn.	4 250	72	6	1	kolebkowa
		nowe	3 500 1 000	46 12	12-30 3,5	10 26	siodłowa kolebkowa
25.	Stężyca – scena		440	22	20	1	kolebkowa
26.	Szczecin – Teatr Letni		4 500	48	2,7	10	fałdowa
27.	Śliwice – amfiteatr		380	17	7,5/3	1	kolebkowa
28.	Sulejówek – stadion		450	9 3,3	3,3/1,5 3	3 10	fałdowa kolebkowa
29.	Ustroń – amfiteatr		1 700	48	32,0	2	kolebkowa
30.	Warszawa – pętla auto- busowa		3 260	47	14,2	5	fałdowa
31.	Warszawa – Stadion Narodowy	stałe	54 000	72	12/8,0	72	stożkowa
		ruch.	+10 000	50	7/3,5	1	kolebkowa
32.	Warszawa – amfiteatr Sowińskiego		3 100	73	9,0	6	fałdowa/ stożkowa
33.	Warszawa – amfiteatr Górczewska		1 700	28	6,0	14	fałdowa/ stożkowa
34.	Warszawa – stadion miejski		18 400	31 40	21 30	20 8	fałdowa fałdowa
35.	Węgierska Górka – scena		455	16–6	–	1	stożkowa
36.	Wisła – amfiteatr		1 890	45	21,0	2	kolebkowa
37.	Włocławek – przystań wodna		1 100	20	12,0/5,3	5	kolebkowa
38.	Wrocław – dworzec kolejowy		2 870	21	11,4	12	kolebkowa
39.	Zubrzyca Górna – am- fiteatr		156	15	15,0	1	wieloboczna

Źródło: opracowanie własne

objektach. Niestety autor miał jedynie dostęp do dokumentacji projektowej i zaledwie kilku modeli komputerowych przedstawiających powierzchnię napiętej membrany. Pozostałe modele zostały wyznaczone metodami uproszczonymi na podstawie wymiarów i położenia elementów podporowych.

7.2. Linie warstwic

Punkty powierzchni o tej samej wysokości nazywane są liniami warstwic. Na ich podstawie można określić kierunki spływania wody po membranie. Kierunki te nazywane są liniami spadów. Są one bezpośrednio związane z liniami warstwic, ponieważ są do nich prostopadłe.



Il. 347. Warstwice i kierunki spadów na powierzchni membrany w Ustronie

Na kolejnym zdjęciu pokazano ślady kropli rosy, które zostały zaobserwowane na zadaszaniu membranowym w Wiśle. Kierunki te potwierdzają spływanie wody niezależnie od układu szwów. Nawet pomiędzy poszczególnymi szwami spływająca woda delikatnie zmienia kierunek. Wynika to z położenia linii spadów w danym miejscu, czyli ściśle uzależnione jest od kształtu membrany. Podobne krzywoliniowe ślady, może mniej widoczne, zostały zaobserwowane w innych obiektach. Czasami śnieg pozostawia ślady przesuwania po membranie. Ślady takie czasami wykonują krople po wewnętrznej stronie membrany, jeśli dojdzie do kondensacji pary wodnej na chłodniejszej powierzchni membrany³¹².

Przedstawione na planie linie warstwic informują też o pochyleniu powierzchni. Jeśli odległości pomiędzy warstwicami są większe, to znaczy, że powierzchnia w tym miejscu ma mniejsze pochylenie i odwrotnie mniejsze odległości, to pochylenie jest większe. Dzięki temu można już na etapie koncepcji przewidzieć miejsce, w którym może tworzyć się niebezpieczny zastój, czyli worek wodny lub obciążenia bardzo precyzyjnie potrafią określić



Il. 348. Kierunki spływania wody po zadaszaniu w Wiśle

takie miejsca w zależności od przewidywanych obciążeń i założonego naprężenia wstępnego. Dla tradycyjnych pokryć dachowych pochylenie jest niejako przypisane do określonego rodzaju materiału pokryciowego. Producenci często zalecają minimalne i maksymalne pochylenie połaci. Natomiast w przypadku zadasznień membranowych, pochylenia bardzo mocno się różnią i przyjmują dowolne wartości. Porównanie ich przez wartości liczbowe nie wyjaśnia, jakie zależności występują na określonych powierzchniach. Dlatego wybrana została analiza przez porównanie planów warstwicowych. Przedstawione w tabeli plany zostały wykonane na podstawie modeli komputerowych i przedstawiają orientacyjne położenie linii warstwicowych. Modele te zostały uzyskane na podstawie udostępnionych dokumentacji projektowych przedstawiających poszczególne zadasznienia.

Podobnie jak w poprzednim rozdziale, wszystkie plany zostały przedstawione w skali 1:1000. W niektórych przykładach jest to bardzo dużym uproszczeniem, zwłaszcza, jeśli powłoki położone są prawie poziomo. Mimo tego zdecydowano się na takie rozwiązanie,

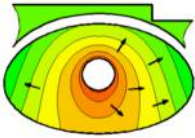

³¹² Bardziej szczegółowo jest to omówione na stronie 213.

aby można było porównać pochylenia niezależnie od wielkości poszczególnych zadaszeń. Chodziło bardziej o graficzne przedstawienie tych wielkości. Jak już wspomniano wcześniej, wartości liczbowe wbrew pozorom nie są aż tak precyzyjne. W zależności od kształtu, np. dla membrany podpartej łukami pochylenie w górnej części jest małe, a przy dolnych krawędziach duże. Natomiast w przypadku formy stożkowej pochylenia są odwrócone. Ważniejsze jest określenie wzajemnych relacji pomiędzy poszczególnymi fragmentami membrany, jaką mają wielkość i jakie pochylenie. Nawet poziomo położony fragment, jeśli tylko ma małą powierzchnię i jest dodatkowo podparty, nie powinien stwarzać problemów przy obciążeniu wodą lub śniegiem.

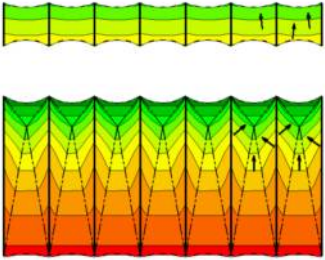
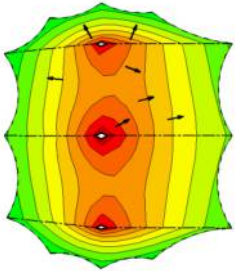
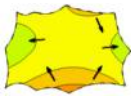
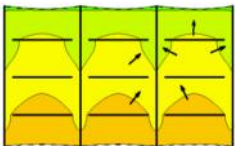
Pola pomiędzy warstwicami zabarwione zostały zgodnie ze skalą barwną stosowaną na hipsometriach. Kolor niebieski oznacza najniższą położoną membranę, a czerwony najwyżej. Poszczególne kolory nie są przypisane do konkretnych wysokości, ponieważ zadaszenia położone są na różnych wysokościach. Chodziło bardziej o zobrazowanie różnic pomiędzy najniższą i najwyższą częściami membrany. Przyjęto, że różnica wysokości pomiędzy poszczególnymi warstwicami wynosi 1 m. Na planach warstwicowych dodatkowo zostały zaznaczone kierunki linii spadów. Przedstawiono je w najbardziej charakterystycznych miejscach. Jak wspomniano wcześniej są one prostopadłe do linii warstwic, a kolory ułatwiają zorientowanie się, w którą stronę spływa woda.

Tabela 15

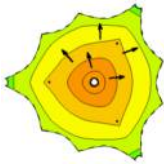
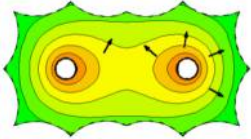
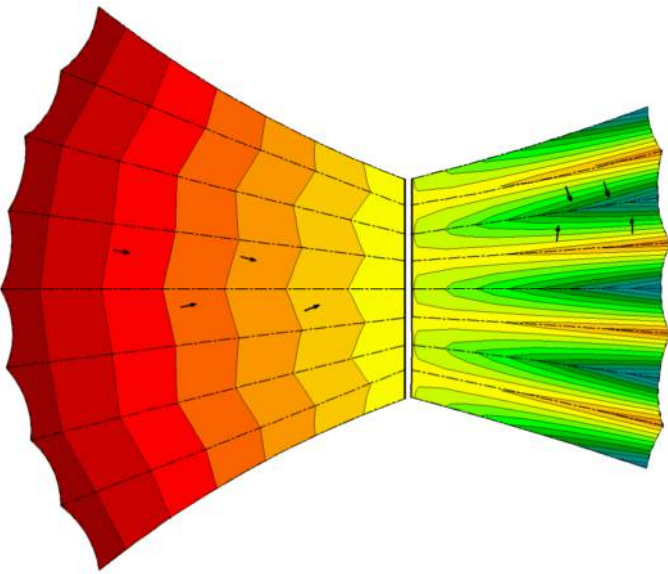
Układy linii warstwic na powierzchniach membran

Plan warstwicowy	Opis
<p data-bbox="199 1122 400 1151">Brenna amfiteatr</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="810 1122 1393 1227">– linie warstwic mają kształt zbliżony do owali położonych koncentrycznie wokół centralnego pierścienia; <li data-bbox="810 1234 1393 1301">– odległości pomiędzy warstwicami są małe, co wskazuje na duże pochylenie membrany; <li data-bbox="810 1308 1393 1375">– kierunki spadów są od środka ku bokom zadaszenia
<p data-bbox="199 1431 421 1460">Bydgoszcz – hotel</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="810 1431 1393 1536">– linie warstwic znajdują się jedynie w pobliżu dolnych punktów membrany, wynika to z małych różnic wysokości; <li data-bbox="810 1543 1393 1648">– odległości pomiędzy warstwicami, jak na tak małe zadaszenie, są stosunkowo duże, co wskazuje na małe pochylenie; <li data-bbox="810 1655 1393 1722">– kierunki spadów są do punktów niskich zadaszenia

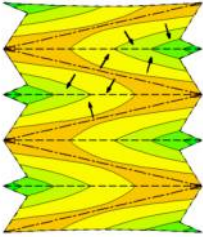

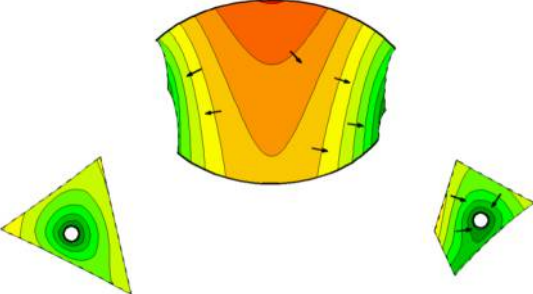

cd. tabeli 15

<p>Bytom – stadion</p> 	<p>część górna zadaszania:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt delikatnie wygiętych łuków; – odległości pomiędzy warstwicami są typowe; – kierunki spadów są prawie równoległe z dźwigarami mocującymi membranę. <p>część dolna zadaszania:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt zbliżony do linii łamanych, w górnej części są bardziej wyprostowane; – odległości pomiędzy warstwicami zmniejszają się w miarę obniżania; – kierunki spadów są od dźwigarów na środek paneli, a następnie środkiem w dół
<p>Częstochowa – stadion</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – górne linie warstwic mają kształt zbliżony do owali wokół środkowych punktów podparcia, dolne linie warstwic mają kształt zbliżony do owali przypominających zarys zadaszania; – odległości pomiędzy warstwicami są zbliżone do typowych, jedynie w częściach bocznych odległości są wyraźnie mniejsze; – kierunki spadów na środkowych panelach są od punktów podparcia na środek, na panelach bocznych promieniście do krawędzi dolnych
<p>Elk – scena</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt wygiętych łuków wokół punktów wysokich i niskich, zbliżone są do hiperboli; – odległości pomiędzy warstwicami jak na tak małe zadaszanie są duże; – kierunki spadów są od przodu do środka, a następnie na boki
<p>Gdynia – stadion</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt wygiętych łuków; – odległości pomiędzy warstwicami są stosunkowo duże, ale membrana podparta jest dodatkowymi łukami; – kierunki spadów są ze środka panelu na boki

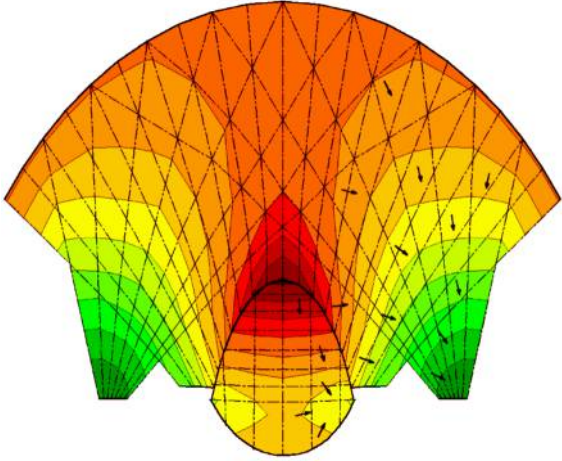

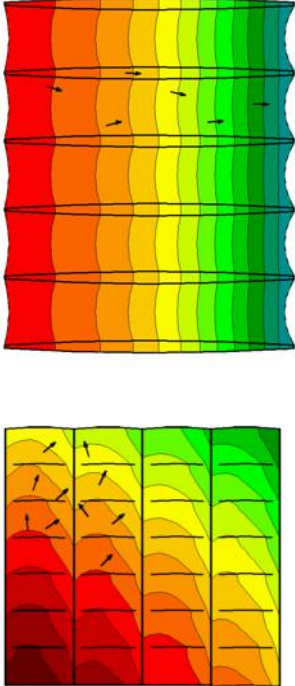
cd. tabeli 15

<p>Gdynia – stacje paliwowe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwicy mają kształt zbliżony do koncentrycznych okręgów, jedynie na wysokości dodatkowych punktów podporowych mają kształt bardziej zbliżony do trójkąta; – odległości pomiędzy warstwicami są typowe; – kierunki spadku są od centralnego pierścienia we wszystkich kierunkach, dodatkowe punkty podporowe powodują, że w narożach tworzy się linia wododziału
<p>Katowice – centrum handlowe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwicy w górnej części mają kształt zbliżony do owali wokół pierścieni podporowych, w dolnej części mają kształt zbliżony do zarysu zadaszenia; – odległości pomiędzy warstwicami po stronie zewnętrznej są wyraźnie mniejsze niż w środkowej części; – kierunki spadku są promieniste od pierścieni podporowych, jedynie na środku skierowane są ku sobie
<p>Kielce – amfiteatr</p> 	<p>część ruchoma zadaszenia:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwicy w górnej części mają kształt łuków wokół sceny, w miarę obniżania zaczynają być bardziej zbliżone do linii łamanej; – odległości pomiędzy warstwicami są dosyć duże; – kierunki spadku są zbliżone do kierunków ciągów nośnych. <p>część stała zadaszenia:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwicy są wyprostowane, prawie równoległe do krawędzi grzbietowych i koszowych; – odległości pomiędzy warstwicami są bardzo małe; – kierunki spadku są prawie prostopadłe do krawędzi

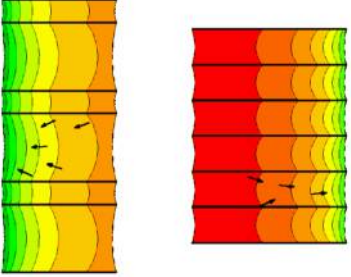
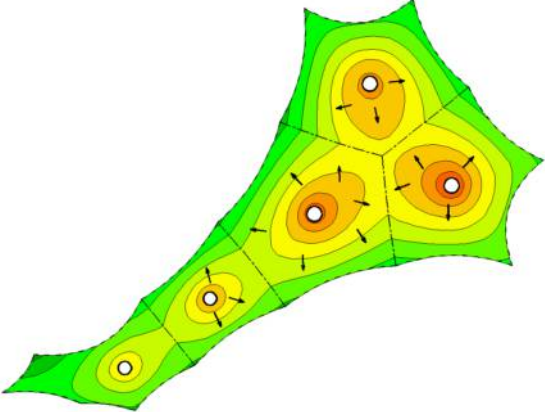
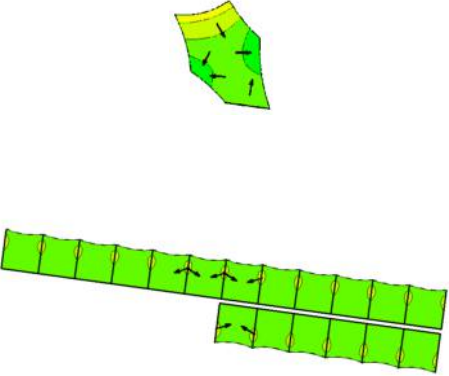
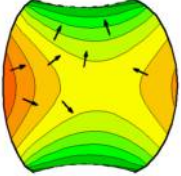
cd. tabeli 15

<p>Kołobrzeg – scena letnia</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt zbliżony do układu krawędzi grzbietowych i koszowych; – odległości pomiędzy warstwicami są porównywalne z odległościami w innych obiektach; – kierunki spadów są prawie prostopadłe do krawędzi grzbietowych
<p>Łagów – scena</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt zbliżony do wieloboków położonych koncentrycznie wokół środka, delikatnie wygięte są do środka, z wyjątkiem części przedniej, w częściach bocznych mają kształt koncentrycznych okręgów; – odległości pomiędzy warstwicami są typowe, z wyjątkiem tyłu zadaszenia, gdzie są mniejsze; – kierunki spadów są ze środka na zewnątrz, z wyjątkiem bocznych lei, gdzie skierowane są ku sobie
<p>Mrągowo – amfiteatr</p> 	<p>część środkowa zadaszenia:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic w środkowej części przypominają hiperbole, po bokach są bardziej wyprostowane; – odległości pomiędzy warstwicami na środku są większe, a po bokach wyraźnie mniejsze; – kierunki spadów są od przodu zadaszenia skośnie na boki. <p>części boczne:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic są koncentrycznymi okręgami; – odległości pomiędzy warstwicami są małe; – kierunki spadów są skierowane promieniście do środka
<p>Opole – amfiteatr</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – brak linii warstwic, ponieważ różnica wysokości pomiędzy najniższym a najwyższym punktami membrany wynosi mniej niż 1 m; – odległość pomiędzy warstwicami są bardzo duże, większe niż odległości pomiędzy krawędziami brzegowymi, ponieważ nie występują na przedstawionym planie; – kierunki spadów nie zostały zaznaczone z powodu braku warstwic

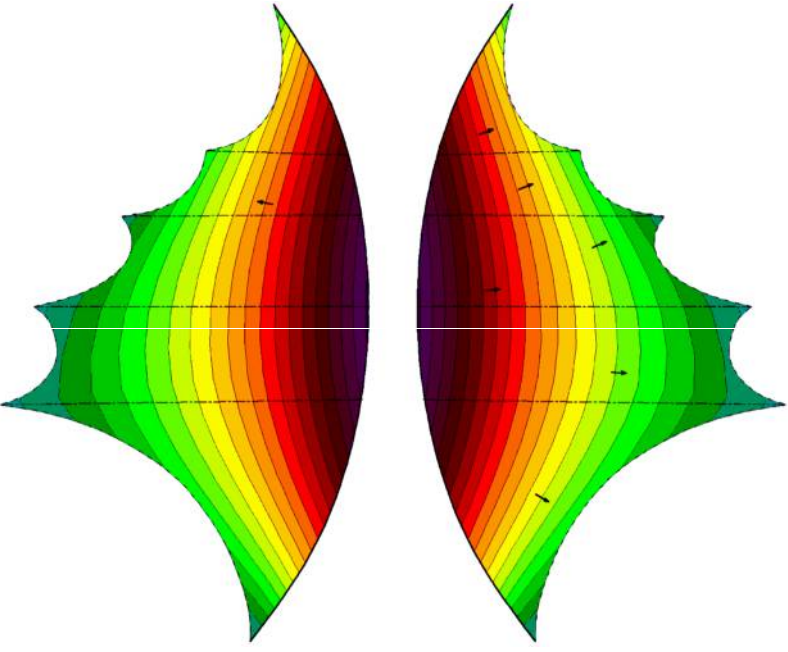
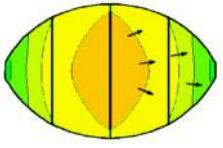
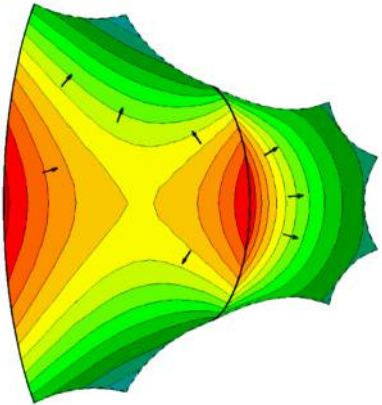
cd. tabeli 15

<p>Płock – amfiteatr</p> 	<p>główna część zadaszenia:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt owalnych łuków wygiętych wokół dolnych miejsc zamocowania ciężien; – odległości pomiędzy warstwicami są typowe z wyjątkiem środka, nad tylną częścią widowni, w którym odległości wyraźnie rosną; – kierunki linii spadku są skierowane ku bocznym miejscom zamocowania ciężien, <p>środkowa część zadaszenia:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt zbliżony do hiperboli; – odległości pomiędzy warstwicami są mniejsze w górnej części i większe w dolnej; – kierunki spadku są w kierunku miejsca połączenia łuków podporowych.
<p>Poznań – centrum rozrywkowo-sportowe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt zbliżony do linii spiralnych wokół centralnej podpory; – odległości pomiędzy warstwicami są dosyć duże; – kierunki spadku są od zewnętrznego spiralnego pierścienia do środka.
<p>Poznań – stadion</p> 	<p>trybuna IV:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt łuków prostujących się w dolnej części paneli; – odległości pomiędzy warstwicami zmniejszają się w miarę obniżania; – kierunki spadku są od dźwigarów na środek panelu, a następnie środkiem w dół <p>trybuny I, II i III:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają bardzo złożone kształty ze względu na wypukłość całego zadaszenia oraz dodatkowe wypukłości wynikające z łuków wypychających membranę, przeważnie mają kształt zgodny z wypukłościami łuków; – odległości pomiędzy warstwicami są typowe, zmniejszają się w miarę obniżania; – kierunki spadku są od środka panelu na boki, do dźwigarów

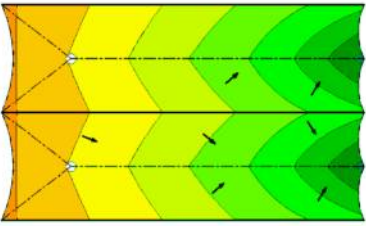
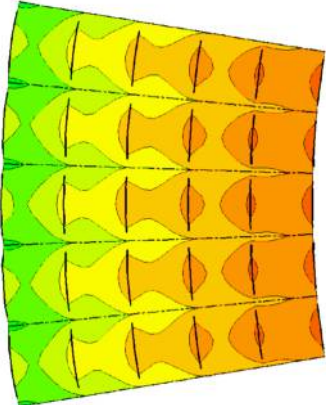
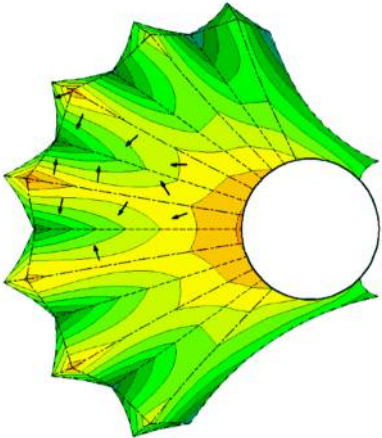
cd. tabeli 15

<p>Puławy – stadion</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt wygiętych łuków, prostujących się przy zewnętrznej dolnej krawędzi; – odległości pomiędzy warstwicami są duże w górnej części i małe w dolnej, w przypadku paneli nad budynkiem klubowym występują wyraźnie większe odległości; – kierunki spadku są od dźwigarów na środek panelu
<p>Sopot – klub</p>  <p>Sopot – klub</p> 	<p>zadaszenie główne:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt koncentrycznych owali wokół pierścieni podporowych; – odległości pomiędzy warstwicami nie są zbyt duże, rosną w miejscach łączenia poszczególnych modułów, a największa odległość występuje w miejscu połączenia trzech modułów; – kierunki spadku są od pierścieni podporowych <p>zadaszenie przy wejściu do budynku:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt zbliżony do hiperboli; – odległości pomiędzy warstwicami są typowe; – kierunki spadku są skierowane na środek panelu, a następnie do bocznych miejsc kotwienia <p>zadaszenie nad przejściem:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic są ledwo widoczne, wygięte wokół podtrzymujących dźwigarów; – odległości pomiędzy warstwicami są nieco większe od typowych; – kierunki spadku są od dźwigarów na środek
<p>Stężyca – amfiteatr</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt przypominający hiperbole; – odległości pomiędzy warstwicami są typowe, z wyjątkiem środka, gdzie są nieco większe; – kierunki spadku są od łuków podporowych na środek, a następnie prawie prostopadle do krawędzi bocznych

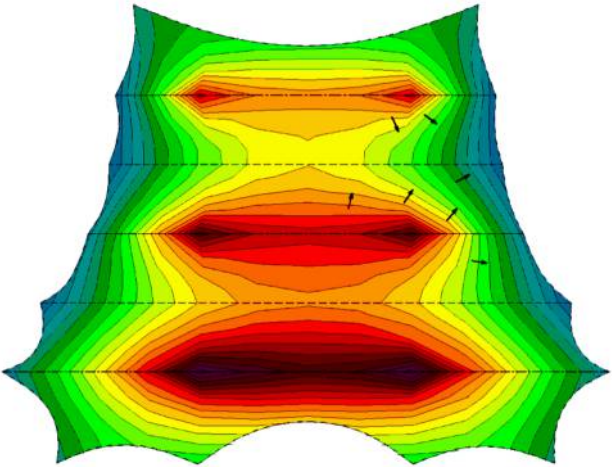
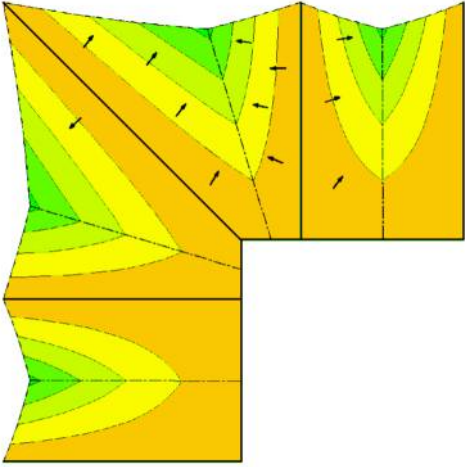
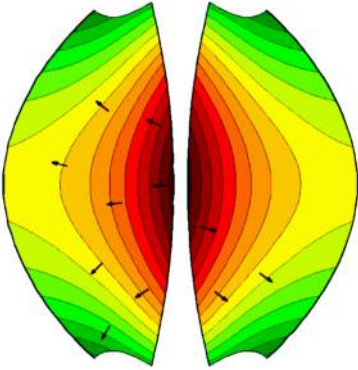
cd. tabeli 15

<p>Sopot – amfiteatr</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają regularny kształt, w górnej części są prawie wyprostowane, w miarę obniżania są bardziej wygięte, jakby przeciwnie do łuków podporowych; – odległości pomiędzy warstwicami są małe, nawet przy dolnych krawędziach; – kierunki spadku są od centralnych łuków ku brzegom
<p>Śliwice – amfiteatr</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt owalny wokół środkowej części, nie mają charakterystycznego wygięcia w przeciwną stronę; – odległości pomiędzy warstwicami zmniejszają się w narożnikach; – kierunki spadku są od środka we wszystkich kierunkach, najczęściej na boki
<p>Ustroń – amfiteatr</p> 	<p>główna część zadaszenia:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt przypominający hiperbole; – odległości pomiędzy warstwicami, mimo dużych rozmiarów zadaszenia są stosunkowo małe, wyjątkiem jest środkowa część; – kierunki spadku są od łuków ku środkowi, a następnie ku bocznym punktom zamocowania membrany <p>część zadaszenia nad sceną:</p> <ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt koncentrycznych łuków wokół środka; – odległości pomiędzy warstwicami rosną w miarę obniżania membrany; – kierunki spadku są od środka we wszystkich kierunkach.

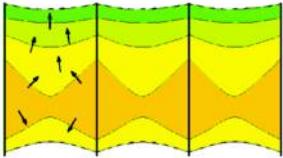
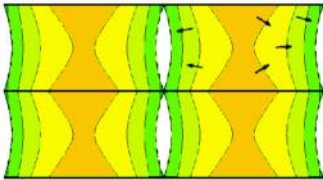
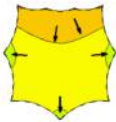
cd. tabeli 15

<p>Warszawa – pętla autobusowa</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt prawie wyprostowany w górnej części, w dolnej są wygięte wokół punktów zamocowania ciężna koszonego; – odległości pomiędzy warstwicami są stosunkowo duże na całej powierzchni zadaszzenia; – kierunki spadów są skośnie od dźwigarów do linii koszonej
<p>Warszawa – Stadion Narodowy</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają bardzo złożony kształt, w pobliżu łuków podporowych wygięte są wokół nich, natomiast pomiędzy łukami wygięte są w przeciwną stronę; – odległości pomiędzy warstwicami są nieco większe niż w innych obiektach; – kierunki spadów są od łuków do ciężien promienistych, w niektórych miejscach spadek jest nawet w przeciwną stronę niż pochylenie ciężna mocującego
<p>Warszawa – amfiteatr Bemowo</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają bardzo złożone kształty, w pobliżu zewnętrznych krawędzi są prawie równoległe do ciężien nośnych; – odległości pomiędzy warstwicami są małe w środkowej części, przy zewnętrznych krawędziach są wyraźnie mniejsze; – kierunki spadów są prawie prostopadłe do krawędzi grzbietowych, jedynie w środkowej części zbliżone są do kierunków krawędzi koszowych

cd. tabeli 15

<p>Warszawa – amfiteatr Sowińskiego</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt zbliżony do bardzo wydłużonych owali wokół par punktów podtrzymujących poszczególne segmenty zadaszenia; – odległości pomiędzy warstwicami są bardzo małe; – kierunki spadku są od środkowych punktów podparcia, w dolnej części są zbliżone do krawędzi bocznych
<p>Warszawa – stadion miejski</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic są prawie proste, delikatnie wyginają się wokół najniższych punktów; – odległości pomiędzy warstwicami są duże, nieznacznie mniejsze są w pobliżu najniższych punktów; – kierunki spadku w górnej części są prawie prostopadłe do dźwigarów, w dolnej zaś są skośne do linii ciągną koszowego
<p>Wisła – amfiteatr</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt zbliżony do hiperboli, położone są symetrycznie względem osi zadaszenia; – odległości pomiędzy warstwicami są mniejsze w górnej części, a większe na środku dolnej część; – kierunki spadku są od centralnej części ku łukom zewnętrznym

cd. tabeli 15

<p>Włocławek – przystań</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt zbliżony do hiperboli z osią równoległą do łuków podporowych; – odległości pomiędzy warstwicami są duże; – kierunki spadów są od łuków podporowych na środek paneli, przy krawędziach prawie prostopadłe
<p>Wrocław – dworzec kolejowy</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linie warstwic mają kształt zbliżony do hiperboli; – odległości pomiędzy warstwicami są typowe, z wyjątkiem środka, gdzie są większe; – kierunki spadów są od dźwigarów na środek paneli, przy krawędziach prawie prostopadłe.
<p>Zubrzyca Górna – amfiteatr</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – linii warstwic prawie nie ma, jedynie w narożach tworzą niewielkie łuki; – odległości pomiędzy warstwicami są duże; – kierunki spadów są do obniżonych naroży powłoki.

Źródło: opracowanie własne

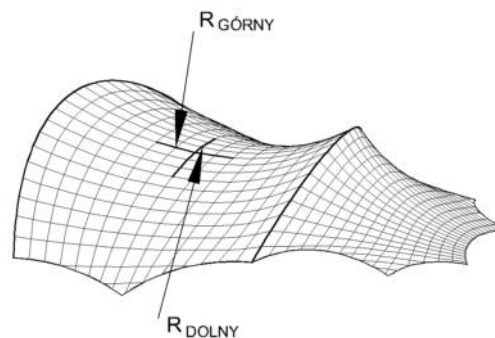
Wyniki potwierdzają, że wielkość poszczególnych paneli nie jest związana z pochyleniem membrany. Przykładem może być Opera Leśna w Sopocie lub amfiteatr w parku Sowińskiego w Warszawie. Przy bardzo dużej powierzchni uzyskano duże pochylenie całej membrany. W niektórych przykładach pochylenie jest wyraźnie mniejsze, przykładami mogą być stadion miejski w Warszawie, a także zadaszenie pętli autobusowej w Warszawie. W obu przykładach konieczne było zastosowanie mocniejszych materiałów – na stadionie membrana z włókien szklanych pokrytych PTFE, a na pętli membrana z włókien poliestrowych pokrytych PCW, ale typu IV. Poza tym zastosowano bardzo mocną konstrukcję podporową. W innych przypadkach, przy małym pochyleniu zastosowano gęsto położone elementy podporowe – amfiteatr w Opolu, stadion w Gdyni i Stadion Narodowy w Warszawie.

Plany warstwicowe potwierdzają naturalną zasadę kształtowania membrany. W przypadku, kiedy elementy brzegowe wygięte są w górę, to membrana wygina się w przeciwnym kierunku, czyli w dół. Najbardziej jest to widoczne w amfiteatrach w: Stężycy, Ustroniu i Mrągowie. Potwierdzają to też linie spadów. Woda spływa najpierw na środek danego panelu, od dźwigarów podporowych, a dopiero później środkiem w dół poza zadaszenie. Przykładami są: dworzec we Wrocławiu, przystań we Włocławku, stadion w Puławach i IV trybuna stadionu w Poznaniu. Bardzo istotne jest wtedy zaprojektowanie odpowiedniego odprowadzenia wody w miejscach, w których nie znajdują się sztywne elementy podporowe. Jeszcze bardziej jest to widoczne w przypadku zastosowania dodatkowych cięgien, tworzących krawędzie koszone, np.: pętla autobusowa w Warszawie, stadion miejski w Warsza-

wie, stadion w Bytomiu i amfiteatr w Kielcach. Odwrotnie się dzieje, gdy wprowadzane są dodatkowe podpory podtrzymujące membranę, np. łuki na Stadionie Narodowym w Warszawie lub stadionie w Gdyni. Woda wtedy spływa w kierunku głównych elementów podporowych i tam spływa na zewnątrz zadaszenia. Często w tych miejscach łączone są poszczególne panele, więc bardzo istotne jest precyzyjne wykonanie połączeń.

7.3. Promienie krzywizny

Jednym z najbardziej istotnych elementów kształtowania powierzchni membran jest nadanie im odpowiedniej krzywizny, aby powierzchnia nie była płaska. Mimo że w wielu opracowaniach podkreślana jest rola krzywizny, to brak jest przykładów, gdzie podane są chociaż orientacyjne wartości. Dlatego podjęto próbę określenia promieni krzywizn występujących w analizowanych zadaszeniach membranowych. Wykonano to na podstawie materiałów, które zostały udostępnione przez projektantów. Michael W. Ishler³¹³ wyjaśnia, że przy projektowaniu struktur membranowych można wyznaczyć promienie krzywizny na podstawie łuków o ograniczonej długości. Krzywizna danej powierzchni nie jest stała, a poza tym nie można jej określić bezpośrednio na podstawie kształtu konstrukcji podporowej. Należy pamiętać, że promienie głównych krzywizn leżą w płaszczyznach prostopadłych do powierzchni³¹⁴, a nie tak jak łuk podporowy lub pierścień mocujący, których płaszczyzna jest pod pewnym kątem do membrany. Elementy podporowe są zwykle tak rozmieszczone i ukształtowane, aby membrana miała jak największą krzywiznę. Jeśli powłoka jest



Il. 349. Promienie krzywizny powłoki w Ustroniu

zbliżona do powierzchni minimalnej, to promienie krzywizny, w danym punkcie, są równej wielkości.

Przykładem może być zadaszenie w Ustroniu. Łuki podporowe wykonane są z giętych rur i mają kształt zbliżony do paraboli. Aby ułatwić wykonanie konstrukcji projektanci przyjęli, że środkowa część łuku jest wycinkiem okręgu. Zrealizowany łuk podporowy, z tyłu widowni ma promień około 40 m, a łuk przedni, pomiędzy widownią a sceną, na środku ma promień około 16 m. Natomiast powierzchnia membrany pomiędzy łukami jest tak ukształtowana, że przyjmuje wartości pośrednie. Na podstawie udostępnionego modelu określono wartości promieni krzywizn. Górny promień wynosi około 34,7 m, a dolny około 35,0 m, czyli są prawie równe.

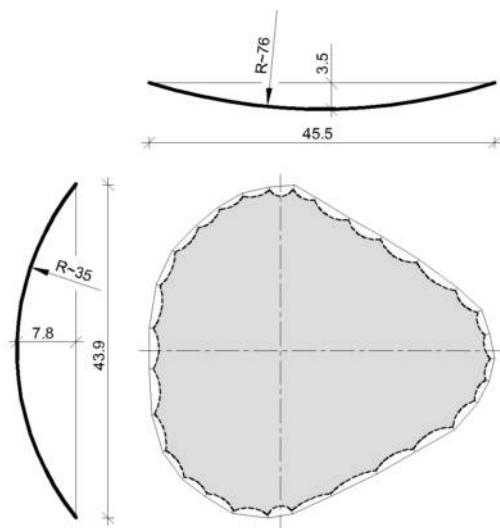
W przypadku Stadionu Narodowego zadaszenie nad trybunami oparte jest na panelach, które przy pierścieniu zewnętrznym mają wyraźnie większą szerokość niż przy pierścieniu wewnętrznym. Pomiedzy promienistymi cięgnami zamocowane są łuki podporowe o różnej rozpiętości. Aby forma architektoniczna lepiej wyglądała, przyjęto, że wszystkie łuki mają taką samą wysokość, niezależnie od swojej rozpiętości. Powoduje to zmianę krzywizny

³¹³ Michael W. Ishler, *Form determination*, [in:] Craig G. Huntington, *Tensile fabric structures: Design, Analysis, and Construction*. American Society of Civil Engineers, Reston 2013, p. 66-67.

³¹⁴ Tadeusz Trajdos, *Matematyka dla inżynierów, kurs wyższy*. PWN, Warszawa 1974, s. 293.

poszczególnych łuków, ale dzięki temu, zadanie widziane z góry ma równo pofalowaną formę z wystającymi grzbietami.

Przykładem potwierdzającym wagę krzywizny w projektowaniu jest zadanie w Połczynie Zdrój. Nie zostało ono szczegółowo przedstawione ze względu na to, że od samego początku projektowane było jako tymczasowe i wykorzystywane jest tylko w okresie letnim. Powłoka zadania była źle wykonana i musiała być zmieniona. Przede wszystkim miała małe pochylenie i była za mało wygięta. Podczas intensywnych opadów, woda nie zdążyła spływać i zaczynała gromadzić się, powstawały worki wodne. Właściciel, żeby zapobiec zniszczeniu całej konstrukcji lokalnie dziurawił materiał³¹⁵.

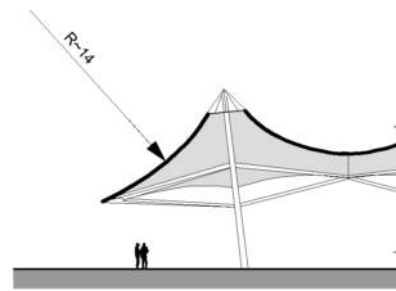


Il. 350. Promienie krzywizny membrany w Połczynie Zdrój

Projekt nowej powłoki wykonał Jan Filipkowski. Lekkie kratownicowe łuki służą do zamocowania i naprężenia powłoki. Na podstawie wymiarów we wspomnianej wcześniej publikacji można określić charakterystyczny kształt powłoki. Filipkowski podkreśla, że kształt jest zbliżony do paraboloidy hiperbolicznej i prze-

kroje są parabolami. Mimo to można w uproszczeniu określić orientacyjne promienie krzywizny. Widoczna jest różnica pomiędzy promieniem górnym około 76 m a promieniem dolnym około 35 m. W projekcie nie było przewidywane obciążenie śniegiem, a jedynie deszczem i wiatrem. Celowo zastosowano większy promień górny, aby podczas deszczu ewentualne obniżenie powłoki nie doprowadziło do tego, że w kierunku poprzecznym powłoka się wyprostuje i woda przestanie spływać. Obciążenie prowadzi do wyrównania promieni krzywizny, czyli membrana jest bardziej zbliżona do powierzchni minimalnej.

Dla uproszczenia, aby nie stosować promieni krzywizny, które różnią się w zależności od kierunku i miejsca położenia, w niektórych opracowaniach stosowane są proporcje pomiędzy strzałką wygięcia a jej cięciwą (rozpiętością). W przypadku zadania w Połczynie Zdrój strzałki wynoszą: 1/13 dla krzywizny górnej i około 1/6 dla krzywizny dolnej.



Il. 351. Promień krzywizny zadania w Katowicach

Dużo większe różnice krzywizn występują w przypadku form stożkowych. Najczęściej górny pierścień podtrzymujący ma małą średnicę, a dolny pierścień lub wielobok punktów, gdzie zamocowana jest membrana ma bardzo duże wymiary. Stąd promienie krzywizn przyjmują wielkość od kilku do kilkudziesięciu

³¹⁵ Jan Filipkowski, Joanna Jacoszek, Zbigniew Sienkiewicz, *Konstrukcja i badania powłoki tekstylnej*. Inżynieria i Budownictwo, nr 11/1988, s. 394-398.

metrów. Jedynie górny promień krzywizny jest w przybliżeniu stały.

W tabeli 16 przedstawiono orientacyjne promienie krzywizn dla wybranych obiektów. Na uwagę zasługuje zadaszenie Opery Leśnej w Sopocie. Promień górny dochodzi aż do 180 m. Nie jest to wielkość wynikająca z wytrzymałości samej membrany, ale z tego, że pomiędzy łukami głównymi a zewnętrznymi słupami rozpięte są stalowe cięgna. Stanowią dodatkową, pośrednią podporę pomiędzy sztywną konstrukcją stalowych łuków a membraną³¹⁶.

Tabela 16

Orientacyjne promienie krzywizn

Obiekt	Promień górny [m]	Promień dolny [m]
Sopot – Opera Leśna	180	60
Bydgoszcz – hotel	12	12
Katowice – centrum handlowe	14	–
Ustroń – amfiteatr	35	35
Wisła – amfiteatr	32	32
Wrocław – dworzec	15	45

Źródło: opracowanie własne

Struktury membranowe niezależnie od tego, w jaki sposób są napięte, mają podwójną krzywiznę. W przypadku konstrukcji pneumatycznych, mimo że krzywizna Gaussa jest dodatnia, to promienie krzywizny są podobne i wynikają z przewidywanych obciążeń membrany. Przedstawiony na il. 38 Pawilon Pragnienia w Saragossie ma poduszki wykonane z folii ETFE o średnicach od 2,8 m do 9,8 m. Ciśnienie powietrza wewnątrz poduszek wynosi 3 hPa, co jest porównywalne z ciśnieniem

stosowanym w innych tego typu obiektach. Mimo różnych średnic projektanci przewidzieli wygięcie wszystkich poduszek na 0,15 rozpiętości, czyli około $1/6$ ³¹⁷. Takie rozwiązanie wiąże się z tym, że wraz z wielkością zmienia się promień krzywizny, ale za to poduszki wydają się podobne.

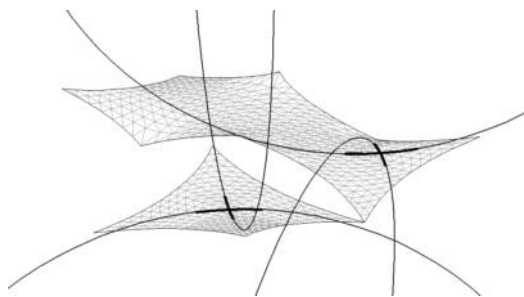
Podobnie jak krzywiznę powierzchni membrany, można również porównać krzywiznę cięgien brzegowych. Kształt ich wynika z wielkości i kierunków sił działających na nie, czyli z sił działających bezpośrednio w membranie. Dlatego kształt ten można wyznaczyć jedynie, stosując programy komputerowe uwzględniające właściwości i obciążenia poszczególnych elementów konstrukcji. Na wstępie trzeba przyjąć początkowy kształt membrany wraz z wygięciem cięgien brzegowych. Można założyć początkowe wygięcie linii brzegowej (krzywiznę cięgna brzegowego), a z obliczeń otrzymana będzie długość samego cięgna. Inna możliwość to założenie długości cięgna, a program obliczający wewnętrzne naprężenie membrany spowoduje określenie jego wygięcia. Przyjęcie początkowej formy wymaga przewidzenia wygięcia krawędzi brzegowej. Tę wielkość można przyjąć na podstawie promienia krzywizny lub, jak to jest częściej określone, proporcji strzałki łuku do jego rozpiętości. Należy pamiętać, że krzywa ta jest linią łańcuchową, czyli jest bardziej zbliżona do paraboli niż do łuku okręgu. Projektanci zalecają proporcje wynoszące około 1/10. Zaprojektowanie wygięcia mniejszego niż 1/20 powoduje, że wzdłuż krawędzi brzegowej trzeba używać bardzo mocno naprężonych cięgien, a i tak środkowe fragmenty membrany nie są właściwie napięte. Natomiast stosowanie bardzo mocno wygiętej krawędzi, np. 1/5, powo-

³¹⁶ Dla porównania, na il. 125 i 126 przedstawione są przekroje zadaszenia Opery Leśnej w Sopocie.

³¹⁷ <http://www.arenasing.com/en/projects/singular-buildings/thirst-pavilion>, (8-07-2016).

³¹⁸ Informacje zamieszczone w gablocie przed obiektem w 2003 roku.

duje, że zadaszenie ma małą powierzchnię i mało chroni przed deszczem i słońcem, ale za to lepiej naprężone są środkowe fragmenty membrany. Potwierdzeniem tego jest korekta, która została przeprowadzona w pierwotnym zadaszeniu Opery Leśnej w Sopocie. Po uszkodzeniu w 1964 roku zwiększono wcięcia, aby wzmocnić powłokę³¹⁸.



Il. 352. Krzywizny zadaszenia w Bydgoszczy

Zadaszenie w Bydgoszczy składa się z trzech płatów. Przedstawiony powyżej jeden z segmentów ma formę siodłową o charakterystycznie wygiętych liniach brzegowych. Wzdłuż wszystkich krawędzi znajdują się cięgna brzegowe. Dzieląc wygięcie linii brzegowej 0,7 m przez odległość pomiędzy narożnikami, która wynosi 6,5 m, uzyskuje się proporcje $\sim 1/9$ albo promień około 7,3 m. Jest to wielkość nieco mniejsza niż promień krzywizny samej membrany – 12 m³¹⁹. Cięgna brzegowe są wykonane z innego materiału (stalowe liny), niż membrana dlatego mogą przenosić większe siły wewnętrzne. Natomiast stosowanie zbyt mocno naprężonych może powodować powstawanie niepotrzebnych progów, utrudniających zsuwanie się śniegu (por. il. 324).

7.4. Podsumowanie analizy form

Okazuje się, że analiza warstwic daje najbardziej czytelne wyniki, mimo że prawie nie występuje w literaturze, może to powodować niedocenianie tego narzędzia ułatwiającego ocenę formy przestrzennej podczas projektowania architektonicznego. Linie warstwic można wyznaczyć na podstawie wirtualnego modelu, rysując linie na określonej wysokości. Można to nawet uprościć, stosując programy komputerowe do wykonywania wizualizacji. Nazywane jest to mapowaniem materiału. Jeśli na wirtualny model powierzchni rzutowany jest obraz poziomych linii, to otrzymany efekt jest planem warstwicowym. Podobne techniki były kiedyś wykorzystywane w laboratoriach Freia Otto, gdzie na fizyczny model powłoki rzutowane były cienie poziomej siatki. Pozwala to na sprawdzenie, czy warstwice są wygięte i w którą stronę. Jeśli powierzchnia jest wygięta w górę, np. forma kolebkowa, to warstwice powinny być wygięte do środka. Jeśli powierzchnia jest wygięta w dół, np. forma stożkowa, to warstwice powinny być wygięte na zewnątrz. Na podstawie odległości pomiędzy warstwicami można sprawdzić, czy jest właściwe pochylenie i gdzie są miejsca, w których to pochylenie maleje. Dzięki temu można podjąć decyzję dotyczącą tego, w którą stronę zmienić położenie elementów podporowych.

³¹⁹ Na podstawie modelu udostępnionego przez producenta firmę Alu-Tent.

8. WNIOSKI DO PRAKTYKI PROJEKTOWEJ

We wcześniejszych rozdziałach monografii przedstawiono, w jaki sposób zostały zaprojektowane zadaszania membranowe wraz z porównaniami i ich wynikami. Natomiast w tym rozdziale opisano kilka przykładów jak można wykorzystać otrzymane wyniki w praktyce projektowej. Przedstawione wcześniej analizy mogą być wykorzystane, jako narzędzie pozwalające ocenić przydatność formy architektonicznej projektowanego zadaszania membranowego do realizacji. Jeśli zaistnieje potrzeba, to dzięki otrzymanym wynikom można podjąć decyzję dotyczącą tego, w którym kierunku należy przeprowadzić korektę, aby uzyskać bardziej optymalne rozwiązanie.



Il. 353. Koncepcja zadaszania amfiteatru w Żywcu

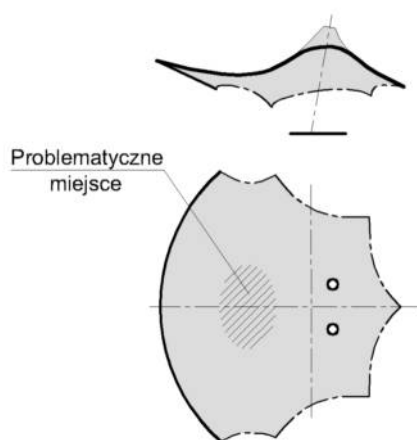
Pierwszym przykładem może być proces formowania zadaszania amfiteatru w Żywcu. Chodzi o porównanie formy zaproponowanej w koncepcji architektonicznej ze zrealizowanym zadaszaniem. Pracownia projektowa Wiewióra & Golczyk przygotowała koncepcję przebudowy istniejącego obiektu. Ponad nową widownią, sceną i budynkiem zaplecza zaproponowano zadaszanie membranowe podparte dwoma słupami, o kształcie zbliżonym do

połączonych dwóch form stożkowych. Ze względu na przewidywaną niewielką odległość pomiędzy punktami podparcia, tylna część membrany miała tworzyć gładką powłokę delikatnie unoszącą z tyłu widowni. Środkowe miejsca zamocowania membrany miały pełnić dwa słupy pochylone w kierunku tyłu sceny. Natomiast z tyłu widowni membrana miała być zamocowana do nisko położonego łuku półpierścienia. Nad sceną i po obu bokach membrana miała być zamocowana za pomocą cięgien brzegowych. Narożniki membrany, czyli zakończenia cięgien miały być umieszczone na słupach o różnych wysokościach, aby nadać membranie odpowiednią krzywiznę. Przypominało to nieco wcześniejszą realizację pracowni, czyli zadaszanie nad sceną w Węgierskiej Górze. Tam membrana ma formę stożkową, podpartą jednym pochylonym słupem, a łuk umieszczony jest w przedniej części sceny (por. il. 121).

Na il. 354 przedstawione są przekrój i rzut powłoki, która została zaprojektowana w koncepcji architektonicznej³²⁰. Na podstawie przygotowanej dokumentacji zespół konstruktorów przeanalizował warianty obciążenia i możliwości wykonania zadaszania. Jest to typowy etap projektowania, kiedy koncepcja architektoniczna jest weryfikowana przez specjalistów. W tradycyjnych obiektach, w uproszczeniu, sprowadza się to do określenia parametrów wytrzymałościowych materiałów. W przypadku struktur membranowych forma nierozdzielnie jest związana z siłami występującymi w powłoce, czyli każda zmiana sił powoduje

³²⁰ <http://www.mck.zywiec.pl/amfiteatr-pod-grojecem,3.html> (30-07-2013).

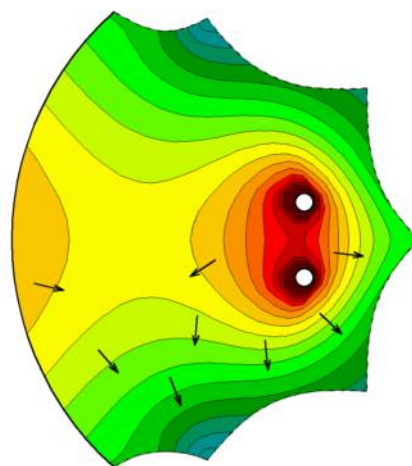
zmianę formy napiętej powłoki. Na tym etapie ważne jest, aby rezultat końcowy, czyli forma napiętej membrany, był wynikiem kompromisu zadowalającego wszystkie strony. Okazało się, że środkowa część powłoki, mimo próby zastosowania materiałów o różnej wytrzymałości i wprowadzenia dużego naprężenia wstępnego, może ulegać dużym przemieszczeniom oraz że mogą pojawiać się lokalne zastoje wody. Konieczna więc była zmiana kształtu dla zlikwidowania przewidywanych problemów.



Il. 354. Forma powłoki w koncepcji pierwotnej

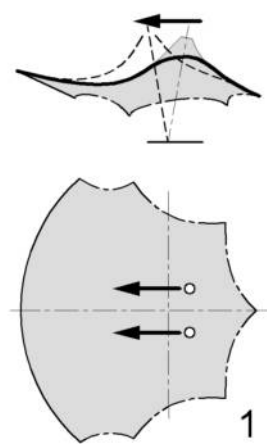
W trakcie prac projektowych lokalne media³²¹ przedstawiały przyszłą inwestycję wraz z wizualizacjami udostępnionymi przez pracownię projektową. Autor analizując ukształtowanie powłoki, doszedł do podobnych wniosków, co zespół konstruktorów. Stosując analizę polegającą na porównaniu pochylenia membrany, określeniu kierunków linii spadów i krzywizny powierzchni, przewidziana została konieczność wykonania korekty zadaszenia.

Aby zwiększyć pochylenie membrany dla formy stożkowej można zwiększyć wysokość środkowych słupów podtrzymujących lub obniżyć zewnętrzne elementy brzegowe. Powodowałoby to wyraźną zmianę kształtu pierwot-



Il. 355. Plan warstwiczny powłoki zaproponowanej w koncepcji

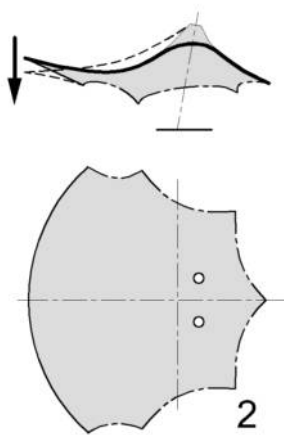
nej koncepcji. Autor podjął próbę zmiany położenia, ale tylko niektórych elementów, aby plan zadaszenia i rzut całego amfiteatru pozostały bez zmian. Poniżej przedstawione są warianty korekt, które zwiększają krzywiznę i pochylenie środkowej części powłoki.



Il. 356. Zmiana pochylenia słupów

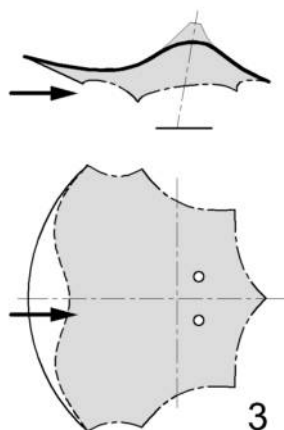
Pierwszym ze sposobów jest przesunięcie miejsc podparcia membrany, czyli przechylenie słupów w kierunku widowni; przeciwnie, niż zostało to zaproponowane w koncepcji. Dzięki temu podparcia znajdą się w środkowej części zadaszenia. Zwiększa to pochylenie membrany z jednej strony i zmniejsza z przeciwnej.

³²¹ <http://zywiecczyzna24.net/wpis/502/amfiteatr-pod-grojcem-w-zywcu> (18-04-2013).



Il. 357. Obniżenie łuku

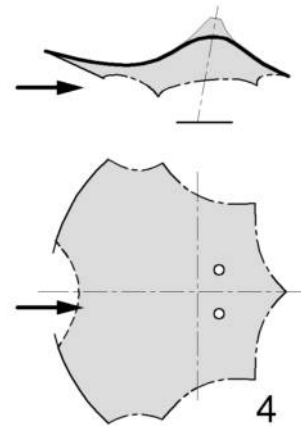
Druga rozważana możliwość to obniżenie środkowej części łuku, aby zwiększyć pochYLENIE membrany. Wydawało się to trudne w realizacji, ze względu na niewielką odległość zadaszenia od widowni w tym miejscu.



Il. 358. Zmiana kształtu łuku

Kolejnym pomysłem była zmiana kształtu łuku przez zmniejszenie wygięcia. Budziło to obawy, co do współgrania zadaszenia z kształtem projektowanej widowni oraz z prawdopodobnym problemem przeniesienia obciążeń przez łuk o nietypowym kształcie.

Ostatnim sposobem była jakby kontynuacja pomysłu trzeciego z przesunięciem tylnej części membrany do środka. Zamiast jednego tylnego łuku można zastosować dwa osobne



Il. 359. Wprowadzenie dodatkowego wcięcia

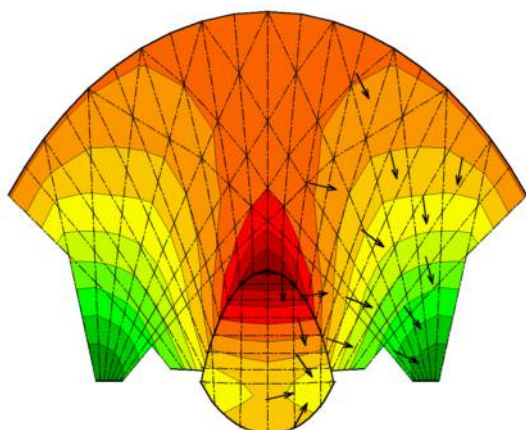
łuki, a membranę pomiędzy nimi można zamocować do cięgna łączącego oba łuki. Ku swemu zadowoleniu autor mógł obserwować, że realizowany obiekt różni się od przedstawionej wcześniej koncepcji, a zastosowane rozwiązanie jest jakby kompilacją przewidzianych wariantów. Słupy zostały pochylone jak w wariacie 1. Dodatkowo zostały odsunięte od siebie w górnej części. Chociaż tylny łuk pozostał na tej samej wysokości, ale tylna część membrany została obniżona. Zostało też zastosowane wcięcie jak w wariacie 4. Membrana zamocowana jest do łuku, ale tylko w bocznych częściach, a na środku zastosowane są cięgna brzegowe, które przymocowane są do dolnej części tylnego słupa. Przygotowa-



Il. 360. Zrealizowane zadaszenie amfiteatru w Żywcu

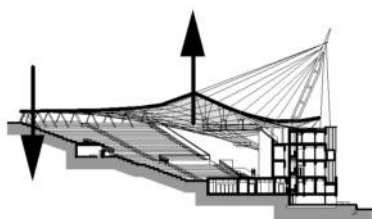
ne tam zostało miejsce do odprowadzania wody i śniegu. Poniżej przedstawiono zrealizowane zadaszanie z obniżeniem środkowej części membrany.

Drugim przykładem wykorzystania wyników może być pomysł na korektę zadaszania amfiteatru w Płocku. Przeprowadzona analiza wraz z wyznaczeniem planu warstwicowego potwierdziła, że spora część zadaszania, nad tyłem widowni, jest położona prawie poziomo.



Il. 361. Plan warstwicowy zadaszania w Płocku

Kształt membrany można było zmienić na etapie projektowania, aby wyeliminować poziome fragmenty zadaszania. Można było podnieść środkowy łuk lub obniżyć zewnętrzny pierścień, działając podobnie jak w poprzednim przykładzie.



Il. 362. Schemat analizowanych zmian zadaszania amfiteatru w Płocku

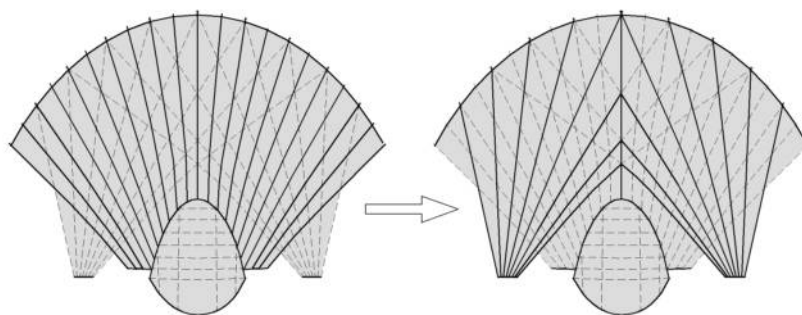
Powierzchowne opinie głosiły taką potrzebę, ale byłyby to zła decyzja. Plan warstwicowy wskazuje, że środkowa część zadaszania jest na podobnej wysokości. Obniżenie tylnego

pierścienia może poprawiłoby nachylenie występujące w płaszczyźnie przekroju, ale zmniejszyłoby różnicę wysokości do dolnych punktów zamocowania cięgien. Skutkiem końcowym byłoby to, że dużo większa część zadaszania miałaby mniejsze nachylenie niż jest obecnie. W tym przypadku raczej należałoby podnieść środek tylnej części pierścienia. Utworzyłoby to rodzaj grzbietu przechodzącego przez środek zadaszania, dzielącego wyraźnie powłokę na dwie części odprowadzające wodę na boki. Występuje wyraźna różnica pomiędzy analizą płaskich przekrojów przez zadaszanie a analizą ustroju przestrzennego. Dzięki wykorzystaniu planu warstwicowego powierzchni możliwa jest analiza formy oraz podjęcie decyzji dotyczących kształtu całej powłoki.



Il. 363. Połączenie kabli pod membraną

W amfiteatrze w Płocku nie ma obawy o wytrzymałość membrany, ponieważ jest gęsto podparta układem cięgien. Na podstawie rozmów i obserwacji zauważono, że głównym problemem nie jest ukształtowanie powłoki, ale raczej sposób jej wykonania. Większym problemem jest to, że woda nie spływa z niektórych rejonów zadaszania, ponieważ poszczególne kable tworzą progi utrudniające jej spływanie. Powyżej przedstawione jest połączenie kabli pod membraną.



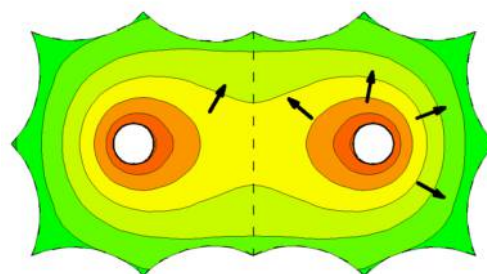
Il. 364. Propozycja zmiany podziału na bryty

Wydaje się, że w tym przypadku należy niejako podążać za formą zadaszenia. Na podstawie planu warstwicowego widać, że kształt zadaszenia jest daleki od formy stożkowej, mimo że konstrukcja przymocowana jest do górnego łuku i dolnego pierścienia. Układ warstwic wskazuje, że jest to bardziej forma połączonych dwóch lejów. Dlatego bardziej korzystny byłby inny podział na panele oraz inna kolejność umieszczenia cięgien.

Obecny podział na panele pokrywa się z układem cięgien łączących łuk środkowy z pierścieniem zewnętrznym. Taki podział jest typowy dla form stożkowych. Autor proponuje inny podział – taki jak dla dwóch połączonych lejów – szwy powinny znajdować się wzdłuż linii spadu. Konstrukcja zadaszenia jest siecią o trójkierunkowym układzie kabli, dlatego niektóre cięgna umieszczone są wyżej, a pozostałe niżej. Ważne jest, aby cięgna górne umieścić zgodnie z zaproponowanym podziałem. Pozostałe cięgna powinny być umieszczone poniżej, dzięki temu nie tworzyłyby wspomnianych wcześniej progów. Poza tym zamiast stosownia dodatkowych rur spustowych (il. 299) można było pomyśleć o podniesieniu membrany, wypchnięciu w górę, w polu pomiędzy kablami. Byłoby to rozwiązanie zgodne z kierunkami spadu na powłoce.

W niektórych obiektach, gdzie pojawiają się problemy z użytkowaniem zadaszenia mem-

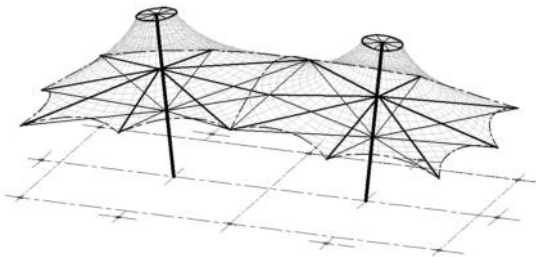
branowego można zastanowić się, czy nie wykonać korekty kształtu. Po okresie użytkowania, kiedy membrana będzie miała wyraźne ślady zużycia, trzeba będzie wymienić ją na nową, gdyż trwałość tkaniny, zwłaszcza wykonanej z włókien poliestrowych pokrytych PCW, nie jest tak duża, jak konstrukcji podtrzymującej.



Il. 365. Plan warstwicowy istniejącego zadaszenia w Katowicach

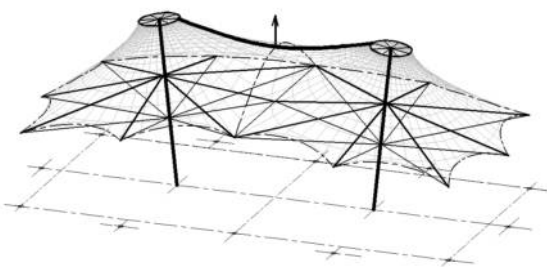
Kolejnym przykładem wykorzystania wcześniejszych wyników jest zadaszenie w centrum handlowym w Katowicach. W tym przypadku nie ma problemów ze zbytnim obciążeniem membrany, nie ma też problemu z zastojami, ponieważ się nie pojawiają. Problemem jedynie jest ułatwienie odśnieżania zadaszenia, aby usunąć ewentualne obawy klientów. Z przeprowadzonej analizy wynika, że środkowa część zadaszenia, pomiędzy pierścieniami, położona jest bardziej płasko. Potwierdzają to obserwacje, gdyż w tym miejscu czasami gromadzi się śnieg. W dodatku nie jest łatwo go

stamtąd usunąć. Rozwiązaniem byłaby zmiana pochylenia membrany w tym miejscu. Zwiększenie pochylenia spowoduje samoczynne zsuwanie śniegu, bezpośrednio podczas opadów. Obecnie nie ma takiej możliwości, ponieważ aby zmienić kształt membrany, potrzeba zmodyfikować układ elementów podporowych. Żadna membrana nie jest na tyle elastyczna, aby można było ją aż tak naciągnąć, żeby pasowała do nowego układu elementów podporowych. Można natomiast pomyśleć o ewentualnej korekcie formy samej powłoki z wykorzystaniem elementów podtrzymujących.



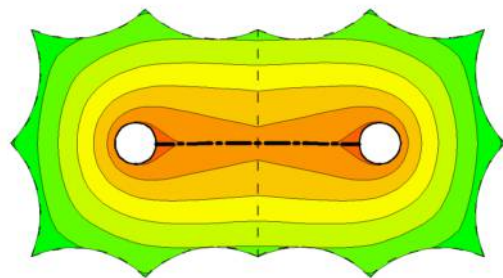
Il. 366. Istniejący układ konstrukcyjny zadaszenia w Katowicach

Autor proponuje podniesienie środkowej części zadaszenia przez wprowadzenie linii przeciwśniegowej umieszczonej pomiędzy pierścieniami podtrzymującymi membranę. Dzięki temu środkowa część zadaszenia nie będzie obniżać się pod śniegiem, utworzy się wyraźna krawędź dzieląca pokrywą śnieżną, a to przyspieszy proces zsuwania śniegu.



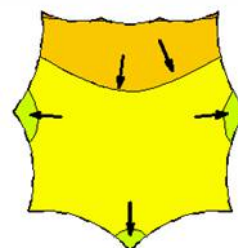
Il. 367. Propozycja wprowadzenia linii przeciwśniegowej

Natomiast zmieniając niektóre elementy konstrukcji można obniżyć niektóre punkty narożne lub podnieść pierścienie podtrzymujące. Dzięki temu można zwiększyć pochylenie powłoki dachowej oraz nieco zmienić kierunek spływaną wody. Zmieniłby się podział na zlewnie, a spadanie śniegu byłoby bardziej skoncentrowane. Pozwoliłoby to na okresową zmianę zagospodarowania pod zadaszeniem i ograniczenie dostępu do miejsc spadania śniegu.

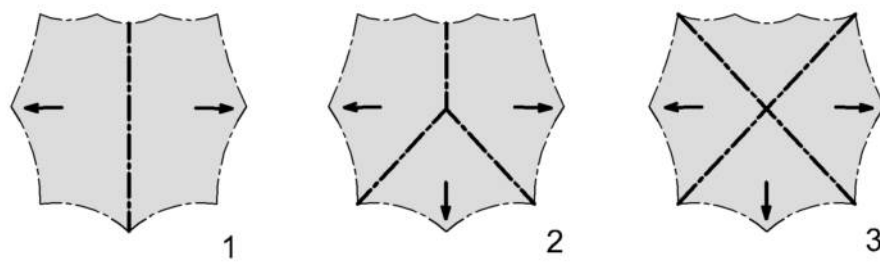


Il. 368. Plan warstwowy po korekcie formy

Innym przykładem, gdzie mogą być wykorzystane wyniki analizy kształtu jest zadaszenie w Zubrzycy Górnej. Ze względu na niewielkie pochylenie na zadaszeniu po intensywnych opadach gromadziła się woda, a w okresie zimy śnieg. Obecnie na wszelki wypadek membrana zdejmowana jest na zimę, a przy tej okazji starannie czyszczona. Mimo to aby ułatwić odprowadzanie wody z membrany, na środku zainstalowane zostało kolanko, które w razie potrzeby pozwala na połączenie elastycznego przewodu odprowadzającego wodę poza zadaszenie.



Il. 369. Plan warstwowy istniejącego zadaszenia w Zubrzycy Górnej



Il. 370. Warianty wprowadzenia dodatkowych cięgien

Porównując plan warstwicowy tego zadania z innymi przedstawionymi w tabeli 15, można zauważyć, że mimo niewielkich wymiarów odległości pomiędzy warstwicami są o wiele większe niż w przypadku innych zadań, czyli duża część powłoki ma bardzo małe pochylenie. Analizując układ istniejących podpór, trudno jest zmienić ich położenie bez zmiany kształtu membrany, czyli wykonania jej od nowa. Można natomiast zastanowić się, tak jak we wcześniejszym przypadku, nad wprowadzeniem dodatkowej linii znajdującej się pod membraną, która zwiększyłaby wytrzymałość membrany. Dzięki temu przy opadach nie dochodziłoby do powstawania worków wodnych.

W tym przypadku pojawia się problem kształtu. W Katowicach istnieje wyraźna linia wododziału, wzdłuż której można wprowadzić dodatkowe cięgno. W przypadku Zubrzyca Górnej przy formie wielobocznej linia jest nieczytelna. Na kolejnej stronie przedstawione są warianty wprowadzenia lin przeciwnieowych. Lina umieszczona wzdłuż osi symetrii (wariant 1) łączy punkt wysoki (z przodu) z punktem niskim (z tyłu), co nie miałoby sensu. Lina wododziału musi łączyć punkty wysokie. Można połączyć cięgna w układ litery Y (wariant 2), tak jak to jest w pętli autobusowej w Warszawie. Zamocowanie cięgien do tylnych górnych punktów jest uzasadnione, ale wprowadzenie prostopadłego, dodatkowego obciążenia działającego na przednią rozpórę

jest niewłaściwe. Najprawdopodobniej spowodowałoby to jej zniszczenie, dlatego konieczna byłaby wymiana na mocniejszą, co przy tym delikatnym rozwiązaniu psułoby wizualną lekkość zadania. W pierwotnej koncepcji nie było tej rozpory, została dopiero wprowadzona na skutek określenia sił od naciągu membrany.

Aby dodatkowo nie obciążać rozpory, można zastosować układ cięgien w kształcie litery X (wariant 3). Zamocowane byłyby w 4 wysokich narożnikach. Niestety umieszczone pod membraną cięgna podnoszą ją w górę i tworzą krawędzie grzbietowe. Spowodowałoby to, że w przedniej części powstałby obszar ograniczony cięgnami, utrudniającymi spływanie wody, tworzącymi progi, tak jak to jest obecnie w Płocku.

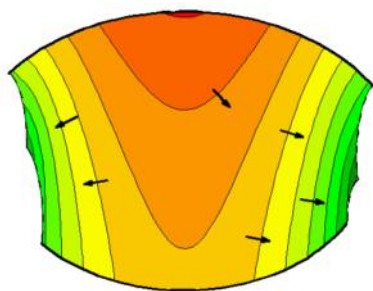
Wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie układu cięgien w kształcie litery X i umieszczenie na środku, w punkcie przecięcia cięgien, wiszącego słupa, który unosiłby środkową część powłoki. Powinien być zakończony wypukłą powierzchnią, aby nie doszło do przebicia membrany.



Il. 371. Schemat wypychania membrany przez wiszący słup

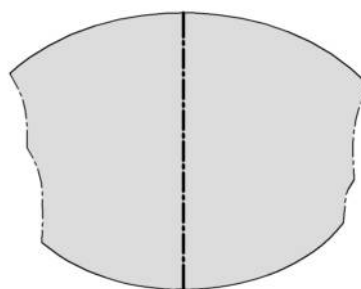
Takie rozwiązanie zwiększające napięcie membrany stosowane jest w innych krajach. Wiszący słup stale podnosi środkową część zadaszania i nie pozwala na gromadzenie wody. Zwykle takie słupy zaopatrzone są w śrubę pozwalającą na regulowanie długości, więc można je zastosować nawet przy obecnym kształcie membrany. Można je wykorzystać również w innych zadaszaniach, gdzie istnieje obawa powstawania worków wodnych. Trzeba jednak pamiętać, aby sprawdzić, czy dodatkowe obciążenie od dolnych ciągów nie naruszy stanu równowagi sił wewnętrznych. Zastosowanie takiej podpory jest korzystne, ponieważ przemieszcza się razem z membraną i zapewnia ciągle napięcie. Nawet przy niesymetrycznych obciążeniach powoduje, że membrana nadal jest równomiernie obciążona. Przeciwnie działają podpory sztywne, które skupiają obciążenia w jednym punkcie i mogą doprowadzić do wyrwania części membrany.

Kolejnym przykładem może być zadaszanie w Mrągowie. Przy bardzo silnych opadach deszczu lub w zimie, kiedy na membranie zalega warstwa śniegu czasami dochodzi do powstania zastoju, które muszą być ręcznie usuwane, przez zrzucanie śniegu lub wypompowywanie wody. Gdyby to nie zostało wykonane, to mogłoby dojść do rozerwania membrany.



Il. 372. Plan warstwicowy istniejącego zadaszania w Mrągowie

Z analizy kształtu, czyli planu warstwicowego oraz na podstawie obserwacji na miejscu wynika, że membrana w górnej, środkowej części jest mało pochylona i w dodatku ma niewielkie wygięcie. Dla formy opartej na dwóch łukach najważniejsze jest przeciwne wygięcie, czyli obniżenie środkowej części, aby zwiększyć krzywiznę powierzchni. Powinna tam powstać dolina, którą spływa woda, tak jak w Ustroniu, gdzie przy zdecydowanie większych wymiarach nie ma problemów z zastojami. Takie obniżenie można osiągnąć przez umieszczenie nad membraną napiętej liny, która pomiędzy łukami tworzyłaby krawędź kosową. W tym przypadku problemem jest znajdujące się w środkowej części zamocowanie, w którym konstrukcja stalowych łuków przechodzi przez membranę. Membrana w tym miejscu nie może się przemieszczać (il. 249). Miało to pełnić rolę dodatkowej podpory dla membrany. Innym rozwiązaniem może być zastosowanie dodatkowej liny lub nawet taśmy, ale umieszczonej pod membraną, w kierunku łączącym wierzchołki łuków podporowych. Dzięki temu na środku powstałaby dodatkowa podpora, ale liniowa. Powinna być umieszczona zgodnie z linią wododziału, podobnie, jak to zostało zrealizowane w Ustroniu, Stężycy i Wiśle (patrz tabela 12). Umieszczona tam lina chroni membranę przez zbytnim obniżaniem, ale tworzy też krawędź, na której dzieli się pokrywa śnieżna.



Il. 373. Propozycja wprowadzenia liny przeciwśniegowej w Mrągowie

Należy pamiętać, aby sprawdzić, czy umieszczenie takiej liny nie spowoduje zbyt dużego zwiększenia obciążeń poziomych siłami, które będą próbować przesunąć łuki kratownicowe ku sobie. Bardzo prawdopodobne jest to, że znajdujące się pomiędzy łukami kratownicowe rozpory nie pozwolą na takie przemieszczenia. Należy też pamiętać, żeby wprowadzić tylko jedną linię znajdującą się na środku, pokrywającą się z linią wododziału. Umieszczenie większej liczby lin lub przesunięcie ich w inne miejsce spowoduje, że przy obciążeniu powstaną progi utrudniające spływanie wody. Wydaje się, że umieszczenie takiej liny nie powinno kolidować ze wspomnianym wcześniej miejscem, gdzie konstrukcja stalowa przechodzi przez membranę.

Przedstawione powyżej propozycje nie są jedynymi i koniecznymi rozwiązaniami, jakie można przeprowadzić w wymienionych wcześniej obiektach. Przykłady zostały dobrane celowo, aby wyjaśnić metodę uzyskania właściwego kształtu. Należy pamiętać, że każda zmiana kształtu zawsze skutkuje zmianą sił wewnętrznych w membranie, ale też zmianą obciążenia konstrukcji podporowej. Może to skutkować potrzebą zmiany grubości elementów konstrukcyjnych, zwiększeniem ich liczby lub wprowadzeniem dodatkowych elementów. Najczęściej skutkiem zmian są dodatkowe odciągi lub rozpory, które przenoszą siły wynikające z naprężenia wstępnego. Przy opisach poszczególnych obiektów zostało zaznaczone, że w kilku przypadkach pojawiła się konieczność wprowadzenia rozpory, której nie było w koncepcji architektonicznej. W przypadku wprowadzenia dodatkowej liny przeciwnie-gowej pojawią się obciążenia skupione, a to wiąże się z powtórnią analizą konstrukcji. Wprowadzenie liny może zwiększyć nośność, ale może też zmniejszyć krzywiznę, a to przy wietrze może skutkować szybszym pojawianiem się łopotania membrany.

Autor celowo przedstawia zagadnienia związane z doбором kształtu lub sposobów wzmocnienia membrany, aby uniknąć rozwiązań przedstawionych na kolejnej fotografii.



Il. 374. Przykład wzmocnienia membrany za pomocą układu linek

Niewłaściwie ukształtowana membrana, mająca małe pochylenie i brak podwójnej krzywizny przy obciążeniu śniegiem i wodą deszczową obniża się, a to powoduje powstawanie zastojów. Na zdjęciu przedstawiony jest przykład takiego ukształtowania membrany wraz z próbą jego wzmocnienia przez układ linek. Brak zrozumienia zasad kształtowania zadaszeń membranowych spowodował, że próbowano wzmocnić membranę przez tworzenie dodatkowych podpór. Taki układ krzyżujących linek nie jest dobrym rozwiązaniem, gdyż tworzy dodatkowe progi, utrudniające spływanie wody. Poza tym przy podmuchach wiatru dochodzi do podrywania membrany w górę, a następnie uderzania o cienkie, stalowe linki. W takim przypadku membrana skazana jest na szybkie zniszczenie. Lepszym rozwiązaniem jest zmiana kształtu powłoki, uzyskanie podwójnej krzywizny przez obniżenie środkowej części. Dzięki temu membrana nie będzie musiała być tak mocno naprężona, a woda i śnieg i tak będą zsuwać się po powłoce.

Przedstawione przykłady nie są tylko technicznymi rozwiązaniami danego problemu.

Chodzi przede wszystkim o metodę kształtowania membrany, o narzędzie przydatne dla architekta, o kryteria niezbędne do podejmowania właściwych decyzji. Przedstawione przykłady mogą być traktowane, jako wachlarz propozycji, które może wykorzystać architekt. Jak widać projektowanie formy zadaszenia membranowego wymaga indywidualnego podejścia. Nie ma recepty, ale jest metoda pozwalająca na ocenę i podjęcie bardziej trafnych decyzji.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Nadawanie określonej formy napiętej tkaninie wydaje się czynnością wyjątkowo swobodną i pozbawioną ograniczeń. Natomiast projektowanie zadaszeń membranowych wymaga specjalistycznej wiedzy. Szybki rozwój i dostępność nowych technologii materiałowych spowodowały, że niezbędne stało się podjęcie tego tematu, jako pracy badawczej związanej z projektowaniem architektonicznym.

Zebrany materiał pozwolił na opracowanie wielowątkowych badań, zgodnie z przyjętą metodą i zakresem badań, oraz opracowanie wyników zgodnie z założonymi celami. Ostatecznie powstała praca, która:

- ma oryginalny charakter dzięki **usystematyzowaniu i syntezie wiedzy** na temat zagadnień związanych z projektowaniem obiektów z zadaszeniami membranowymi;
- stanowi wkład do rozwoju teorii projektowania architektonicznego dzięki **poszerzeniu narzędzi analitycznych**, w ramach przyjętej metody badawczej;
- przedstawia autorskie **wykorzystanie zależności geometrycznych** niezbędnych do analizy nieregularnych i swobodnych form napiętej membrany; nie jest to tylko narzędzie badawcze, ale również metoda analizy niezbędna w warsztacie architekta.

Praca charakteryzuje się całościowym ujęciem różnorodnych zagadnień związanych z projektowaniem i rozwiązaniami architektoniczno-budowlanymi. O aktualności podjętej problematyki i jej znaczeniu zarówno dla architektury, urbanistyki, jak i dla środowiska, świadczą przedstawione ogólne wnioski:

- stosowanie zadaszeń membranowych jako elementów osłonowych przed niekorzyst-

nym wpływem warunków środowiskowych pozwala architektowi na tworzenie oryginalnych form,

- ochrona przed intensywnym promieniowaniem słonecznym jest ważnym zagadnieniem zdrowotnym;
- zmieniające się warunki klimatyczne wiążą się również z szybkimi zmianami atmosferycznymi, dlatego zapewnienie właściwego komfortu podczas przebywania w otwartej przestrzeni, takiej jak dworce, stadiony lub amfiteatry, jest bardzo istotnym czynnikiem;
- stosowanie jasnych osłon stanowi naturalną ochronę przed promieniowaniem, nie tylko dla ludzi, ale dla całego środowiska, ponieważ zmniejsza efekt wyspy ciepła przez odbijanie promieniowania, a nie pochłanianie i gromadzenie, jak to się dzieje w przypadku ciemnych i ciężkich materiałów, np. asfaltu lub betonu;
- zadaszenia membranowe pozwalają na korzystanie z otwartej przestrzeni, nie zamykają użytkowników, lecz umożliwiają im stały kontakt z otoczeniem i świeżym powietrzem, co pobudza ich do dalszej aktywności;
- dzięki zastosowaniu odpowiednio napiętej membrany możliwe jest ograniczenie ilości materiałów budowlanych niezbędnych do postawienia danej struktury, dodatkową korzyścią jest możliwość powtórnego wykorzystanie lub poddania recyklingowi, co również zmniejsza wpływ na środowisko; dotyczy to wszystkich etapów, czyli: produkcji, transportu, użytkowania i utylizacji.

Przedstawione wnioski podkreślają rolę architekta i jego działalności w powiązaniu z ideą zrównoważonego rozwoju. Projektowanie zewnętrznych powłok budowlanych, dobór określonych materiałów, a nawet systemów konstrukcyjnych wpływają na środowisko zbudowane, w którym przebywa człowiek.

9.1. Ocena stanu wiedzy

Opierając się na założonej metodzie badawczej, w tym analizie literaturowej, określono następujące wnioski:

- rozwój zadaszeń membranowych, mimo że rozpoczął się z początkiem cywilizacji, to dopiero w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat, po osiągnięciach Freia Otto, nabrał tempa, a w samej Polsce dopiero ostatnie lata (po 2000 roku) zaowocowały udanymi stałymi realizacjami;
- zadaszenia membranowe są rozpoznawalnym elementem krajobrazu i wyróżniają się w środowisku zbudowanym, zostały celowo wybrane przez projektantów dla podkreślenia odmiennej funkcji, aby ich forma była rozpoznawalna dzięki kontrastowi nietypowej i miękkiej formy w otoczeniu ortogonalnych obiektów;
- formowanie napiętej membrany wiąże się z dużą swobodą, ale też z wieloma ograniczeniami, powodującymi konieczność przygotowania projektanta w odpowiednią wiedzę i narzędzia, przede wszystkim programy komputerowe;
- ponieważ kształt napiętej membrany uzależniony jest od sił wewnętrznych, więc już od samego początku procesu projektowego wymaga współpracy architekta z konstruktorem, inaczej niż w pozostałych rodzajach systemów konstrukcyjnych;
- w badaniach wielokrotnie zauważono, że aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie zadaszenia w okresach letnim i zimowym,

kwestią kluczową jest właściwe kształtowanie napiętej membrany, które przede wszystkim powinno być zgodne z właściwościami tkaniny ze względu na jej anizotropowe cechy.

9.2. Wyniki badań własnych

Zebrany materiał badawczy oraz ocena *in situ* zrealizowanych zadaszeń na terenie Polski pozwoliły na przeprowadzenie szczegółowych badań. Wykonano wielokrotne studium przypadku, w którym zdefiniowano charakterystyczne elementy:

- badania jakościowe architektury z wykorzystaniem metody POE (*Post Occupancy Evaluation*) na podstawie opinii użytkowników i administratorów obiektów pozwoliły na ustalenie tego, jakie problemy występują podczas korzystania z obiektów, a ich porównanie z koncepcją architektoniczną pozwoliło na określenie zalet i wad przyjętych rozwiązań;
- wywiady z projektantami umożliwiły uzyskanie odpowiedzi na pytania: co było inspiracją, jak przebiegał proces projektowania, w jaki sposób poszukiwano najlepszych rozwiązań oraz jak realizowano poszczególne zadaszenia?
- na podstawie udostępnionej dokumentacji projektowej przeprowadzono badania form poszczególnych membran, zwłaszcza analizę warstwic, która pozwoliła na sprawdzenie podjętych decyzji projektowych, co jest całkowicie oryginalnym zadaniem badawczym;
- dzięki autorskiemu podejściu do oceny skuteczności ochrony przez zadaszenia membranowe przeprowadzono badania środowiskowe, które pozwoliły na określenie wpływu na otoczenie w przestrzeni otwartej.

Wszystkie rozdziały publikacji zakończone są wnioskami dotyczącymi konkretnych badań, co było zasadniczym celem pracy. Wyniki badań nie tylko wskazały istotne problemy związane z kształtowaniem zadaszeń membranowych, ale też pozwoliły określić kierunki zmian – w którą stronę należy podążać, aby poprawić formę zadaszenia, aby zniwelować przyszłe problemy. Kilka takich przykładów zostało przedstawionych w rozdziale 8, jako sposoby wykorzystania badań.

Niektóre badania autora dotyczące zadaszeń membranowych były już wcześniej publikowane, między innymi związane z symboliką i pojęciem namiotu³²². Jest to ciekawe zagadnienie, zwłaszcza że tkwi ono w podświadomości ludzi. Dotyczy postrzegania struktur membranowych i łączenia ich z najprostszymi zadaszeniami wykonanymi z plecionych materiałów, stosowanymi przez przemieszczających się ludzi pierwotnych. Niestety powoduje to, że konstrukcje membranowe często są mylone z konstrukcjami namiotowymi. Powoduje to, że traktowane są jako tymczasowe, a w świadomości inwestorów pojawia się pogląd, że są nietrwałe i prowizoryczne.

9.3. Kierunki rozwojowe

Projektowanie architektoniczne traktowane całościowo pozwala na dostrzeganie zależności na styku kilku dziedzin naukowych. Analiza formy i procesu projektowania napiętej membrany jest bardzo wąskim, szczegółowym aspektem projektowania architektonicznego. Mimo to wydaje się, że badania te mają jeszcze niezbadany potencjał dotyczący **projektowania obiektów o zmiennych formach**. Ciągły postęp i stale zmieniające się potrzeby użytkowników generują konieczność stosowania materiałów elastycznych i projektowania

mechanizmów ulegającym przemysłanym deformacjom.

Nowoczesne narzędzia cyfrowe dają nowe możliwości kształtowania architektury o miękkich formach. Płynnie zmieniające się kształty osiągnąć są przez parametryczne dostosowywanie modeli obliczeniowych. Szybkie wprowadzanie zmian pozwala na generowanie form wielowariantowych, a powstałe w ten sposób obiekty obecnie nazywane są architekturą parametryczną.

Zagadnienie poszukiwania kształtu (*form finding*), od którego rozpoczęło się projektowanie napiętych membran, obecnie jest podstawowym elementem projektowania z wykorzystaniem narzędzi cyfrowych, dlatego wyłaniającym się kolejnym problemem badawczym jest **określenie kryteriów**, nie tylko funkcjonalnych (jak to zostało wykonane), ale także **estetycznych wyboru formy** uzyskanej cyfrowo, określenie zasad selekcji z chaosu możliwości. Poza tym autor zauważył potrzebę dalszego poszerzenia badań o zagadnienia związane z kształtowaniem zadaszeń membranowych pod względem akustyki; zwłaszcza, że większość obiektów z tymi zadaszeniami przeznaczonych jest na imprezy kulturalne lub sportowe. Napięta membrana może znacząco poprawiać lub pogarszać odbiór dźwięków. Membrana nie zatrzymuje dźwięków o niskiej częstotliwości, natomiast pozostałe dźwięki częściowo odbija. W zależności od kształtu i położenia źródła dźwięku może to powodować powstawanie zbędnego szumu, zmniejszającego czytelność mowy. Membrana odbija też dźwięki wydawane przez publiczność, co wzmacnia emocje widzów, ale też zawodników na stadionie. W tym przypadku nie jest istotna czytelność dźwięku, a nawet częściowe rozmycie głosu ma swój efekt. Gorzej jest

³²² Krzysztof Gerlic, *Tent as a symbol of traditional roofing form*, [in:] *The signs of tradition in architecture*. Oficyna Wydawnicza Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej, Nysa 2008, p. 55-62.

w przypadku organizowania koncertów, gdy zrozumienie głosu, pojedynczych słów jest bardzo ważne. Dźwięki odbite przypadkowo, docierające do ucha odbiorcy z opóźnieniem utrudniają ich odbiór.

Praca zawiera liczne ilustracje przedstawiające rzuty, przekroje opracowane przez autora oraz materiały fotograficzne uzupełniające część tekstową. Poza tym autor zapoznał się z możliwościami oprogramowania zajmującego się modelowaniem napiętych powłok. Duża biegłość w obsłudze programów komputerowych w tym AutoCAD-a oraz znajomość geometrii i podstaw programowania umożliwiły przygotowanie procedur wspomagających modelowanie i analizę formy.

Przeprowadzone badania uprawniają do stwierdzenia, że stosowanie zadaszeń membranowych jest jednym z prostszych, choć niedocenianych rozwiązań, a pozwalających na naturalne wyróżnienie obiektu przez architektoniczną formę.

BIBLIOGRAFIA

1. Ambroziak A., Kłosowski P., Nowicki M.: O problemach w projektowaniu konstrukcji membranowych. *Inżynieria i Budownictwo*, 1/2005.
2. Ambroziak A., Kłosowski P.: O projektowaniu konstrukcji membranowych. *Inżynieria i budownictwo* 8/2008.
3. Ambroziak A., Kłosowski P.: On aspects of tensile structures analysis. Local Seminar of IASS Polish Chapter Lightweight Structures in Civil Engineering. Wydaw. Nauk. Micro-Publ. J.B. Obłęski, Częstochowa 2004.
4. Ambroziak A.: Membrane-hanging roof analysis: an example. *Task quarterly*, Vol. 10, 3/2006.
5. Ambroziak A.: Geometrycznie nieliniowa analiza membran stosowanych do konstrukcji przekryć wiszących z uwzględnieniem różnych typów związków konstytutywnych, Autoreferat Pracy Doktorskiej, Gdańsk, 7 czerwiec 2006.
6. Baier B., Meyer-Miethke S.: *Anpassungsfähig Bauen Adaptable Architecture*, IL 14. Institut für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1975.
7. Ballenstedt J.: *Architektura – historia i teoria*, PWN, Warszawa-Poznań 2000.
8. Berger H.: *Light structures - structures of light. The art and engineering of tensile architecture*, Birkhäuser Verlag, Basel 1996.
9. Berger H.: Form and function of tensile structures for permanent buildings. *Engineering Structures* 21 (1999).
10. Broniatowska M.: Konkurs idea: membrana. *Architektura i Biznes*, 6/2011.
11. Borusiewicz W.: *Konstrukcje budowlane dla architektów*, Arkady, Warszawa 1978.
12. Bronszejn I.N., Siemiendajew K.A.: *Matematyka, poradnik encyklopedyczny*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
13. Brych M.: Realizacja celów humanitarnych dzięki nowym rozwiązaniom technologicznym, *Czasopismo Techniczne*, z. 18. *Architektura*, z. 8-A, Kraków 2010.
14. Burkhardt B., Otto F., Schmall I.: *Zelte Tents*, IL 16. Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1976.
15. Burkhardt B., Pankoke U.: *Wandelbare Dächer Convertible roofs*, IL 5, Institut für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1972.
16. Büttner O., Karczmarczyk S.: Membrany jako konstrukcje przekryć powierzchniowych o stabilnym kształcie, [w:] *Problemy projektowe w kontekście nowych technologii budowlanych*, V Konferencja Naukowo-Techniczna, Kraków, 24 października 2003.
17. Campbell D.M.: The unique role of computing in the design and construction of tensile membrane structures. *Proceedings of ASCE Second Civil Engineering Automation Conference*, New York 1991.
18. Ceola M.T.: *Il Grande Bigo*. Cannobio, Milano 1992.
19. Cząstka A.: *Architektura a natura – problem mimesis w architekturze*, Monografia – Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 2007.
20. Drew D.: *Tensile architecture*, Granada Publishing Limited, London 1979.
21. Engel H.: *Structure Systems*, Hatje Cantz, Germany 1997.
22. Fabiańska P.: Skrzydła i żagle, Opera Leśna w Sopocie. *Świat Architektury*, 10(28)/2012.
23. Filipkowski J., Jacoszek J., Sienkiewicz Z.: Konstrukcja i badania powłoki tekstylnej. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 11/1988.
24. Flora S.: *Le Corbusier in Detail*. Architectural Press, Elsevier, Amsterdam 2007.

25. Foretník J.: *Architektura, geometrie a výpočetní technika*, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2010.
26. Forster B., Mollaert M.: *European design guide for tensile surface structures*. Tensinet 2004.
27. Gałkowski M.: *Membrana*. *Architektura & Biznes* 9/2003.
28. García-Diego C., Llorens J.I., Pöppinghaus H.: *El pabellón de Venezuela en la Expo 2000 de Hannover*, *Informes de la Construcción*, Vol. 53, No. 473, mayo/junio 2001.
29. Gass S.: *Form Kraft Masse 5 - Experimente*, Il 25. Institut für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1990.
30. Gerlic K.: *Design elements for snow-load resistant membrane roofs*, [in:] *Beyond the limits of man. Proceedings of the IASS 2013 Symposium*, Wrocław Poland 23-27 September 2013, (eds.): J.B. Obrębski, R. Tarczewski. International Association for Shell and Spatial Structures. Oficyna Wydaw. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
31. Gerlic K.: *Geometrical aspects of surface in the membrane structures designing*, [in:] *Lightweight structures in civil engineering. International IASS symposium organized by Polish Chapter of International Association for Shell and Spatial Structures*, Warsaw, 24-28 June, 2002.
32. Gerlic K.: *Przekrycia z tkanin na przykładzie ołtarzy papieskich*, [w:] *Budownictwo Sakralne i Monumentalne*, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 2002.
33. Gerlic K.: *Tent as a symbol of traditional roofing form*, [in:] *The signs of tradition in architecture*, Oficyna Wydawnicza Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej, Nysa 2008.
34. Gerlic K.: *The membrane roof effect on the microclimate of open space of a mall in Katowice*, [in:] *Lightweight structures in civil engineering. Contemporary problems. Monograph from Scientific Conference of IASS Polish Chapters. XX LSCE 2014*, Warsaw, 25-28 September 2014, ed. by J.B. Obrębski. Warsaw: Micro-Publisher-Consultant-Project Jan B. Obrębski Wydaw. Naukowe + Studio Budowlane, 2014.
35. Gilewicz W.: *Amfiteatr Kadzielnia*. *Architektura Murator*, nr 8, 2012.
36. Gleaser L.: *The work of Frei Otto and his teams 1955-1976*, IL 17. Institute of Lightweight Structures, Stuttgart 1978.
37. Głowacki T.: *Stadion Miejski we Wrocławiu*, *Architektura Murator*, nr 3, 2012.
38. Göppert K., Haspel L., Winkler A.: *National stadium in Warsaw – general description of the structure*, *Budownictwo i inżynieria środowiska*, z. 58 (1/11) 2011, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*.
39. Göppert K., Haspel L., Winkler A.: *O projekcie i realizacji Stadionu Narodowego w Warszawie*. *Inżynieria i Budownictwo* 7/2012.
40. Gössel P., Leuthäuser G.: *Architektura XX wieku*, Taschen 2006.
41. Happach M.: *Przystań wodna we Włocławku*. *Architektura-Murator* 11/2014.
42. Hensel M., Menges A., Weinstock M.: *Emergence. Morphogenetic Design Strategies*. *Architectural Design*, Vol. 74, No. 3, London 2004.
43. Hensel M., Achim Menges, Michael Weinstock, *Engineering Design: Working with Advanced Geometries*, in *Emergence: Morphogenetic Design Strategies*, *Architectural Design* Vol. 74, No. 3, 2004.
44. Herrmann K.: *Rozwój tekstylnych konstrukcji powłokowych. Badania i przykłady rozwiązań*. *Inżynieria i budownictwo* 10/1988.
45. Herwig O.: *Das Grosse im Kleinen - Architektur und Design wachsen zusammen*, im Christian Schittich, *Mikroarchitektur: kleine Bauten, temporäre Strukturen, Raumzellen*, Detail 2010.
46. Huntington C.G.: *Tensile Fabric Structures: Design, Analysis, and Construction*. American Society of Civil Engineers, 2013.
47. Ishii K.: *Membrane designs and structures in the world*. Shinken-chiku-sha, Tokyo 1999.
48. Jabłońska J.: *Stadion Legii, Warszawska realizacja pracowni JSK Architekci*. *Świat Architektury*, nr 7, 2010.
49. Jabłońska J.: *Stadion piłkarski w Gdyni, nowy obiekt sportowy*. *Świat Architektury*, nr 3, 2011.
50. Jaeger F.: *Next 3 Stadia*, Warsaw Bucharest Kiev. Jovis 2012.

51. Januszkiewicz K.: O projektowaniu architektury w dobie narzędzi cyfrowych – stan aktualny i perspektywy rozwoju. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
52. Januszkiewicz K.: Powierzchnie minimalne i membrany architektoniczne, *Archivolta*, nr 3, 2013.
53. Januszkiewicz K.: UEFA Stadion Narodowy w Warszawie. *Archivolta*, nr 2, 2012.
54. Kaltenbach F.: *Translucent Materials: Glass, Plastics, Metals*, Edition Detail, 2004.
55. Kłosowski P.: Projektowanie przekryć z tkanin technicznych. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2016.
56. Knippers J., Cremers J., Gabler M., Lienhard J.: *Atlas Kunststoffe + Membranen - Werkstoffe und Halbzeuge Formfindung und Konstruktion*, Edition Detail, Munchen 2010.
57. Kobiela S., Hutnik E.: Przekrycia stalowe dużych rozpiętości, cz. I. *Inżynier budownictwa* 6/2014.
58. Koch K.-M., Habermann K.: *Membrane Structures: The Fifth Building Material*. Prestel Verlag, 2004.
59. Kochanowska D.: Gdańskie dachy powłokowe. *Architektura*, 1/1965.
60. Kolendowicz T.: Konstrukcje błonowe. *Budowlany Informator Techniczny*, 7/8 2001.
61. Kolendowicz T.: *Mechanika budowli dla architektów*, Arkady, Warszawa 1996.
62. Kołakowski M.M.: Mity i marzenia. *Architektura i Biznes*, 6/2012.
63. Kowal A.: A new lightweight covering for the Art Nouveau Railway Station. *Tensinews* 23, September 2012, *TensiNet*.
64. Kowal A.: Covering for the Bus Station Warszawa Wschodnia. *Tensinews* 23, September 2012, *TensiNet*.
65. Kowal A.: Kadzielnia Amphitheatre. A combination of retractable and permanent covering. *Tensinews* 23 September 2012, *TensiNet*.
66. Kowal A.: Membranowo-linowa konstrukcja amfiteatru Kadzielnia, Cable membrane structure of Kadzielnia Amphitheatre, ZK2014 – Konstrukcje metalowe/Metal Structures 2-4 lipca/July 2014, Kielce-Suchedniów, Poland.
67. Kowal A.: Powłokowe przekrycia o dużej rozpiętości. *Materiały budowlane*, 11/2005.
68. Kowal A.: Wybrane zagadnienia projektowania i realizacji konstrukcji membranowych, *Przegląd Budowlany*, 5/2012.
69. Krishna P.: *Cable - Suspended Roofs*. McGraw-Hill Book Company, New York 1978.
70. Kronenburg R.: *Portable Architecture – Design and Technology*. Birkhauser Verlag, Basel, Boston, Berlin 1997, p. 60-64.
71. Kronenburg R.: *Portable Architecture*. Architectural Press, Oxford 2003
72. Krüger S.: *Textile architecture – Textile Architektur*, Jovis, Berlin 2009.
73. Kumaniecki K.: *Słownik łacińsko-polski*, PWN, Warszawa 1986.
74. Kuś S., Żórawski A.: Rozwój ciężnowych konstrukcji podwieszonych od hali widowiskowej w Katowicach do Georgia Dome w Atlancie. *Inżynieria i Budownictwo*, 1/1997.
75. Kysiak M.: *Architektura pawilonów wystawowych – funkcja, forma, konstrukcja*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
76. Latour S., Szymski A.: *Rozwój współczesnej myśli architektonicznej*, Państw. Wydaw. Nauk. Warszawa 1985.
77. Lebediew J.S.: *Architektura i bionika*, Arkady, Warszawa 1983.
78. Lewis W.J.: *Konstrukcje napięte. Ich forma i praca*, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2008.
79. Lynch K.A.: *The Renew BC Place in Vancouver, BC, Canada*. Proceedings, IASS Symposium 2013, published by the IASS, Wrocław, Poland 2013.
80. Majewski M.: *Przekrycia powłokowe – geometryczne kształtowanie w projektowaniu architektonicznym*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1997.
81. Malinga N.: *Kompleks sportowy XXI wieku w Konstantynie, Algieria*. *Archivolta* 3(59)2013.
82. Mandrysz A., Miara L.: *Konstrukcja nośna i pokrycie membranowe dachu Stadionu Narodowego w Warszawie*, *Materiały Budowlane*, 11/2012.

83. Menges A.: AA Membrane Canopy in London, Detail 5/2010.
84. Miara L., Ziemczyk P.: Supporting structure and roof diaphragm of the Warsaw National Stadium, Збірник Наукових Праць, Видавництво Сталь, Київ 2012.
85. Miara L., Ziemczyk P.: Stadion Narodowy w Warszawie. Konstrukcja stalowa, linowa i dach, cz. II. Inżynier budownictwa, 9/2012.
86. Miara L., Ziemczyk P.: Nadzór nad przygotowaniem i realizacją konstrukcji stalowej Stadionu Narodowego w Warszawie. Inżynieria i budownictwo, 7/2012.
87. Michalak H., Pyrak S., Szulborski K.: Przekrycia podwieszane trybun stadionów sportowych, Inżynieria i budownictwo, 1/1997.
88. Mollaert M.: Tensile Membrane Buildings and Building Components, [in:] VUB, TensiNet Symposium, Designing Tensile Architecture, 19-20 September, Brussel 2003.
89. Moritz K.: Membranwerkstoffe im Hochbau. Detail 6/2000.
90. Mycielski K., Zelent R.: Gdzie historia splata się z nowoczesnością, Dworzec Główny PKP we Wrocławiu. Świat Architektury, 7(25)/2012.
91. Mycielski K.: Modernizacja storczykarni przy zamku w Łąncucie. Architektura-Murator 9/2011.
92. Orton A.: The way we build now: form, scale and technique. E & Fn Spon, London 1988.
93. Otto F., Rasch B.: Finding form. Towards an architecture of the minimal. Edition Axel Menges, Munich 1995.
94. Otto F., Trostel R., Schleyer F.K.: Tensile structures. Design, structure, and calculation of buildings of cables, nets, and membranes, The MIT Press 1973.
95. Otto F.: Dachy wiszące. Forma i konstrukcja. Arkady, Warszawa 1959.
96. Otto F.: Das hängende Dach. Gestalt und Struktur, Bauwelt Verlag, Berlin 1954.
97. Otto F.: Tensile Structures, MIT Press, Cambridge 1973.
98. Otto F.: Zugbeanspruchte Konstruktionen. Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen, Ullstein, Frankfurt, Berlin 1962.
99. Pałkowski S.: Konstrukcje stalowe, wybrane zagadnienia obliczania i projektowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
100. Pasternak H.: CargoLifter – hala sterowców, Inżynieria i budownictwo, 6/2001.
101. Pawłowski A.Z., Trębacz P.: Konstrukcje mobilne. Architektura-Murator, 10/97.
102. Pelczarski M.: Attempt of classification of types of membrane structures, [in:] Lightweight Structures In Civil Engineering. International Seminar of IASS Polish Chapter, (eds.): J.B. Obrębski, Częstochowa 2004.
103. Pelczarski Z.: Modernizacja śląskiego giganta. Architektura i Biznes, 12/1998.
104. Pelczarski Z.: Polifunkcyjny megateatr. Architektura i Biznes, 10/1998.
105. Pepliński J.: Membrany dookoła świata. Zawód Architekt, 4/2011.
106. Polański S., Kowalewski A., Daniluk J.: Geometria dla konstruktorów, WNT, Warszawa 1965.
107. Prokopska A.: Analiza metodologiczna wybranych działań projektowych w procesie architektonicznym, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 236.
108. Przewłocki S.: Geometria wykreślna w budownictwie. Arkady, Warszawa 1997.
109. Rduch Ł., Walentyński R.: Przekrycie trybuny stadionu na przykładzie stadionu piłkarskiego Legii w Warszawie. Nowoczesne Hale, 1/15.
110. Reichhart A., Göppert K., Haspel L., Winkler A.: Przekrycie i obudowa piłkarskiego Stadionu Narodowego w Warszawie Inżynieria i budownictwo, 6/2012.
111. Reichhart A.: The National football stadium in Warsaw, Збірник Наукових Праць, Видавництво Сталь, Київ 2012.
112. Rębielak J.: Numerical modeling of lightweight structures. ed. J.B. Obrębski, Proceedings of International Conference on Lightweight Structures in Civil Engineering, Warsaw, Poland, June 24-28, 2002.
113. Rogers H.: Projektować z modelami ciągnowymi. Architektura i Biznes, 10/1998.

114. Rubinowicz P.: Chaos jako porządek wyższego rzędu w wybranych trendach współczesnej architektury, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2010.
115. Ryżyński W.: Rozbudowa stadionu w Poznaniu. *Architektura-Murator*, 8/2012.
116. Samuel F.: *Le Corbusier in Detail*. Architectural Press, Elsevier, Amsterdam 2007.
117. Sánchez J., Serna M.Á., Morer P.: A multi-step force-density method and surface-fitting approach for the preliminary shape design of tensile structures, *Engineering Structures* 29 (2007).
118. Scheuermann R., Boxer K.: *Tensile architecture in the urban context*. Oxford, Butterworth Architecture 1996.
119. Schaur E.: *Basics: form force mass*, IL 21. Institute of Lightweight Structures, Stuttgart 1979.
120. Schierle G.G.: *Structure and design*. Cognella, 2008.
121. Schmid G.: Expo 2000, planet M covering with stainless steel fabric, in *The Design of Membrane and Lightweight Structures*. VUB Brussels University Press, 2002.
122. Schock H.J.: *Soft shells. Design and technology of tensile architecture*, Birkhauser Verlag, Basel, Berlin, Boston 1997.
123. Schodek D.L., Bechthold M.: *Structures*. Pearson Prentice Hall, New Jersey 2008.
124. Schunck E., Oster H.J., Barthel R., Kießl K.: *Atlas dachów. Dachy spadziste*, MDM, Cieszyn 2005.
125. Seidel M.: *Tensile Surface Structures, A practical Guide to cable and Membrane Construction*, Ernst & Sohn, Berlin 2009.
126. Shaeffer R.E.: *Tensioned Fabric Structures. A practical Introduction*. ASCE, New York 1996.
127. Siegel C.: *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*. Arkady, Warszawa 1974.
128. Sierzan A.: *Architektura tekstylna*. *Budownictwo fachowe*, 4/2000.
129. Skrzyńska M., Czerni S.: *Słownik naukowo-techniczny angielsko-polski*. PWN, Warszawa 1995.
130. Sokołowska M., Bender A., Żak K.: *Słownik naukowo-techniczny niemiecko-polski*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
131. Solska M.: *Architektura organiczna a bioniczna a nowoczesne technologie budowlane*, *Czasopismo Techniczne – Architektura*, z. 2-A, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2011.
132. Stiasny G., Kryński W.: Nowy stadion Legii w Warszawie, *Architektura-Murator*, 10/2010.
133. Szewczyk K.: *Form-finding and patterning techniques for membrane structures*. M.Sc Thesis. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby 2013.
134. Szolginia W.: *Architektura*. Sigma NOT, Warszawa 1992.
135. Tarczewski R.: *Morphological similarities of primeval tents and contemporary tensile surface structures*. Local Seminar of IASS Polish Chapter Lightweight Structures in Civil Engineering. Wydaw. Nauk. Micro-Publ. J.B. Obrębski, Częstochowa 2004.
136. Tarczewski R.: *Topologia form strukturalnych: naturalne i tworzone przez człowieka prototypy form konstrukcyjnych w architekturze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
137. Tibert G.: *Numerical Analyses of Cable Roof Structures*, Royal Institute of Technology, Department of Structural Engineering, Stockholm 1999.
138. Titotto S., Pauletti R., Brasil R.: *Tensile structures: form and function relationships*. International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Barcelona 2003.
139. Tomlow J.: *Das Modell, The Model, El Modelo*, IL 34. Institute of Lightweight Structures, Stuttgart 1989.
140. Topping B.H.V., Ivanyi P.: *Computer aided design of cable membrane structures*. Saxe-Coburg Publications on Computational Engineering, 2008.
141. Trajdos T.: *Matematyka dla inżynierów, kurs wyższy*. PWN, Warszawa 1974.
142. Véron P., Léon J.C., Trompette P.: *Design of textile structures: methodology and data architecture*, *Computers and structures* 67, 1998.
143. Wakefield D.S.: *Engineering analysis of tension structures, theory and practice*. *Engineering structures*, 21/1999.

144. Weinstock M.: Self-organisation and material constructions. *Architectural Design*, 76(2)2006.
145. Wernicki P.: Zachować charakter miejsca, rozmowa z architektem Jackiem Szczęsnym. *Sto Journal* 1/2012.
146. Wilde K., Chróścielewski J., Miśkiewicz M., Rucka M.: Diagnostyka i monitoring nowego przekrycia Opery Leśnej w Sopocie, [w:] *Awarie Budowlane 2013 – Diagnostyka w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji*, XXVI konferencja naukowo-techniczna, Szczecin - Międzyzdroje, 20-24 maja 2013.
147. Wilde K.: Systemy monitoringu konstrukcji obiektów budowlanych, [w:] *Awarie budowlane XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna 2013*.
148. Witrin W.R.: Architektura pod żaglami, konstrukcje membranowe. *Budownictwo fachowe*, 3/2001.
149. Zagubień A.: Konstrukcje tekstylne, [w:] *Budownictwo ogólne*, tom 4. Konstrukcje budynków. Arkady 2010.
150. Zagubień A.: Materiały tekstylne stosowane w konstrukcjach namiotowych. *Materiały budowlane*, 11/2003.
151. Zelent R.: Rewitalizacja zabytku mającego pełnić funkcję nowoczesnego dworca. *Architektura-Murator* 9/2012.
152. Żółtowski K., Drawc M.: Stadion Narodowy. Model statyczny do monitoringu konstrukcji, w *Awarie budowlane XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna 2015*.

PRACE ZBIOROWE LUB NIE PODANO AUTORA

153. Allianz Arena, München, *Detail* 9/2005.
154. Amfiteatr w Ustroniu. *Architektura-Murator* 7/2004.
155. Bulwar Nadmorski w Gdyni z placem zabaw na plaży Śródmieście. *Architektura-Murator* 5/2009.
156. Centrum kultury w Kołobrzegu. *Architektura-Murator* 11/2010.
157. Drobne interwencje zmieniają miasto: Ostrowiec Świętokrzyski, Wrocław, Kraków, Gdynia, Warszawa, Katowice. *Architektura-Murator* 5/2009.
158. Faltbares Dach für Festungsarena Kufstein. *Detail* 12/2011,
159. Konkurs PZiTb, Budowa Roku 2010.
160. Millennium Dome in London, *Detail* 6/2000.
161. National Stadium in Warsaw. *Detail* 10/2012.
162. Opera Leśna w Sopocie. *Architektura* 11-12/1962.
163. Opis historii Opery Leśnej, gabłota przed wejściem 2003.
164. Oskar Hansen. *Architektura i Biznes* 10/2003.
165. Pneumatyczne dachy i elewacje, *Budownictwo fachowe*, 3/2001.
166. SARP Komunikat styczeń/luty 2010.
167. Słownik języka polskiego PWN.
168. Słownik naukowo-techniczny niemiecko-polski. WNT, Warszawa 2002.
169. Structure of the Hajj Terminal, Jeddah, Saudi Arabia. *Architectural Review*, October 1983 (1040).
170. Temporary pavilion in Noda, *Detail* 10/2012.
171. Uniwersalny słownik języka polskiego. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2008.
172. Watercube – National Swimming Centre in Beijing, *Detail* 12/2007.
173. Wielka encyklopedia powszechna. PWN, Warszawa 1962-1970.
174. Wielki słownik angielsko-polski. Wydawnictwo Techland, 2006.

STRONY INTERNETOWE

175. Amfiteatr Bemowo w Parku Górczewska.
http://www.bemowo.waw.pl/bemowo/inwestycje/inwestycje_zrealizowane_2006_/amfiteatr_bemowo_w_parku_gorczyz,154/ (14-11-2010).
176. Amfiteatr na Bemowie.
http://www.inzynierbudownictwa.pl/wydarzenia,relacje,artykul,amfiteatr_na_bemowie,1096 (28-04-2008).
177. Amfiteatr w Parku Kasprowicza w Szczecinie. <http://architektura-w-szczecinie.blogspot.com/2013/07/amfiteatr-w-parku-kasprowicza-w.html> (26-05-2015).
178. Amfiteatr w Parku Sowińskiego. <http://okwola.ehost.pl/amfiteatr/> (12-06-2013).
179. Frei Otto. Casabella 301 1966, 35. <http://rndrd.com/i/1364> (28-04-2015)
180. Habest: Remont i modernizacja amfiteatru w parku im gen. J. Sowińskiego. 2001.
<https://drive.google.com/file/d/0B82Kf5d64Qh1Q3p5TThacGhxSGM/edit?pli=1> (16-06-2015).
181. http://blog.modernica.net/wp-content/uploads/2016/02/german_pav_nae000990839.jpg (7-05-2015).
182. <http://cheops4.org.pl/phpBB3/viewtopic.php?t=1113&start=175> (25-09-2013).
183. http://commons.bcit.ca/civil/edufacts/glulam_tree.html (6-04-2005).
184. <http://ersatzexpat.blogspot.com/2013/04/the-khan-shatyr-astanas-giant-tent.html> (28-04-2015).
185. <http://mapy.geoportal.gov.pl>
186. <http://mat.2pigroup.pl/?q=node/22> (12-09-2014)
187. <http://ndagallery.cooperhewitt.org/gallery/16168769/Expo70-Osaka> (25-04-2014)
188. <http://news.lib.ncsu.edu/changinglandscape/files/2010/07/dorton.png> (28-11-2001).
189. <http://www.archdaily.com/33110/burnham-pavilion-zaha-hadid> (24-08-2009).
190. <http://www.arcspace.com/features/alsop-architects/clarke-quay/> (23-08-2006).
191. <http://www.arenasing.com/en/projects/singular-buildings/thirst-pavilion> (8-07-2016).
192. <http://www.birdair.com/projects/georgia-dome> (13-03-2001).
193. <http://www.birdair.com/projects/university-la-verne-sports-science-and-athletics-pavilion> (22-07-2016).
194. <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/OSAKA/intro.html> (22-07-2016).
195. <http://www.detail-online.com/inspiration/music-pavilion-in-new-york-109527.html> (20-09-2016).
196. <http://www.domerama.com/general/what-is-the-eden-project/> (8-04-2011).
197. <http://www.fabritecstructures.com/portfolio-rosa-parks-transit-center-detroit-mi> (23-07-2016).
198. <http://www.fosterandpartners.com/projects/khan-shatyr-entertainment-centre/> (21-05-2015).
199. http://www.gdynia.pl/wladze/rada/4220_44339.html (31-08-2014).
200. http://www.kleczkowski-architekt.pl/p_przemysl.html (3-04-2015).
201. <http://www.mck.zywiec.pl/amfiteatr-pod-grojcem,3.html> (30-07-2013).
202. http://www.publics.bg/en/news/296/Open-air_Hajj_Terminal_in_Saudi_Arabia_receives_2010_AIA_25-year_award.html (26-07-2016).
203. <http://www.sefar.com/data/docs/en/7238/AS-PDF-Architecture-Exterior-Medina-sunshades-EN.pdf?v=1.3> (29-12-2016).
204. http://www.slask.sport.pl/sport-slask/1,128704,14047454,Stadion_Slaski_juz_dawno_mogl_miec_dach__Stracilismy.html (6-06-2013).
205. <http://www.tenarafabric.com/4t40.html> (13-03-2014).
206. <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4413.html> (8-07-2016).
207. <http://www.vector-foiltec.com/about-us/history-etfe/> (14-04-2016).
208. <http://www.zaha-hadid.com/design/lilas-installation/> (6-05-2015)

209. <http://zywiecczyzna24.net/wpis/502/amfiteatr-pod-grojcem-w-zywcu> (18-04-2013).
210. <https://adesigndaily.wordpress.com/2012/06/13/olympic-shooting-venue-by-magma-architecture/> (23-08-2012)
211. https://en.wikipedia.org/wiki/2008_Atlanta_tornado_outbreak (8-07-2016).
212. https://en.wikipedia.org/wiki/Centre_Pompidou-Metz (6-05-2015).
213. [https://en.wikipedia.org/wiki/Marsyas_\(sculpture\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Marsyas_(sculpture)) (21-11-2015).
214. https://en.wikipedia.org/wiki/Millennium_Dome#/ (11-02-2016).
215. https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_Islands_Resort#/media/File:Tropical_Islands_Luftbild_2008.png (11-02-2016).
216. https://pl.wikipedia.org/wiki/Dworzec_Tramwajowy_Centrum (29-12-2016).
217. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f0/Olympiastadion_Muenchen.jpg (14-02-2013)
218. <https://www.dezeen.com/2013/09/25/serpentine-sackler-gallery-by-zaha-hadid/> (19-11-2016).
219. <https://www.google.pl/maps>
220. Internetowe Mapy Systemu Informacji Przestrzennej Katowic. <http://mapserver.um.katowice.pl/> (25-10-2013).
221. Koblak D.: Amfiteatr – worek bez dna. <http://plock.naszemiasto.pl/archiwum/amfiteatr-worek-bez-dna,1543980,art,t,id,tm.html> (27-08-2008).
222. Krótka historia szczecińskiego Teatru Letniego. <http://www.architekturakrajobrazu.info/przestrze-miejska/141/1994-krotka-historia-szczeciskiego-teatru-letniego/> (3-05-2015).
223. Opera Leśna - Obiekty - Bałtycka Agencja Artystyczna BART. <http://bart.sopot.pl/obiekty/operalesna> (10-01-2014).
224. Popp P.: Plastische Raumwirkung: Nationalbibliothek in Riad. <http://shop.detail.de/de/einzelhefte/detail-12-2013-planen-und-bauen-als-prozess.html> (22-07-2016).
225. Przestrzeń przy Bulwarze Nadmorskim wyróżniona. http://www.gdynia.pl/wydarzenia/70_61282.html (29-09-2010).
226. Serwis internetowy Wydziału Geodezji Miasta Gdyni. server.miasto.gdynia.pl/GeoSerwer/e-mapa.htm (4-11-2013)
227. Struktura nośna zadania powłokowego Amfiteatru w Parku im. gen. J. Sowińskiego. <http://okwola.ehost.pl/amfiteatr/> (10-01-2013).
228. Teatr Letni w Szczecinie. https://pl.wikipedia.org/wiki/Teatr_Letni_w_Szczecinie (26-05-2015).
229. Woźniak H.: Ekspresowa naprawa amfiteatru. <http://plock.wyborcza.pl/plock/1,35681,3990745.html> (15-03-2007).

MATERIAŁY NIEPUBLIKOWANE

230. Alu-Tent: Projekt zadania membranowego dla krytej trybuny na stadionie przy ul. Mickiewicza w Chojnicach, 2011.
231. Archi-CAD: Projekt wykonawczy. Opera Leśna – Sopot. 2008.
232. archistudio studniarek + pilinkiewicz: Rewitalizacja Zespołu Pałacowego w Łańcucie – Storczykarnia, 2007.
233. Architektoniczne Biuro CoLoR Inwestprojekt: Projekt architektoniczno-budowlany zadania amfiteatru w parku im. Stanisława Kopczyńskiego w Wiśle. 2007.
234. Art Projekt K&M: Projekt budowlany. Przebudowa amfiteatru wraz zapleczem socjalny, infrastrukturą techniczną i zagospodarowaniem terenu. 2010.
235. Atelier Architektury Paweł Potok: Projekt budowlany. Rewitalizacja Centrum Kultury i Sztuki Filmowej w Łagowie, 2009.

236. Biuro 87a: Projekt budowlany przebudowy i rozbudowy Amfiteatru Tysiąclecia z przyłączami. 2008.
237. Biuro Projektów Inżynierskich: Dokumentacja projektowa. Kompleks zabudowy przy kolejce Alpine Coaster. 2010.
238. Błochowiak U., Borowicz A.: Projekt budowlany – plan zagospodarowania terenu. 2010.
239. CDF Architekci: Hotel Holiday Inn w Bydgoszczy, 2008.
240. Ceno Tec GmbH: Double highpoint, Silesia City Centre, 2005.
241. Centralne Laboratorium Przemysłu Filcowego i Tkanin Technicznych w Łodzi. Opracowanie technologii produkcji i WT na tkaninę, taśmę i nici z przędzy poliestrowej przeznaczonych na powłokę dachową Opery Leśnej w Sopocie. 1967.
242. CKK Architekci: Projekt budowlano-wykonawczy. Muszla koncertowa w Rowach. 2008.
243. FIUK – Firma Inżynieryjno-Architektoniczna: Teatr Letni Program funkcjonalno-użytkowy Szczecin Park Kasprowicza. 2012.
244. Gałkowski i Partnerzy: Projekt budowlany. Przebudowa Amfiteatru i Parku Zdrojowego w Ustroniu. 2006.
245. Grupa 5: Projekt wykonawczy. Odtworzenie Zabytkowego Historycznego Kompleksu Dworca Wrocław Główny z przebudową kolejowej infrastruktury technicznej. 2010.
246. IMB ASYMETRIA: Przebudowa i rozbudowa amfiteatru Kadzielnia wraz z niezbędnymi urządzeniami techniczno – budowlanymi. 2005.
247. md Polska: Projekt wykonawczy. Przebudowa i rozbudowa Stadionu Miejskiego Ośrodka Sportu i Rekreacji w Puławach. 2008.
248. mellon architekci s.c.: Budowa regionalnego centrum kultury w Kołobrzegu wraz z zagospodarowaniem terenu - przebudowa i rozbudowa kina „Kalmar”. 2009.
249. Modern Construction Systems, Projekt wykonawczy. Umocnienie Skarpy Wiślanej na odcinku od Hotelu Starzyński do Katedry wraz z budową Amfiteatru w Płocku. 2003.
250. Modern Construction Systems: Projekt budowlano-wykonawczy. Modernizacja Stadionu Miejskiego przy ul. Olimpijskiej w Bytomiu. 2009.
251. Modern Construction Systems: Projekt budowlany. Przystań wodna na rzece Wiśle we Włocławku. 2010.
252. Modern Construction Systems: Projekt wykonawczy Stadionu Miejskiego w Poznaniu w zakresie I i III trybuny wraz z łącznikami, zadaszeniem i infrastrukturą towarzyszącą oraz adaptacja II i IV trybuny.
253. Mott MacDonald: Modernizacja pętli autobusowej z budową pawilonu do odpraw podróżnych przy Dworcu Wschodnim od strony ul. Lubelskiej. 2011.
254. Pracownia Architektoniczna Joanna Kołodziej: Projekt architektoniczno-budowlany. Projekt amfiteatru na terenie Orawskiego Parku Etnograficznego w Zubrzycy Górnej, 2008.
255. Pracownia Architektoniczna Kleczkowski-Architekt: Stacja Paliw „Pod Żaglami” w Gdyni ul. Sportowa 8. 2003.
256. Pracownia dw Firma Usługowo-Projektowa Wanda Łaguna: Projekt budowlano-wykonawczy. Projekt Nadraduńskiego Centrum Sportowo-Rekreacyjnego, 2011.
257. Pracownia Inżynierska Projekt s.c.: Projekt architektoniczno-budowlany zadaszenia amfiteatru w parku im. Stanisława Kopczyńskiego w Wiśle, 2009.
258. Pracownia Inżynierska Projekt s.c.: Projekt architektoniczno-budowlany. Projekt zamienny zadaszenia sceny amfiteatru. Rozbudowa i modernizacja amfiteatru w Brennej Centrum, 2011.
259. Pracownia Projektowa Projekt Plus: Projekt architektoniczno-budowlany. Projekt budowy stałej sceny plenerowej na placu Jana Pawła II, 2009.
260. Pracownia Usług Projektowych Mariusz Kłosowski: Projekt zawierający istotne zmiany – amfiteatr – rozbudowa infrastruktury Gminnego Ośrodka Kultury w miejscowości Śliwice, 2011.
261. Przedsiębiorstwo Inżynierskie Biprohut: Motodrom w Częstochowie, Konstrukcja stalowa. 2007.
262. PS: Dokumentacja powykonawcza. Struktura nośna zadaszenia powłokowego amfiteatru w parku im. J. Sowińskiego. Legionowo 2002.

263. Skyspan: Membrane structure, Centrum Banku Śląskiego, 2001.
264. Studio Architekt Juliusz Marcinowski, TiM Rynek – Architekci: Amfiteatr, projekt zadaszania, Park Górczewska w Warszawie. 2005.
265. Studio Autorskie PUCH: Projekt budowlany. Park Glinianki – Centrum pobytowe „Euro 2012” budowa dwóch boisk do piłki nożnej z trybunami, 2009.
266. Studio Projektowe Anny Kasprzyk SPAK: Projekt wykonawczy. Stadion piłkarski w Gdyni przy ul. Olimpijskiej 5, 2009.
267. Studio Projektowe Anny Kasprzyk SPAK: Przebudowa stadionu miejskiego przy ul. Olsztyńskiej w Częstochowie, 2005.
268. Studio Wnętrz Forma: Projekt budowlany. Zagospodarowanie terenu Park Wodny Sopot, 2006.
269. Wiewióra & Golczyk Architekci: Projekt zadaszanej sceny wraz z infrastrukturą w Węgierskiej Górze. 2011.
270. Wiewióra & Golczyk Architekci: Rozbudowa i remont sceny głównej, widowni wraz z zapleczem socjalno-technicznym amfiteatru pod Grojcem. 2011.
271. Zakład Konfekcji Technicznej Polnam: Przekrycie teatru plenerowego „Opera Leśna” w Sopocie. Częstochowa 1989.
272. Żółtowski K.: Projekt monitoringu konstrukcji zadaszania Amfiteatru w Płocku. 2008.

AKTY PRAWNE

273. Prawo budowlane (Dz.U. Nr 89, poz. 414)
274. Prawo budowlane (Dz.U. z 2013 r., poz. 1409, z późn. zm.)
275. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. z 2002 r. Nr 75, poz. 690, z późn. zm. (zwłaszcza Dz.U. z 2009 r. Nr 56, poz. 461).
276. PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3 Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem.
277. PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4 Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.

SPIS ILUSTRACJI/FIGURE INDEX

Fotografie autorskie w publikacji zostały przedstawione, jako barwne. Pozostałe mają określone źródło pochodzenia. Większość rysunków jest autorską kompilacją materiałów publikowanych lub udostępnionych przez projektantów.

1. Schemat powierzchni antyklastycznej/Anticlastic surface scheme [autor].
2. Skrzydła ważki/Dragonfly wings [autor].
3. Błona mydlana na ramce z drutu/Soap film on a wire frame
[Berger H.: Light structures - structures of light. The art and engineering of tensile architecture illustrated by the work of Horst Berger. Birkhäuser Verlag, Basel 1996].
4. Błona mydlana na nitkach/Soap film on threads.
[Gass S.: Experimente, physikalische Analogmodelle im architektonischen Entwerfen, II 25. Institut für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1990].
5. Fizyczny model membrany – praca studencka/ Physical model of the membrane – student work [autor].
6. Model sieci linowej Stadionu Olimpijskiego w Monachium/ Cable network model of the Olympic Stadium in Munich [Gründig L., Moncrieff E., Singer P., Ströbel D., A history of the principal developments and applications of the force density method in Germany 1970-1999, Fourth International Colloquium on Computation of Shell & Spatial Structures, Chania-Crete, Greece, 5-7 June 2000, p. 2.].
7. Przykład badań modelowych/Example of model tests
[<https://materialpraxis.wordpress.com/2010/09/30/fabric-tensile-study/#respond>].
8. Siły wewnętrzne w membranie/ Internal forces in the membrane [autor].
9. Promień, cięciwa i strzałka łuku/ Radius, chord and rise of arc [autor].
10. Wpływ kształtu pojedynczego cięgna na wielkości sił wewnętrznych/
Influence of the single cable shape on the size of the internal forces [autor].
11. Modelowania membrany – etap definiowania elementów brzegowych/Membrane modeling – the stage of defining boundary elements [autor, za pomocą programu SketchUp z aplikacją Bubble Soap and Skin].
12. Modelowanie membrany – etap definiowania sieci węzłów/Membrane modelling - the stage of defining the node network [autor].
13. Modelowanie membrany – etap poszukiwania położenia węzłów/Membrane modelling - the stage of searching for nodes location (formfinding) [autor].
14. Namiot cyrkowy/Circus tent [autor].
15. Hala wystawowa Władimira Szuchowa/Exhibition hall of Vladimir Shukhov
[https://en.wikipedia.org/wiki/Tensile_structure].
16. Hala w Raleigh Nowickiego/Nowicki's hall in Raleigh
[<http://news.lib.ncsu.edu/changinglandscape/files/2010/07/dorton.png>].
17. Zadaszenie dla orkiestry w Kassel/Music Pavilion in Kassel
[Gleaser L.: The work of Frei Otto and his teams 1955-1976, IL 17. Institute of Lightweight Structures, Stuttgart 1978].
18. Zadaszenie estrady do tańca w Kolonii/Dance Pavilion Canopy in Cologne
[Gleaser L.: The work of Frei Otto and his teams 1955-1976, IL 17. Institute of Lightweight Structures, Stuttgart 1978].
19. Pawilon Polski na Międzynarodowych Targach w Izmirze/Polish Pavilion at the International Fair in Izmir [Oskar Hansen. Architektura i Biznes 10/2003].

20. Pawilon niemiecki w Montrealu/The German Pavilion in Montreal
[http://blog.modernica.net/wp-content/uploads/2016/02/german_pav_nae000990839.jpg].
21. Zadaszenie stadionu olimpijskiego w Monachium/Olympic stadium canopy in Munich
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f0/Olympiastadion_Muenchen.jpg].
22. Pawilon Stanów Zjednoczonych w Osace/The United States Pavilion in Osaka
[<http://ndagallery.cooperhewitt.org/gallery/16168769/Expo70-Osaka>].
23. Uczelniane centrum sportowe w La Verne/Campus sport center in La Verne
[<https://structurae.net/photos/52743-university-of-la-verne-campus-center>].
24. Pawilon Stanów Zjednoczonych w Spokane/The United States Pavilion in Spokane
[<http://spokanehistorical.org/items/show/303>].
25. Hajj Terminal w Dżuddzie (Arabia Saudyjska)/Hajj Terminal in Jeddah (Saudi Arabia)
[<http://www.publics.bg/en/news/296/>].
26. Stadion w Rijadzie/Riad stadium
[<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=299268&page=4>].
27. Port lotniczy w Denver/Denver International Airport
[<http://cheops4.org.pl/phpBB3/viewtopic.php?t=1113&start=175>].
28. Stadion Georgia w Atlancie/Georgia Dome in Atlanta
[<http://www.birdair.com/projects/georgia-dome>].
29. Arena O₂ w Londynie/O₂ Arena in London
[https://en.wikipedia.org/wiki/Millennium_Dome#/media/File:Millennium_Dome_1.jpg].
30. Hala Tropical Islands w Krausnick/Tropical Islands hall in Krausnick
[https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_Islands_Resort#/media/File:Tropical_Islands_Luftbild_2008.png].
31. Koncepcja zadaszenia Stadionu Śląskiego w Chorzowie/The concept of the Silesian Stadium canopy in Chorzów [http://www.slask.sport.pl/sport-slask/1,128704,14047454,Stadion_Slaski_juz_dawno_mogl_miec_dach__Stracilismy.html].
32. Koncepcja kompleksu sportowego w Konstantynie w Algierii/The concept of a sports complex in Constantine, Algeria [http://www.gloswielkopolski.pl/artykul/777447,stadion-miejski-w-poznaniu-bedzie-mial-brata-w-algierii-zobacz-podobienstwa,id,t.html].
33. Projekt Eden w Kornwalii/Eden Project in Cornwall [http://www.edenproject.com/].
34. Alianz Arena w Monachium/Allianz Arena in Munich
[https://pl.wikipedia.org/wiki/Allianz_Arena].
35. Wodny Sześciąt w Pekinie/Water Cube in Beijing
[http://www.china.org.cn/olympics/news/2008-08/08/content_16163797.htm].
36. Centrum Vistalegre w Madrycie/Vistalegre Arena in Madrid
[<http://www.sbp.de/en/project/roof-bullfight-arena-vista-alegre/>].
37. Centrum Khan Shatyr w Astanie/Khan Shatyr Center in Astana
[<http://www.qcosas.com/obras-arquitectura-noche/>].
38. Pawilon Pragnienia w Saragossie/Thirst pavilion in Saragossa
[<http://www.arenasing.com/en/projects/singular-buildings/thirst-pavilion>].
39. Zadaszenie przystanku tramwajowego w Łodzi/A canopy of tram stop in Łódź [autor].
40. Pawilon wystawowy w Esslingen/Exhibition Pavilion in Esslingen
[<http://www.textilearchitecture.polimi.it/database/airtecture-exhibition-hall/>].
41. Pawilon Planeta M w Hanowerze/Planet M pavilion in Hannover [autor].
42. Osłona elewacji stadionu we Wrocławiu/A facade cover of the stadium in Wrocław
[http://www.sztuka-architektury.pl/index.php?ID_PAGE=34680].
43. Centrum Pompidou w Metz/Pompidou Centre in Metz
[https://en.wikipedia.org/wiki/Centre_Pompidou-Metz].
44. Ściana osłonowa hali do koszykówki w Londynie/A curtain wall of Basketball Arena in London
[<http://www.archdaily.com/255557/london-2012-basketball-arena-wilkinson-eyre-architects>].

45. Pawilon Galerii Serpentine w Londynie/Serpentine Gallery pavilion in London [<http://thespaces.com/2016/08/31/zaha-hadids-2007-serpentine-pavilion-sale/>].
46. Centrum przesiadkowe Rosa Parks w Detroit/Rosa Parks Transit Center in Detroit [<http://www.fabritecstructures.com/portfolio-rosa-parks-transit-center-detroit-mi>].
47. Instalacja Marsyas w galerii Tate Modern w Londynie/Marsyas sculpture in the Tate Modern Gallery in London [<http://www.tate.org.uk/whats-on/tate-modern/exhibition/unilever-series-anish-kapoor-marsyas>].
48. Pawilon wystawowy Grande Bigo w Genui/An exhibition pavilion Grande Bigo in Genoa [[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Il_Bigo_in_Genoa_\(8870747791\).jpg?uselang=pl](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Il_Bigo_in_Genoa_(8870747791).jpg?uselang=pl)].
49. Pawilon Nowego Czasu w Paryżu/The New Times pavilion in Paris [http://www.fondationlecorbusier.fr/corbuweb/morpheus.aspx?sysId=13&IrisObjectId=5070&sysLanguage=fr-fr&itemPos=45&itemSort=fr-fr_sort_string1%20&itemCount=78&sysParentName=&sysParentId=64].
50. Pawilon muzyczny Metropolitan Opera w Nowym Jorku/A Music pavilion of Metropolitan Opera in New York [<http://www.detail-online.com/inspiration/music-pavilion-in-new-york-109527.html>].
51. Scena „Lato Zet i Dwójki” 2012 w Łodzi/Stage " Lato Zet i Dwójki " 2012 in Łódź [autor].
52. Parasole w Medynie/Umbrellas in Medina [<https://www.sefar.com/data/docs/en/7238/AS-PDF-Architecture-Exterior-Medina-sunshades-EN.pdf?v=1.3>].
53. Zadaszenie dziedzińca fortu w Kufstein/Canopy of the fort courtyard in Kufstein [<http://www.kugel-architekten.com/content.php?p=1&n=1&d=1&lan=en>].
54. Zadaszenie Pawilonu Wenezuelskiego w Hanowerze/Zadaszenie Pawilonu Wenezuelskiego w Hanowerze [https://en.wikipedia.org/wiki/Expo_2000#/media/File:Expo2000_venezuela1.jpg].
55. Narodowa Biblioteka Króla Fahda w Riadzie/King Fahd National Library in Riyadh [<http://www.arch2o.com/wp-content/uploads/2014/05/Arch2o-King-Fahd-National-Library-Riyadh-Gerber-Architekten-10.jpg>].
56. Zadaszenie tarasu w Londynie/Terrace canopy in London [<http://www.achimmenges.net/?p=4445>].
57. Pawilon Burnhama w Chicago/Burnham Pavilion in Chicago [http://burnhamplan100.lib.uchicago.edu/node/2340/?size=_original].
58. Tymczasowy pawilon w Nodzie/Temporary pavilion in Noda [170].
59. Przykłady form uzyskane z sieci linowych i membran według Freia Otto/Frei Otto - variants of the network of rope and membranes [<http://rndrd.com/i/1364>].
60. Typowe formy przedstawione przez Heino Engela/Typical forms proposed by Heino Engel [Engel H.: Structure Systems, Hatje Cantz, Germany 1997].
61. Schematyczny kształt brytów/Schematic shape of patterns [autor].
62. Podpora wewnętrzna/Internal support [21].
63. Podwieszane punkty/Suspended points [21].
64. Wiszący słup/Hanging pole [21].
65. Podpora łukowa/Arc support [21].
66. Podział sposobów zamocowania membrany/The supports types used in membrane structures [autor].
67. Brzeg membrany wzmocniony taśmą keder/Membrane edge reinforced with keder [autor].
68. Panel membrany przygotowany do zamocowania na stadionie w Lublinie/Membranes panel prepared for attachment on the stadium in Lublin [autor].
69. Montaż membrany w amfiteatrze w Żywcu/Membrane installation at the amphitheatre in Żywiec [autor].
70. Włókna tkaniny bazowej/Base fabric fibres [autor].
71. Kierunki sił rozciągających w tkaninie/Tensile forces directions in the fabric [autor].
72. Struktura wielowarstwowej membrany/Membrane multilayer structure [autor].

73. Siatka elewacyjna stadionu we Wrocławiu/Facade net of the stadium in Wrocław [<http://www.gazetawroclawska.pl/artykul/378303,fachowcy-nas-zapewniaja-nic-nie-pobrudzi-stadionu,id,t.html>].
74. Stalowa siatka elewacyjna Pawilonu M w Hanowerze/Facade grid of the M Pavilion in Hannover [autor].
75. Plan mobilnego pawilonu Chanel/Plan of Chanel mobile pavilion [56].
76. Lokalizacja wybranych obiektów z zadaszeniami membranowymi w Polsce/The location of selected objects with membrane canopy in Poland [autor].
77. Plan nieistniejącego zadaszenia Opery Leśnej w Sopocie/Plan of non-existing Forest Opera canopy in Sopot [59, 162, 241].
78. Widok nieistniejącego zadaszenia Opery Leśnej w Sopocie/View of non-existing Forest Opera canopy in Sopot [autor].
79. Plan zadaszenia Teatru Letniego w Szczecinie/Plan of Summer Theatre canopy in Szczecin [243].
80. Widok zadaszenia Teatru Letniego w Szczecinie/View of Summer Theatre canopy in Szczecin [autor].
81. Przekrój przez zadaszenie Teatru Letniego w Szczecinie/The section of the roof Summer Theatre Szczecin [243].
82. Plan amfiteatru w parku Sowińskiego w Warszawie/Plan of amphitheatre in the park Sowińskiego in Warsaw [180, 219, 185].
83. Widok zadaszenia amfiteatru w parku Sowińskiego w Warszawie/View of amphitheatre canopy in a park in Warsaw Sowińskiego [autor].
84. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w parku Sowińskiego w Warszawie/The section of the roof amphitheatre in the park Sowińskiego in Warsaw [180, 262].
85. Plan zadaszenia amfiteatru w Ustroniu/Plan of amphitheatre canopy in Ustroń [244, 219, 185].
86. Widok zadaszenia amfiteatru w Ustroniu/View of amphitheatre canopy in Ustroń [autor].
87. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w Ustroniu/The section of the roof amphitheatre canopy in Ustroń [244].
88. Plan zadaszenia amfiteatru w Płocku/Plan the amphitheatre canopy in Plock [249, 219, 185].
89. Widok zadaszenia amfiteatru w Płocku/View of the amphitheatre roof in Plock [autor].
90. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w Płocku/The section of the roof amphitheatre in Plock [249].
91. Plan zadaszenia amfiteatru Bemowo w Warszawie/Plan of Bemowo amphitheatre canopy in Warsaw [264, 219, 185].
92. Widok zadaszenia amfiteatru Bemowo w Warszawie/View of Bemowo amphitheatre canopy in Warsaw [autor].
93. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru Bemowo w Warszawie/The section of the amphitheatre canopy Bemowo in Warsaw [264].
94. Pan zadaszenia nad muszlą koncertową w Rowach/Mr. roof over the band shell in Rowy [242, 219, 185].
95. Widok zadaszenia nad muszlą koncertową w Rowach/View of the roof of the concert bowl in Rowy [autor].
96. Przekrój przez zadaszenie nad muszlą koncertową w Rowach/The section of the roof above the band shell in Rowy [242].
97. Plan zadaszenia sceny w Elku/Plan of stage canopy in Elk [259, 219, 185].
98. Widok sceny plenerowej w Elku/View of the outdoor stage in Elk [autor].
99. Przekrój sceny plenerowej w Elku/Cross-section of the outdoor stage in Elk [259].
100. Plan zadaszenia amfiteatru w Wiśle/Plan of amphitheatre canopy in Wisla [233, 219, 185].
101. Widok zadaszenia amfiteatru w Wiśle/View canopy amphitheatre in Wisla [autor].

102. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w Wiśle/The section of the roof amphitheatre in Wisla [233].
103. Zadaszenie amfiteatru na Kadzielni w Kielcach/The Kadzielnia amphitheatre canopy in Kielce [246, 66, 219, 185].
104. Widok zadaszenia amfiteatru na Kadzielni w Kielcach/View canopy amphitheatre Kadzielnia in Kielce [autor].
105. Przekrój przez zadaszenie nad sceną amfiteatru w Kielcach/The section of the roof above the stage amphitheatre in Kielce [246, 66].
106. Przekrój przez zadaszenie nad widownią amfiteatru w Kielcach/The section of the roof over the audience amphitheatre in Kielce [246, 66].
107. Mechanizmy napędowe ruchomego dachu amfiteatru w Kielcach/ Driving mechanisms movable roof of the amphitheatre in Kielce [autor].
108. Plan zadaszenia sceny letniej w Kołobrzegu/Plan of summer stage canopy in Kołobrzeg [248, 156].
109. Widok zadaszenia sceny letniej w Kołobrzegu/View of summer stage canopy in Kołobrzeg [autor].
110. Przekrój przez zadaszenie sceny letniej w Kołobrzegu/The section of the summer stage canopy in Kołobrzeg [248].
111. Plan zadaszenia sceny w Łagowie/Plan of stage canopy in Łagów [235].
112. Widok sceny amfiteatru w Łagowie/View of the amphitheatre stage in Lagow [autor].
113. Przekrój przez scenę amfiteatru w Łagowie/Cross-section through the stage amphitheatre in Lagow [235].
114. Plan amfiteatru w Opolu/Plan amphitheatre in Opole [236, 219, 185].
115. Widok zadaszenia w amfiteatrze w Opolu/View of the roof of the amphitheatre in Opole [autor].
116. Przekrój przez zadaszenia w amfiteatrze w Opolu/The section of the roof at the amphitheatre in Opole [236].
117. Plan zadaszenia sceny w Brennej/Plan of stage canopy in Brenna [257, 219, 185].
118. Widok zadaszenia sceny w Brennej/View of stage canopy in Brenna [autor].
119. Przekrój przez zadaszenie sceny w Brennej/The section of stage canopy in Brenna [257].
120. Plan zadaszenia sceny w Węgierskiej Górcie/Plan of stage canopy in Węgierska Górka [269, 219, 185].
121. Widok zadaszenia sceny w Węgierskiej Górcie/View of stage canopy in Węgierska Górka
122. Przekrój przez zadaszenie sceny w Węgierskiej Górcie/The section of stage canopy in Węgierska Górka [269].
123. Plan zadaszenia Opery Leśnej w Sopocie/Plan canopy Forest Opera in Sopot [231, 59, 219, 185].
124. Widok zadaszenia Opery Leśnej w Sopocie/View of the roof of the Forest Opera in Sopot [autor].
125. Przekrój poprzeczny przez zadaszenie Opery Leśnej w Sopocie/The cross section of the roof of the Forest Opera in Sopot [231].
126. Przekrój podłużny przez zadaszenie Opery Leśnej w Sopocie/Longitudinal section through the roof of the Forest Opera in Sopot [231].
127. Plan amfiteatru w Mrągowie/Amphitheatre plan in Mrągowo [234, 219, 185].
128. Widok zadaszenia sceny amfiteatru w Mrągowie/View of stage canopy amphitheatre in Mrągowo [autor].
129. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w Mrągowie/The section of the roof amphitheatre in Mrągowo [234, Kontent].
130. Plan zadaszenia widowni w Śliwicach/Canopy plan of the auditorium canopy in Śliwice [260, 185].
131. Widok zadaszenia amfiteatru w Śliwicach/ View of the audience canopy in Śliwice [autor].
132. Przekrój przez zadaszenie amfiteatru w Śliwicach/The section of the audience canopy in Śliwice [260].

133. Plan zadaszenia nad sceną w Zubrzycy Górnej/Canopu plan of the stage in Zubrzyca Górna [254].
134. Widok zadaszenia nad sceną w Zubrzycy Górnej/View of the roof above the stage in Zubrzyca Górna [autor].
135. Przekrój przez zadaszenie nad sceną w Zubrzycy Górnej/The section of the roof above the stage in Zubrzyca Górna [254, Alu-Tent].
136. Plan zadaszenia nad sceną w Stężycy/Plan of the roof above the stage in Stężyca [256].
137. Widok zadaszenia nad sceną w Stężycy/View of the roof above the stage in Stężyca [autor].
138. Przekrój przez zadaszenie nad sceną w Stężycy/The section of the roof above the stage in Stężyca [256].
139. Plan zadaszenia stadionu w Poznaniu/Plan of the roof of the stadium in Poznan [252, 219, 185].
140. Fragment zadaszenia stadionu w Poznaniu/Fragment of the roof of the stadium in Poznan [252].
141. Zadaszenie trybuny IV w Poznaniu - wrzesień 2006/The canopy of the fourth stands in Poznań - September 2006 [autor].
142. Przekrój przez IV trybunę stadionu w Poznaniu/The section of the fourth Stadium grandstand in Poznan [252].
143. Stadion w Poznaniu/Stadium in Poznań [autor].
144. Przekrój przez III trybunę stadionu w Poznaniu/Cross-section through III grandstand of the stadium in Poznań [252].
145. Plan zadaszenia trybuny na stadionie w Częstochowie/Plan of the roof of the stadium in Czestochowa [261, 219, 185].
146. Widok zadaszenia trybuny na stadionie w Częstochowie/View of the roof of the stadium in Czestochowa [autor].
147. Przekrój przez zadaszenie trybuny na stadionie w Częstochowie/The section of the roof stands at the stadium in Czestochowa [261].
148. Plan zadaszenia trybuny na stadionie w Bytomiu/Plan of the roof of the stadium in Bytom [250, 219, 185].
149. Widok zadaszenia trybuny na stadionie w Bytomiu/View of the roof of the stadium in Bytom [autor].
150. Przekrój przez zadaszenie trybuny na stadionie w Bytomiu/The section of the roof stands at the stadium in Bytom [250].
151. Plan zadaszenia trybuny na stadionie w Sulejówku/Plan of the roof of the stadium in Sulejówek [265, 185].
152. Widok zadaszenia trybuny na stadionie w Sulejówku/View of the roof of the stadium in Sulejówek [autor].
153. Przekrój przez trybunę stadionu w Sulejówku/The section of the grandstand of the stadium in Sulejówek [265].
154. Plan fragmentu zadaszenia stadionu w Gdyni/Plan portion of the roof of the stadium in Gdynia [266, 185].
155. Plan stadionu w Gdyni/The plan of the stadium in Gdynia [266, 185].
156. Widok zadaszenia stadionu w Gdyni/View of the roof of the stadium in Gdynia [autor].
157. Przekrój przez zadaszenie stadionu w Gdyni/The section of the roof of the stadium in Gdynia [266].
158. Plan stadionu miejskiego w Warszawie/Plan of the city stadium in Warsaw [132].
159. Fragment dachu stadionu miejskiego w Warszawie/Detail of the roof of the municipal stadium in Warsaw [132, 185].
160. Zewnętrzny widok stadionu miejskiego w Warszawie/An exterior view of the city stadium in Warsaw [autor].

161. Przekrój przez trybunę z zadaszeniem stadionu miejskiego w Warszawie/The section of the grandstand roof of the municipal stadium in Warsaw [132].
162. Plan stadionu w Puławach/The plan of the stadium in Pulawy [247].
163. Plan zadaszeń na stadionie w Puławach/Plan of canopy the stadium in Pulawy [247].
164. Widok zadaszeń na stadionie w Puławach/View of canopy the stadium in Pulawy [autor].
165. Przekrój zadaszeń trybun na stadionie w Puławach/Cross-section of canopy of the stands at the stadium in Pulawy [247].
166. Fragment dachu stałego na Stadionie Narodowym w Warszawie/Detail of the roof fixed at the National Stadium in Warsaw [50, 38, 39, 53].
167. Plan Stadionu Narodowego w Warszawie/Plan of the National Stadium in Warsaw [50, 38, 39, 53].
168. Widok Stadionu Narodowego w Warszawie/The view of the National Stadium in Warsaw [autor].
169. Przekrój przez zadaszenie stałe Stadionu Narodowego w Warszawie/The section of the fixed roof of the National Stadium in Warsaw [50].
170. Widok fragmentu dachu stałego na Stadionie Narodowym w Warszawie/The view portion of the roof fixed at the National Stadium in Warsaw [autor].
171. Fragment dachu ruchomego na Stadionie Narodowym w Warszawie/Detail of the roof moving at the National Stadium in Warsaw [50, 38, 39, 53].
172. Przekrój przez zadaszenie ruchome Stadionu Narodowego w Warszawie/The section of the movable roof of the National Stadium in Warsaw [161, 50].
173. Różnica przepuszczalności światła/The difference in light transmission [autor].
174. Plan zadaszenia trybuny na stadionie w Chojnicach/Plan of the roof of the stadium in Chojnice [230].
175. Widok zadaszenia trybuny na stadionie w Chojnicach/View of the roof of the stadium in Chojnice [autor].
176. Przekrój przez zadaszenie trybuny na stadionie w Chojnicach/Section of the roof of the stadium in Chojnice [230].
177. Plan zadaszenia pomiędzy budynkami Banku Śląskiego w Katowicach/Plan roof between the buildings of the Bank Śląski in Katowice [263, 220].
178. Widok zadaszenia pomiędzy budynkami Banku Śląskiego w Katowicach/View of the roof between the buildings of the Bank Śląski in Katowice [autor].
179. Przekrój przez zadaszenie między budynkami Banku Śląskiego w Katowicach/The section of the roof between the buildings of the Śląski Bank in Katowice [263].
180. Plan zadaszenia na stacji paliw przy ulicy Sportowej w Gdyni/Plan shelters filling stations Street Sports in Gdynia [255, 226].
181. Widok zadaszenia na stacji paliw przy ulicy Sportowej w Gdyni/View of the roof at petrol stations Street Sports in Gdynia [autor].
182. Przekrój zadaszenia na stacji paliw przy ulicy Sportowej w Gdyni/Cross-section of the roof at petrol stations Street Sports in Gdynia [255].
183. Plan zadaszenia przed centrum handlowym w Katowicach/Plan shelters before the mall in Katowice [240, 220].
184. Widok zadaszenia przed centrum handlowym w Katowicach/View of the roof before the mall in Katowice [autor].
185. Przekrój przez zadaszenie przed centrum handlowym w Katowicach/The section of the roof in front of a shopping mall in Katowice [240].
186. Plan zadaszenia klubu w Sopocie/Plan canopy club in Sopot [268].
187. Widok zadaszenia tarasu klubu w Sopocie/View of the roof terrace of the club in Sopot [autor].
188. Przekrój przez zadaszenie klubu w Sopocie/The section of the roof of the club in Sopot [268].

189. Widok zadaszenia przy wejściu klubu w Sopocie/View of the roof at the entrance of the club in Sopot [autor].
190. Przekrój przez zadaszenie wejściowe klubu w Sopocie The section of the roof entrance of the club in Sopot [268].
191. Plan zadaszenia w storczykarni przy zamku w Łańcucie/Plan canopy in Orchid House at the castle in Łańcut [232, 91]
192. Widok zadaszenia w storczykarni przy zamku w Łańcucie/View of canopy in Orchid House at the castle in Łańcut [autor].
193. Przekrój przez zadaszenie w storczykarni przy zamku w Łańcucie/The section of the roof in the Orchid House at the castle in Łańcut [232].
194. Plan części bulwaru w Gdyni z zadaszeniami membranowymi/Plan part of the boulevard in Gdynia membrane roofs [155, 226].
195. Widok parasoli na bulwarze w Gdyni/View of umbrellas on the boulevard in Gdynia [autor].
196. Świejące parasole na bulwarze w Gdyni/Shining umbrellas on the boulevard in Gdynia [autor].
197. Przekrój przez zadaszenia na bulwarze w Gdyni/The section of the roof on the boulevard in Gdynia [157, 225].
198. Plan zadaszenia na tarasie hotelu w Bydgoszczy Plan on the roof terrace of the hotel in Bydgoszcz [239].
199. Widok zadaszenia na tarasie hotelu w Bydgoszczy/View of the roof on the terrace of the hotel in Bydgoszcz [autor].
200. Przekrój przez zadaszenie w Bydgoszczy/The section of the roof in Bydgoszcz [239, Alu-Tent].
201. Plan zadaszeń w centrum sportowo-rekreacyjnym w Poznaniu/Plan of roofs in the center of sports and recreation center in Poznań [238].
202. Widok zadaszeń w centrum Malta-Ski w Poznaniu/View of roofs in the center of Malta-Ski in Poznan [autor].
203. Przekrój przez zadaszenia w centrum Malta-Ski w Poznaniu/The section of the roof in the center of Malta-Ski in Poznan [238, Alu-Tent].
204. Plan zadaszenia pętli autobusowej w Warszawie/Plan loop bus shelters in Warsaw [253, 64].
205. Widok zadaszenia pętli autobusowej w Warszawie/View canopy bus station in Warsaw [autor].
206. Przekrój przez zadaszenie pętli autobusowej w Warszawie/The section of the roof bus station in Warsaw [253, 64].
207. Plan zadaszenia membranowego nad peronami dworca we Wrocławiu/Plan membrane canopy over the platforms station in Wrocław [245, 63].
208. Widok zadaszenia membranowego nad peronami dworca we Wrocławiu/View of membrane canopy over the platforms station in Wrocław [autor].
209. Przekrój zadaszenia membranowego nad peronami dworca we Wrocławiu/The cross-section of membrane canopy over the platforms station Wrocław [245, 63].
210. Plan zadaszenia na przystani we Włocławku/Plan canopies at the marina in Włocławek [251].
211. Widok zadaszenia na przystani we Włocławku/View of the roof at the marina in Włocławek [autor].
212. Przekrój przez zadaszenie na przystani we Włocławku/The section of the roof at the marina in Włocławek [251].
213. Orientacja widowni w analizowanych amfiteatrach/Orientacja widowni w analizowanych amfiteatrach [autor].
214. Orientacja zadaszonej widowni w analizowanych stadionach/Orientation of the roofed tribune in the analyzed stadiums [autor].
215. Połączenie brytów w miejscu wzmocnienia powłoki/The combination of ply in place to strengthen in Sopot [autor].
216. Zamocowanie membrany do łuku w Katowicach/Securing the membrane to the arc in Katowice [autor].

217. Zamocowanie membrany do łuku w Ustroniu/Securing the membrane to the arc in Ustroń [autor].
218. Zamocowanie membrany do łuku w Węgierskiej Górcie/Securing the membrane to bow in Węgierska Górcza [autor].
219. Zamocowanie membrany do górnego pierścienia w Brennej/Fixing the diaphragm to the ring in Brenna [autor].
220. Górny pierścień w Węgierskiej Górcie/The upper ring in Węgierska Górcza [autor].
221. Widok od dołu podparcia pierścienia w Węgierskiej Górcie/View from the bottom of the support ring in Węgierska Górcza [autor].
222. Zamocowanie membrany w zadaszeniu Stadionu Narodowego w Warszawie/Fixing the membrane canopy National Stadium in Warsaw [autor].
223. Zamocowanie membrany w zadaszeniu amfiteatru w Łagowie/Fixing the membrane canopy amphitheatre in Lagow [autor].
224. Zamocowanie membrany w Chojnicach/Securing the membrane in Chojnice [autor].
225. Zamocowanie membrany na stadionie w Gdyni/Securing the membrane at the stadium in Gdynia [autor].
226. Zamocowanie membrany na stadionie miejskim w Warszawie/Fixing membranes on the city stadium in Warsaw [autor].
227. Zamocowanie membrany w zadaszeniu pętli autobusowej w Warszawie/Fixing the membrane canopy bus station in Warsaw [autor].
228. Zamocowanie membrany do łuku w Sopocie/Securing the membrane to the arc in Sopot [autor].
229. Zamocowanie membrany do łuku w Sopocie, widok od dołu/Fixing membrane arc in Sopot, view from below [autor].
230. Zamocowanie membrany w amfiteatrze w Sopocie/Securing the membrane in the amphitheatre in Sopot [autor].
231. Zamocowanie membrany do żelbetowego słupa na stadionie w Poznaniu/Fixing membrane reinforced concrete pole at the stadium in Poznan [autor].
232. Zamocowanie membrany w zadaszeniu w Poznaniu/Fixing the membrane canopy in Poznan [autor].
233. Zamocowanie membrany amfiteatru w Łagowie/Fixing membrane amphitheatre in Lagow [autor].
234. Zamocowanie membrany do zewnętrznego pierścienia amfiteatru w Płocku/Securing the membrane to the outer ring amphitheatre in Plock [autor].
235. Zamocowanie membrany w zadaszeniu amfiteatru w Płocku/Fixing the membrane canopy amphitheatre in Plock [autor].
236. Zamocowanie membrany w amfiteatrze w Opolu/Securing the membrane in the amphitheatre in Opole [autor].
237. Zamocowanie membrany do ściany w Sopocie/fixing the membrane to the wall Sopot [autor].
238. Zamocowanie membrany za pomocą cięgna brzegowego w Katowicach/Securing the membrane using a tendon edge in Katowice [autor].
239. Cięgno brzegowe zadaszenia pętli autobusowej w Warszawie/tendon boundary loop bus shelters in Warsaw [autor].
240. Zamocowanie membrany w zadaszeniu w Mrągowie/Fixing the membrane canopy in Mragowo [autor].
241. Zamocowanie membrany w zadaszeniu w Kołobrzegu/Fixing the membrane canopy in Kolobrzeg [autor].
242. Zamocowanie paneli w Szczecinie/Securing panels in Szczecin [autor].
243. Cięgno koszowe zadaszenia w centrum handlowym w Katowicach/tendon platforms roof at a shopping mall in Katowice [autor].
244. Cięgno koszowe na stadionie w Warszawie/tendon platforms at the stadium in Warsaw [autor].

245. Ciężno koszowe zadaszania przy pętli autobusowej w Warszawie/tendon Platform shelters at the bus terminus in Warsaw [autor].
246. Zamocowanie łuków podtrzymujących membranę na Stadionie Narodowym w Warszawie/Fixing arches supporting the diaphragm at the National Stadium in Warsaw [autor].
247. Widok od dołu pory na stacji paliw w Gdyni/View from the bottom of the pores at a gas station in Gdynia [autor].
248. Podpora punktowa na stacji paliw w Gdyni/The support point at a gas station in Gdynia [autor].
249. Podparcie membrany w Mrągowie/The support membrane in Mrągowo [autor].
250. Zamocowanie membrany do ciężna w amfiteatrze w Szczecinie/Securing the membrane to the tendon at the amphitheatre in Szczecin [autor].
251. Zamocowanie membrany do ruchomego wózka w amfiteatrze w Kielcach/Securing the membrane to the mobile carriage in the amphitheatre in Kielce [autor].
252. Pręt dociskowy w Sulejówku/bar pressure in Sulejówek [autor].
253. Zamocowanie membrany do płyty węzłowej w Katowicach/Securing the membrane to the plate junction in Katowice [autor].
254. Zamocowanie membrany w Częstochowie/Securing the membrane in Czestochowa [autor].
255. Zamocowanie membrany w zadaszaniu stadionu w Gdyni/Fixing the membrane canopy of the stadium in Gdynia [autor].
256. Dwa sposoby zamocowania membrany w zadaszaniu amfiteatru w Ustroniu/Two ways to secure the membrane in a canopy amphitheatre in Ustroń [autor].
257. Górne zamocowanie membrany w Łąncucie/The upper mounting membrane in Lancut [autor].
258. Dolne zamocowanie membrany w Łąncucie/bottom mounting membrane in Lancut [autor].
259. Zacisk na ciężnie zadaszania w Warszawie/Clip tendon shelters in Warsaw [autor].
260. Zaciski na ciężnach w Sopocie/Terminals on tendons in Sopot [autor].
261. Regulowana długość odciążu w Sopocie/Adjustable extraction in Sopot [autor].
262. Możliwość wydłużenia słupa w Częstochowie/The possibility of extending the column in Czestochowa [autor].
263. Zamocowanie membrany w Częstochowie/Securing the membrane in Czestochowa [autor].
264. Zamocowanie pierścienia w Sopocie/Fixing ring in Sopot [autor].
265. Zamocowanie naroża membrany w Bydgoszczy/Mounting corners of the membrane in Bydgoszcz [autor].
266. Uproszczone zamocowanie membrany/Simplified mounting membrane [autor].
267. Otwór w membranie pętli autobusowej w Warszawie/The hole in the membrane bus station in Warsaw [autor].
268. Właz na zadaszanie Stadionu Narodowego w Warszawie/The hatch on the roof of the National Stadium in Warsaw [autor].
269. Otwór w membranie w Sulejówce/The opening in the membrane Sulejówek [autor].
270. Zasłonięty otwór w Warszawie/Obscured hole in Warsaw [autor].
271. Zakończenie zadaszania w Częstochowie/End of canopy in Czestochowa [autor].
272. Bortnice w amfiteatrze w Ustroniu/toe boards in the amphitheatre in Ustroń [autor].
273. Bortnice na stadionie w Poznaniu/toe boards at the stadium in Poznan [autor].
274. Bortnice w amfiteatrze w Wiśle/toe boards in the amphitheatre in Wisla [autor].
275. Zaślepiiony otwór i narożny kołnierz w amfiteatrze w Wiśle/The blind hole and corner flange at the amphitheatre in Wisla [autor].
276. Bortnice na stadionie miejskim w Warszawie/toe boards at the city stadium in Warsaw [autor].
277. Bortnice na dworcu we Wrocławiu/toe boards at the station in Wroclaw [autor].
278. Bortnice na stadionie w Puławach/toe boards at the stadium in Pulawy [autor].
279. Zamocowanie dolnej krawędzi membrany w zadaszaniu amfiteatru w Brennej/Securing the bottom edge of the membrane in a canopy amphitheatre in Brenna [autor].

280. Kołnierz na membranie w klubie w Sopocie/The collar on the membrane at the club in Sopot [autor].
281. Bufor nad rynną w amfiteatrze w Płocku/buffer over the gutter in the amphitheatre in Plock [autor].
282. Rzygacz w Ustroniu/Gargoyle in Ustroń [autor].
283. Rzygacz z łańcuchami w Brennej/Gargoyle chains in Brenna [autor].
284. Rzygacz w Zubrzycy Górnej/gargoyle in Upper Zubrzyca [autor].
285. Rękaw łączący membranę z kielichem w Kołobrzegu/Sleeve connecting membrane cup in Kolobrzeg [autor].
286. Fartuch łączący membranę z rynną w Kielcach/apron connecting membrane gutter in Kielce [autor].
287. Fartuch łączący membranę z rurą spustową w Poznaniu/apron connecting membrane of the drain pipe in Poznan [autor].
288. Kielich na stadionie w Warszawie/The cup at the stadium in Warsaw [autor].
289. Kielich zadaszenia pętli autobusowej w Warszawie/The cup canopy bus station in Warsaw [autor].
290. Kielich zadaszenia na dworcu we Wrocławiu/The cup shelters at the railway station in Wroclaw [autor].
291. Kielich zadaszenia amfiteatru w Kielcach/The cup canopy amphitheatre in Kielce [autor].
292. Rynna w Wiśle/gutter in Wisla [autor].
293. Stalowe osłony w amfiteatrze w Szczecinie/Steel covers the amphitheatre in Szczecin [autor].
294. Kielich na stadionie w Bytomiu/The cup at the stadium in Bytom [autor].
295. Elastyczne rury spustowe w Chojnicach/Flexible pipes in Chojnice [autor].
296. Kielich spustowy leżący na membranie stadionu w Gdyni/The cup drain lying on the membrane of the stadium in Gdynia [autor].
297. Odprowadzenie wody na Stadionie Narodowym w Warszawie/Drainage at the National Stadium in Warsaw [autor].
298. Zabezpieczenie otworu w membranie amfiteatru w Kielcach/Protection of the hole in the diaphragm amphitheatre in Kielce [autor].
299. Dodatkowe rury spustowe w Płocku/Additional downspouts in Plock [autor].
300. Dodatkowy odpływ w zadaszeniu w Zubrzycy Górnej/Additional outflows in the hood as in Zubrzyca Upper [autor].
301. Rynna w zadaszeniu w amfiteatrze w Opolu/The chute in the hood as the amphitheatre in Opole [autor].
302. Rynna w zadaszeniu antresoli amfiteatru w Sopocie/The chute in the hood as mezzanine amphitheatre in Sopot [autor].
303. Podciśnieniowy system rur spustowych w Płocku/Vacuum system pipes in Plock [autor].
304. Wiązka łańcuchów do odprowadzania wody/Beam chains for drainage [autor].
305. Zamocowanie wiązki łańcuchów w Brennej/Mounting beam chains in Brenna [autor].
306. Studnia chłonna pod zadaszeniem w Poznaniu/Well absorbent sheltered in Poznan [autor].
307. Utwardzony grunt w rejonie spływu wody przy amfiteatrze w Warszawie/hardened ground in the area of water runoff at the amphitheatre in Warsaw [autor].
308. Schemat powstawania kondensacji pary/Diagram of the formation of condensation [autor].
309. Wentylowanie przestrzeni pod zadaszeniem/Ventilation space under roof [autor].
310. Schemat zniszczenia powłoki spowodowanego śniegiem/Scheme damage to the film due to snow [autor].
311. Schemat wpływu liny przeciwśniegowej na powłokę/Diagram of the impact of the rope taped seams on the shell [autor].
312. Hak zabezpieczający przed przeciążeniem [udostępniony przez projektanta]/Hook overload protection [provided by the designer].

313. Zjawisko samoczynnego zsuwania a nawet toczenia śniegu/The phenomenon of self-sliding and even rolling snow [autor].
314. Zjawisko samoczynnego zsuwania a nawet toczenia śniegu/The phenomenon of self-sliding and even rolling snow [autor].
315. Gromadzenie śniegu przy ujemnej temperaturze/Collection of snow with a negative temperature [autor].
316. Powstawanie warstwy poślizgowej przy dodatniej temperaturze/The formation of the sliding layer and frost [autor].
317. Kable grzejne zamocowane pod membraną/Heating cables fitted under the membrane [autor].
318. Zdjęty fartuch pod membraną w Poznaniu/Moved apron underneath the membrane in Poznan [autor].
319. Ochrona rynny przed zsuwającym śniegiem/Protection of the gutter before zsuwającym snow [autor].
320. Schemat rozmieszczenia elementów monitoringu w amfiteatrze w Płocku/Schematic layout of monitoring elements in the amphitheatre in Plock [autor].
321. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych/Schematic layout of measuring points [146].
322. Zamocowanie pryzmatów pomiarowych bezpośrednio do membrany/Securing the prism measurement directly to the membrane [autor].
323. Wykres przemieszczeń punktu pomiarowego nr 10 w dniach 11.2013–2.05.2013/Chart displacement measuring point No. 10 on 05/02/2013 11.2013 [147].
324. Zadaszenie membranowe obciążone śniegiem/Membrane canopy loaded with snow [autor].
325. Widoczny efekt zsunięcia śniegu/Visible effect of sliding snow [147].
326. Spadający śnieg wzdłuż krawędzi zadaszenia/The falling snow along the canopy edge [autor].
327. Pryzmy śniegu pod zadaszeniem/Snow piles under a canopy [autor].
328. Po opadach śniegu w Wiśle/After a snowfall in Wisła [autor].
329. Odśnieżanie zadaszenia membranowego/The snow removal of the membrane canopy [R. Stryżko].
330. Próg utrudniający spadanie śniegu/The threshold obstructing snow falling [autor].
331. Miejsce przeprowadzenia pomiarów/Place of measurement [autor].
332. Położenie punktów pomiarowych/Location of measurement points [autor].
333. Rozkład temperatury posadzki o godzinie 14:00/Distribution of floor temperature at 14:00 [autor].
334. Porównanie zmian temperatury w wybranych punktach do temperatury powietrza/A comparison of temperature changing at selected points to the air temperature [autor].
335. Naprawiony fragment membrany/A repaired place of the membrane [autor].
336. Uszkodzenie spowodowane racą/A damage caused by torch flare [autor].
337. Naklejka w kształcie liścia/A leaf shape sticker [autor].
338. Proces mycia zadaszenia/The roof cleaning process [R. Stryżko].
339. Rozwój glonów w miejscu zastoju/The growing of algae in the ponding [autor].
340. Ślady usuwania brudu na membranie/Traces of dirt removing on the membrane [autor].
341. Podświetlenie amfiteatru w Płocku/The amphitheatre illumination in Plock [autor].
342. Podświetlenie przystani we Włocławku/The marina illumination in Włocławek [autor].
343. Podświetlenie stadionu w Poznaniu/The stadium illumination in Poznań [autor].
344. Podświetlenie zadaszenia w Katowicach/The roof illumination in Katowice [autor].
345. Podświetlenie zadaszenia pomiędzy budynkami w Katowicach/The roof illumination between the buildings in Katowice [autor].
346. Linie szwów na zadaszeniu/Seams lines on canopy [autor].
347. Warstwice i kierunki spadów na powierzchni membrany w Ustroniu/Contours and flowdown directions on the membrane surface in Ustroń [autor].

348. Kierunki spływania wody po zadaszeniu w Wiśle/Directions of water runoff after canopy in Wisła [autor].
349. Promienie krzywizny powłoki w Ustroniu/The curvature radii of the canopy in Ustroń [autor].
350. Promienie krzywizny membrany w Połączynie Zdrój/The curvature radii of the membrane in Połączyn Zdroj [23].
351. Promień krzywizny zadaszenia w Katowicach/The radius of curvature of the roof in Katowice [autor].
352. Krzywizny zadaszenia w Bydgoszczy/Curves shelters in Bydgoszcz [autor].
353. Koncepcja zadaszenia amfiteatru w Żywcu/The concept of canopy amphitheatre in Żywiec [<http://zywiecczyzna24.net/wpis/502/amfiteatr-pod-grojcem-w-zywcu>].
354. Forma powłoki w koncepcji pierwotnej/Shell form in the original concept [263].
355. Plan warstwiczny powłoki zaproponowanej w koncepcji/The contour plan of the canopy proposed in the concept [autor].
356. Zmiana pochylenia słupów/Change of arc inclination [autor].
357. Obniżenie łuku/Lowering the arc [autor].
358. Zmiana kształtu łuku/Changing the shape of the arc [autor].
359. Wprowadzenie dodatkowego wcięcia/Introduction of additional indentation [autor].
360. Zrealizowane zadaszenie amfiteatru w Żywcu/Realized amphitheatre canopy in Żywiec [autor].
361. Plan warstwiczny zadaszenia w Płocku/Contour plan of canopy in Płock [autor].
362. Schemat analizowanych zmian zadaszenia amfiteatru w Płocku/Diagram of analyzed changes of amphitheatre canopy in Płock [autor].
363. Połączenie kabli pod membraną/Connection of cables under the membrane [autor].
364. Propozycja zmiany podziału na bryty/The proposal to change the stripes division [autor].
365. Plan warstwiczny istniejącego zadaszenia w Katowicach/Contour plan of the existing canopy in Katowice [autor].
366. Istniejący układ konstrukcyjny zadaszenia w Katowicach/Existing structural layout of canopy in Katowice [autor].
367. Propozycja wprowadzenia liny przeciwśniegowej/Proposal for the introduction of a snow guard rope [autor].
368. Plan warstwiczny po korekcie formy/Contour plan after form correction [autor].
369. Plan warstwiczny istniejącego zadaszenia w Zubrzycy Górnej/Contour plan of the existing canopy in Zubrzyca Górna [autor].
370. Warianty wprowadzenia dodatkowych cięgien/Options for introducing additional cables [autor].
371. Schemat wypychania membrany przez wiszący słup/Scheme of ejecting the membrane by the hanging pole [autor].
372. Plan warstwiczny istniejącego zadaszenia w Mrągowie/Contour plan of the existing canopy in Mrągowo [autor].
373. Propozycja wprowadzenia liny przeciwśniegowej w Mrągowie/The proposal to introduce a snow guard in Mrągowo [autor].
374. Przykład wzmocnienia membrany za pomocą układu linek/Example of reinforcing the membrane using a wire system [autor].

SPIS TABEL

1. Rodzaje struktur membranowych (Marijke Mollaert [88])	61
2. Elementy definiujące krawędzie membrany [autor]	64
3. Typowe formy membran (Heino Engel [121])	65
4. Typu struktur pneumatycznych [autor]	66
5. Porównanie danych dotyczących wytrzymałości materiałów membranowych [na podstawie producentów wymienionych materiałów]	74
6. Zalety i wady materiałów membranowych [autor]	77-79
7. Porównanie zadaszeń zrealizowanych w amfiteatrach [autor]	129
8. Porównanie zadaszeń zrealizowanych na stadionach [autor]	156
9. Porównanie zadaszeń zrealizowanych w pozostałych obiektach [autor]	181
10. Sposoby zamocowania membrany [autor]	198-200
11. Sposoby odprowadzania wody deszczowej [autor]	218-219
12. Rozmieszczenie lin przeciwsniegowych [autor]	224-225
13. Sposoby zabezpieczenia przed śniegiem [autor]	238-239
14. Porównanie zadaszeń [autor]	250-251
15. Układy linii warstw na powierzchniach membran [autor]	253-262
16. Orientacyjne promienie krzywizn [autor]	265

INDEKS TERMINÓW

Terminologia stosowana przy opisywaniu zadaszń membranowych jest bardzo specjalistyczna, dlatego uzupełnieniem tej publikacji jest indeks terminów. Zamieszczone zostały również nazwy używane w języku angielskim, aby ułatwić i ujednoczyć tłumaczenia.

Anizotropia

Anisotropy

Cecha materiału oznaczająca, że właściwości fizyczne zależą od kierunku; w przypadku tkaniny zależą od tego, czy kierunek jest zgodny z nitkami osnowy i wątku czy skośnie do nich.

Antyklastyczna

Anticlastic

Powierzchnia antyklastyczna to powierzchnia o krzywiznie siodłowej, która posiada ujemną krzywiznę Gaussa i składa się z tzw. punktów hiperbolicznych.

Baldachim

Canopy

Osłona wykonana z tkaniny ozdobnej, zamocowana nad tronem lub łóżem dla podniesienia rangi miejsca; może być osłoną przenośną.

Błona mydlana

Soap film

Technika modelowania fizycznego, wykorzystywana do określenia kształtu równowagi, uzyskiwana dzięki napięciu powierzchniowemu występującemu w błonie mydlanej, określonej zwilżonym elementem brzegowym, np. drutem.

Bortnica

Water guard

Podłużny element przymocowany do membrany, służący do zmiany kierunku spływania wody po membranie.

Brezent

Tarpaulin

Rodzaj grubej i mocnej, impregnowanej tkaniny z naturalnych nici, kiedyś używany w namiotach, żaglach, plandekach oraz do wyrobu nieprzemakalnej odzieży.

Bryt

Cloth patterns, gore, cloth

Fragment tkaniny technicznej wycięty według określonego wykroju; po połączeniu wzdłuż linii szwów z innymi brytami powstaje płat, czyli część lub całość powłoki zadasznia membranowego.

Brzeg

Border, boundary

Patrz *krawędź*

Cięgno

Cable, tie

Element konstrukcji wykonany z wiotkiego materiału, np. skręconej liny albo drutu; przenosi jedynie siły rozciągające; obciążone jedynie ciężarem własnym przyjmuje kształt linii łańcuchowej.

Cięgno brzegowe w tunelu z tkaniny

Fabric pocket with cable

Sposób zamocowania membrany wzdłuż krawędzi brzegowej, stosowany przy mniej obciążonych cięgnach, gdy długość wynosi do kilku metrów.

Cięgno brzegowe z klamrami

Edge cable with clamps

Sposób zamocowania membrany wzdłuż krawędzi brzegowej, stosowany przy mocno obciążonych cięgnach, najczęściej przy membranie z włókien szklanych.

Cięgno grzbietowe i koszowe

Ridge and valley cable

Elementy nośne stosowane dla uzyskania podwójnej krzywizny w formach fałdowych, z naprzemian umieszczonymi krawędziami górnymi i dolnymi, cięgna ułożone są równolegle lub promieniście.

Cięgno łańcuchowe

Catenary cable

Wiotki element znajdujący się wewnątrz tunelu z zawiniętej membrany tworzącej krawędź napiętej powłoki; jego kształt jest zbliżony do linii łańcuchowej, długość jest określana wraz z wykrojami a grubość wynika z obciążeń.

Cięgno oczkowe

Eye cable

Lina tworząca pętlę w narożniku membrany, stosowana jest dla bardziej równomiernego rozłożenia sił w mocno obciążonych miejscach.

Cięgno podwieszające *Suspension cable*

Element podtrzymujący, który łączy konstrukcję główną z konstrukcją drugorzędową; podwieszanie membrany za pomocą lin powoduje bardziej równomierne rozłożenie naprężeń.

Cięgno stabilizujące*Backstay, guy cable, stay line*

Patrz *odciąg*

Degradacja ultrafioletowa*Ultraviolet degradation*

Pogorszenie właściwości tkaniny z powodu długotrwałego działania promieniowania słonecznego; dla zmniejszenia skutków stosowane są dodatkowe warstwy ochronne.

Dolina*Valley*

Patrz *kosz*

Dwukierunkowy*Biaxial*

Jednoczesne obciążenie wzdłuż dwóch prostopadłych kierunków, zwykle wzdłuż nitki osnowy i wątku; w badaniach laboratoryjnych, podczas testów materiałowych wymaga specjalnego zamocowania, aby obciążenia były tej samej wartości lub o określonych proporcjach; uproszczeniem są testy jednokierunkowe.

Dwuosiowy*Biaxial*

Patrz *dwukierunkowy*

Dzielenie*Sectionalizing*

Metoda wykonania dużych powłok z tkaniny przez podział na mniejsze płaty, a następnie łączenie ich za pomocą specjalnego osprzętu.

Element skończony*Finite element*

Pojedyncza część sieci obliczeniowej, używanej przy analizie konstrukcji, w metodzie elementów skończonych (MES), analizowana konstrukcja jest dzielona na mniejsze, proste elementy geometryczne, najczęściej trójkąty o wspólnych węzłach, proces podziału nazywany jest dyskretyzacją.

ETFE*ETFE*

Etylen tetrafluoroetylen to rodzaj kopolimeru w postaci jednorodnej folii; odporny chemicznie, nie łączy się z innymi związkami, nie potrzebuje dodatkowych warstw ochronnych, używany jest w konstrukcjach poduszek pneumatycznych.

Fałda*Crimp, wrinkle*

Deformacja powierzchni tkaniny, wynikająca z niewłaściwego rozkładu naprężeń, czyli dużej różnicy między głównymi naprężeniami, zwykle niższego naprężenia w kierunku prostopadłym do linii fałd.

Flater*Flutter*

Patrz *łopotanie*

Folia*Foil, film*

Bardzo cienki arkusz materiału, termin stosowany dla wszystkich izotropowych błon konstrukcyjnych, w tym do folii ETFE.

Generowanie wzorców do cięcia*Cutting pattern generation*

Proces wyznaczania płaskich wykrojów, na podstawie których cięta jest tkanina i powstają bryty; układ linii podziału przestrzennej powierzchni projektowany jest wg. określonych wymogów.

Gęstość sił*Force density*

Patrz *metoda gęstości sił*.

Gniazdo*Socket*

Patrz *okucie*

Grzbiet*Ridge*

Wewnętrzna krawędź dachu umieszczona powyżej przylegających połączy; dla uzyskania takiej krawędzi konieczne jest zastosowanie dodatkowej sztywnej podpory lub cięgna.

Grzbiet i dolina*Ridge and valley*

Patrz *kształt pofalowany*.

Hala pneumatyczna*Airhall*

Patrz *konstrukcja pneumatyczna*.

Hala namiotowa*Marquee, frame tent*

Budowla tymczasowa powstała z pokrycia membraną sztywnej konstrukcji ramowej, na której poszczególne panele najczęściej są płaskie.

Histereza*Hysteresis*

Cecha materiału, która powoduje, że tkanina powraca do swego pierwotnego kształtu po usunięciu obciążenia, ale dopiero po pewnym czasie.

Hypar*Hypar*

Patrz *paraboloida hiperboliczna*.

Izotropowy

Cecha materiału oznaczająca, że właściwości mechaniczne są podobne we wszystkich kierunkach przykładem jest folia ETFE, a przeciwieństwem jest tkanina, której właściwości zależą od orientacji włókien.

Isotropic**Jednokierunkowy**

Działanie wzdłuż jednego kierunku materiału, np. w kierunku głównych włókien tkaniny; uproszczona metoda badań laboratoryjnych stosowana podczas testów materiałowych.

Uniaxial**Jednoosiowy**

Patrz *jednokierunkowy*.

Uniaxial**Kabel**

Wiązka wielu cienkich drutów formowanych jako pojedyncze ciągnie; mocniejszy niż skręcona lina przy podobnej średnicy, ale mniej elastyczny.

Cable**Kanwa**

Patrz *brezent*.

Canvas**Keder**

Firmowa nazwa sznura lub taśmy z włókien sztucznych stosowanego do wzmocnienia krawędzi membrany; zapobiega rozdarciu przez równomierne rozłożenie naprężeń i ułatwia zamocowanie do innych sztywnych elementów konstrukcji.

Keder**Kewlar**

Firmowa nazwa materiału z przędzy aramidowej używanej w konstrukcjach kompozytowych i tkaninach o bardzo dużej wytrzymałości. Obecnie jest rzadko stosowany ze względu na wysoką cenę.

Kevlar**Kieszon**

Patrz *tunel*.

Pocket**Kieszon łańcuchowa**

Patrz *tunel ciągnowy*.

Catenary pocket**Klema**

Patrz *zacisk*.

Clamp**Kolek kotwiący**

Rodzaj zakończenia liny w formie nagwintowanego pręta, który daje możliwość regulowania długości i zarazem naprężania ciągnia.

Anchor stud**Kompensacja**

Celowe zmniejszenie wymiarów wycinanych części membrany w celu wprowadzenia odpowiedniego naprężenia wstępnego.

Compensation**Konfekcja**

Termin używany dla odzieży, oznaczający produkcję określonego rozmiaru lub kroju. W przypadku konstrukcji membranowych lepszym określeniem jest „krój”.

Cutting**Konstrukcja błonowa**

Patrz *konstrukcja membranowa*.

Membrane structure**Konstrukcja ciągnowa**

Rodzaj konstrukcji wykorzystujących jako główne elementy nośne wiotkie ciągnia przenoszące jedynie siły rozciągające.

Cable structure**Konstrukcja lekka**

Rodzaj konstrukcji obejmujący szeroki zakres układów nośnych, w tym wielu odpornych na zginanie lub ściskanie; mimo to termin ten najczęściej używany jest dla konstrukcji ciągnowych i membranowych.

Lightweight structure**Konstrukcja linowa**

Popularna nazwa konstrukcji ciągnowych, wykorzystujących liny, jako główne elementy nośne. Patrz *konstrukcja ciągnowa*.

Funicular structure**Konstrukcja membranowa**

Rodzaj konstrukcji wykorzystującej dwukierunkowo napięte elementy wykonane z tkaniny lub folii.

Membrane structure**Konstrukcja nadmuchiwana powietrzem**

Jeden z typów konstrukcji pneumatycznych, w którym powłoka jest napięta dzięki wewnętrznemu ciśnieniu powietrza, ale jej położenie zapewnia zewnętrzna konstrukcja.

Air inflated structure**Konstrukcja napinana brzegiem**

Jeden z dwóch rodzajów konstrukcji membranowych, w których napięcie powłoki jest uzyskiwane przez siły przyłożone wzdłuż krawędzi brzegowych; w tym przypadku membrana przyjmuje formę powierzchni antyklastycznej.

Boundary tensioned structure

Konstrukcja pneumatyczna*Pneumatic Structure*

Jeden z dwóch rodzajów konstrukcji membranowych, w których napięcie jest uzyskiwane przez różnicę ciśnienia powietrza po obu stronach powłoki, w tym przypadku membrana przyjmuje formę powierzchni synklastycznej.

Konstrukcja podtrzymywana powietrzem*Air supported structure*

Jeden z typów konstrukcji pneumatycznych, w którym powłoka jest utrzymywana dzięki wewnętrznemu ciśnieniu powietrza.

Konstrukcja powierzchniowa*Surface structure*

Konstrukcja, w której głównym elementem nośnym jest sztywna powłoka lub wiotka sieć linowa albo membrana.

Konstrukcja powłokowa*Shell structure*

Sztywna konstrukcja powierzchniowa zdolna przenosić siły ściskające i rozciągające oraz mniejsze momenty zginające, kiedyś częściej nazywana była łupiną.

Konstrukcja rozciągana*Tensile structure*

Rodzaj układu nośnego, w którym główne elementy przenoszą tylko siły rozciągające.

Konstrukcja wisząca*Hanging structure*

Wspólna nazwa dla konstrukcji cięgnowych i membranowych napiętych brzegiem.

Konstrukcja żaglowa*Sail structure*

Wyrażenie stosowane przez architektów dla określenia napiętych konstrukcji z tkaniny, co często powoduje mylne rozumowanie, ponieważ żagle są napinane przez ciśnienia powietrza wywołanego wiatrem; może to prowadzić do projektowania niewłaściwych trójkątnych płatów.

Kosz*Valley*

Wewnętrzna krawędź dachu, umieszczona niżej niż sąsiadujące połączenie, powoduje to, że wzdłuż tej krawędzi spływa woda lub gromadzi się śnieg.

Kotew*Anchor*

Śruba lub hak służący do zamocowania napiętego cięgna do innych elementów konstrukcji, np. fundamentów lub muru.

Krawędź*Edge, boundary*

Terminy brzeg i krawędź są synonimami używanymi do określenia miejsca zakończenia napiętej powłoki, ale mogą również dotyczyć poszczególnych płatów, oddzielonych cięganami.

Krawędź wielolukowa*Scalloped boundary*

Termin używany do opisu kształtu linii brzegowej uzyskanej z kilku cięgien albo jednego cięgna zamocowanego w kilku punktach. Kształtem przypomina krawędź koronki.

Krawędź elastyczna*Flexible boundary*

Patrz *krawędź łańcuchowa*.

Krawędź łańcuchowa*Catenary edge*

Termin używany do określenia kształtu linii brzegowej. Występuje w miejscu zamocowania i zarazem wzmocnienia krawędzi brzegowej powłoki wykonanej z tkaniny przez wykorzystanie napiętego cięgna, zamocowanego w narożnych punktach do konstrukcji podporowej.

Krój*Cutting*

Sposób ukształtowania poszczególnych brytów dla uzyskania określonej formy napiętej powłoki.

Krzywizna*Curvature*

Wielkość matematyczna, która w uproszczeniu wyraża odwrotność promienia okręgu stycznego do krzywej w danym miejscu.

Krzywizna Gaussa*Gaussian curvature*

Wielkość matematyczna dotycząca powierzchni i wyrażająca iloczyn dwóch głównych krzywizn w danym punkcie.

Krzywizna główna*Principal curvature*

Dwie główne krzywizny powierzchni to wielkości matematyczne, oznaczające najmniejszą i największą krzywiznę przekrojów powierzchni płaszczyznami prostopadłymi do siebie i zarazem prostopadłymi do tej powierzchni w tym punkcie.

Krzywizna podwójna*Double curvature*

Wielkość charakterystyczna dla powierzchni, która jest wygięta w dwóch głównych kierunkach, krzywizna Gaussa jest różna od zera.

Krzywizna ujemna, przeciwna*Anticlastic curvature*

Wielkość dotycząca powierzchni z punktami o ujemnej krzywiznie Gaussa, co oznacza, że jeden promień krzywizny jest po jednej stronie powierzchni, a drugi po przeciwnej stronie. Powierzchnia przypomina kształtem siodło.

Krzywizna średnia*Mean curvature*

Wielkość dotycząca powierzchni, równa jest średniej arytmetycznej głównych krzywizn $H=(K_1+K_2)/2$.

Krzywizna dodatnia, zgodna*Synclastic curvature*

Wielkość dotycząca powierzchni z punktami o dodatniej krzywiznie Gaussa. Promienie głównych krzywizn w obu kierunkach znajdują się po tej samej stronie powierzchni. Powierzchnia przypomina kształtem wypukłą bańkę mydlaną.

Kształt linowy*Funicular shape*

Patrz *linia łańcuchowa*.

Kształt pofaldowany*Ridge and valley shape, wave shape*

Przestrzenna forma konstrukcji membranowej charakteryzująca się na przemian występującymi krawędziami grzbietowymi i koszowymi.

Kształt równowagi*Equilibrium shape*

Kształt powierzchni występujący w napiętej membranie, gdy określone są warunki brzegowe, poziom naprężenia wstępnego oraz rozkład wewnętrznych naprężeń.

Kształtka*Fitting, cable fitting*

Patrz *połączenie*.

Laminowana*Laminated*

Patrz *tkanina powlekana*.

Lej*Funnel*

Przestrzenna forma napiętej membrany, powstała z zamocowania powłoki wzdłuż krawędzi brzegowych i naciągnięcia centralnego pierścienia w dół – odwrócona forma stożkowa.

Liklina*Bolt rope*

Tradycyjne żeglarskie określenie liny wszytej wzdłuż krawędzi tkaniny, zapobiegające strzępieniu żagla. Obecnie używane są tekstylne taśmy brzegowe. Patrz *keder*.

Lina*Wire, rope*

Wiotki element konstrukcyjny wykonany ze zwiniętych spiralnie wokół rdzenia spletek lub cienkich drutów.

Linia geodezyjna*Geodesic line*

Linia przechodząca przez dwa punkty gładkiej powierzchni o zerowej krzywiznie geodezyjnej. Linia ta, po rozwinięciu powierzchni jest linią prostą, dlatego popularnie nazywana jest najkrótszą linią łączącą dwa punkty na powierzchni. Linia najkrótsza to linia geodezyjna, ale nie zawsze linia geodezyjna jest najkrótszą.

Linia łańcuchowa*Catenary line*

Teoretyczna linia krzywa uzyskiwana przez idealnie giętkie, jednolicie gęste i nierozciągliwe ciężno, wiszące pomiędzy dwoma punktami końcowymi. W praktyce, kształt ten prawdopodobnie nie występuje, lecz jest używany do określenia kształtu linii brzegowej jednolicie naprężonej tkaniny przymocowanej do ciężna, zamocowanej tylko w punktach końcowych.

Linia modelowa*Model line, system line*

Teoretyczna linia występująca w sieci uzyskanej, jako komputerowy model powierzchni określonej założonymi parametrami w procesie projektowym tzw. poszukiwaniu kształtu. Linie te niekoniecznie nadają się do wykorzystania, jako linie podziału na bryty lub linie szwów, bardziej korzystne są linie geodezyjne.

Luwersy*Grommets*

Nazywane też liwersami, Patrz *oczka*.

Łańcuchowa*Catenary*

Patrz *linia łańcuchowa*.

Łącznik*Fittind, cable fitting*

Patrz *połączenie*.

Łopotanie*Flutter*

Nadmierne i niekontrolowane dynamiczne przemieszczenia tkaniny spowodowane przez współdziałanie pomiędzy konstrukcją i wiatrem; może pojawiać się z powodu niewłaściwego napięcia lub ukształtowania.

Łuk*Arch*

Sztywny element nośny, spełniający funkcję podpory w konstrukcji membranowej i zara-

zem nadaje jej odpowiedni kształt, ułatwia osiągnięcie prawidłowej krzywizny.

Markiza *Awning, sunblind*

Płócienny daszek nad oknem lub drzwiami, osłona przed słońcem.

Marszczenie *Wrinkling*

Samoczynne zjawisko powstające na powierzchni tkaniny; może wystąpić z powodu nierównomiernego napięcia podczas montażu lub później w wyniku relaksacji tkaniny.

Material *Cloth*

Patrz *tkanina*.

Material bazowy *Base cloth*

Patrz *surówka*.

Membrana *Membrane*

Napięta, elastyczna powłoka o niewielkiej grubości mogąca przenosić jedynie siły rozciągające. Dla zapewnienia jej stałego kształtu musi być odpowiednio napięta. Zwykle wykonana z tkaniny technicznej lub folii. Nazwa przejęta z łaciny, dosłownie oznaczająca błonę.

Metoda dynamicznej relaksacji
Dynamic relaxation method

Metoda obliczeniowa, używana w procesie poszukiwania kształtu, analizy obciążeń i generowaniu wykrojów do cięcia dla konstrukcji membranowych, w uproszczeniu oparta jest na analizie teoretycznych drgań napiętej powłoki.

Metoda gęstości sił *Force density method*

Popularna metoda obliczeniowa, używana w modelowaniu komputerowym konstrukcji błonowych. Pozwala na proces poszukiwania kształtu, analizę obciążeń oraz proces wyznaczania wykrojów; w uproszczeniu oparta jest na proporcji sił w elementach łączących węzły sieci obliczeniowej do ich długości.

Modelowanie fizyczne *Physical modelling*

Proces określania kształtu powłoki przez wykorzystanie materiałów fizycznych, choć w dużej mierze został zastąpiony przez modelowanie komputerowe, jest nadal stosowane ale w fazie koncepcyjnej.

Modelowanie komputerowe
Computational modelling

Proces polegający na wykorzystaniu programów obliczeniowych dla konstrukcji membra-

nowych w celu poszukiwania kształtu, analizy obciążeń, wyznaczania wzorców do cięcia oraz tworzenia wizualizacji.

Modelowanie płaskie *Patterning*

Proces określania płaskich kształtów, wykrojów, na podstawie których z tkaniny wycinane są bryty; następnie łączone są one wzdłuż linii szwów dla uzyskania wymaganej trójwymiarowej formy.

Namiot *Tent*

Przenośne pomieszczenie, zwykle wykonane z nieprzemakalnego materiału, w którym pokrycie podtrzymywane jest sztywnymi prętami i przytwierdzone do ziemi.

Napięcie *Tension*

Patrz *rozciąganie*.

Napięty *Tensile*

Element, na który działają siły rozciągające; termin używany w języku angielskim dla konstrukcji membranowych i sieci linowych.

Naprężenie *Stress*

Wielkość fizyczna wyrażająca stosunek siły działającej na ciało stałe do jego pola przekroju. W przypadku tkaniny używanej w konstrukcjach membranowych naprężenie jest zwykle wyrażone, jako siła na jednostkę szerokości.

Naprężenie wstępne *Prestress*

Stan naprężenia, który pojawia się w tkaninie lub innych częściach konstrukcji, ale nie wynika z ciężaru własnego lub innych obciążeń zewnętrznych. Uzyskiwany jest zwykle przez odpowiedni układ elementów brzegowych oraz wprowadzone siły napinające powłokę.

Nieliniowość geometryczna
Geometric nonlinearity

Właściwość charakterystyczna dla konstrukcji membranowych oznaczająca, że podczas analizy obciążeń również odkształcenie musi być brane pod uwagę, ponieważ zmiana kształtu powoduje zmianę wielkości sił wewnętrznych, a to jednocześnie powoduje zmianę samego odkształcenia.

Nieprzezroczysty *Opaque, blackout*

Typ materiału pokryciowego nieprzepuszczającego światła dziennego.

Nitka *Thread*

Materiał włókienniczy służący do produkcji tkaniny lub jej łączenia przez szycie. Powstaje ze skręconych włókien naturalnych lub sztucznych.

Obręcz środkowa *Mid ring*

Patrz *piersień*.

Obrzeże *Border, boundary*

Patrz *krawędź*.

Obwódka *Border, boundary*

Patrz *krawędź*.

Oczka *Grommets*

Otwory okute metalowymi nitami, rozmieszczone w niewielkich odstępach wzdłuż krawędzi brzegowej, służą do mocowania membrany do innych elementów konstrukcji za pomocą linki sznurującej, zwykle używane dla tkaniny poliestrowej pokrytej PCW.

Odciąg *Backstay, guy cable, stay line*

Rozciągany element nośny, z jednej strony połączony do ramy lub słupa w pobliżu zamocowania membrany, a z drugiej do zakotwienia w gruncie, służy do utrzymywania konstrukcji podporowej we właściwej pozycji.

Odciążenie *Relieve force*

Zmniejszenie punktowego naprężenia membrany przez zwiększenie długości zamocowania lub powierzchni przyłożenia siły za pomocą pośrednich elementów.

Odkształcenie *Strain*

Miara deformacji ciała poddanego siłom zewnętrznym. W przypadku rozciąganych elementów konstrukcyjnych jest to współczynnik zmiany długości pod wpływem obciążenia do długości nienaprężonego elementu. W przypadku zmiany formy membrany pod wpływem obciążeń częściej używana jest nazwa *przemieszczenie*.

Odporność na zabrudzenie*Dirt resistance*

Właściwość materiału określająca odporność na stałe przyczepianie się zanieczyszczeń do powłoki.

Odporność na przetarcie*Abrasion resistance*

Właściwość materiału określająca wpływ tarcia wynikającego z przesuwania membrany po innych twardej elementach konstrukcji; dla zabezpieczenia przed przetarciem, w prostszych konstrukcjach stosowana jest np. podwójna warstwa.

Okucie *Fitting, socket, cable fitting*

Rodzaj zakończenia cięgna, które umożliwia połączenie go z innymi elementami konstrukcji; typowym sposobem jest zalanie stożkowej tulei płynnym cynkiem; może być zamknięte z uchem lub otwarte z widełkami.

Ortotropowy *Orthotropic*

Cecha materiału, którego właściwości zależą od prostopadłych kierunków, niekonieczne zgodnych z przyjętym układem współrzędnych. Ponieważ tkaniny wykonywane są z nitok zorientowanych prostopadłe i właściwości zależą od ich kierunku, więc można powiedzieć, że są ortotropowe.

Osnowa *Warp*

Układ nitok biegnący wzdłuż produkowanej tkaniny, tj. równoległe do fabrycznego brzegu tkanego materiału, długość od kilkuset do tysiąca metrów, zwykle kierunek nitok osnowy ma większą wytrzymałość na rozciąganie.

Panama *Panama*

Rodzaj splotu tkaniny, jeden z najczęściej stosowanych w konstrukcjach membranowych ze względu na większą wytrzymałość i gęstość, układ nitok 2 x 2.

Panel *Panel*

Patrz *płat*.

Paraboloida hiperboliczna*Hyperbolic paraboloid*

Nazwa powierzchni geometrycznie definiowanej, jako wynik przesuwania jednej paraboli po przeciwnie skierowanej drugiej paraboli; powierzchnia o podwójnej krzywiznie, a jednocześnie zaliczana jest do powierzchni prostokreślnych i nierozwijalnych; najprostszą, napiętą membranę ma kształt czworoboku przestrzennego, zbliżonego do paraboloidy hiperbolicznej.

Parasol *Umbrella*

Oslona z tkaniny napiętej na konstrukcji opartej na jednym słupie; najczęściej składana i przenośna; często wykorzystywana jako barwny element reklamowy.

Pętla ciągnowa *Cable loop*

Punktowy sposób zamocowania membrany, wykorzystujący ciągnąco dla bardziej równomiernego rozłożenia naprężeń.

Pętla *Fastening loop, eye*

Rodzaj zakończenia liny, pozwalający na połączenie z innymi elementami konstrukcji.

Pierścień *Mid ring, bale ring*

Sztywny, okrągły element konstrukcji, służący do zamocowania tkaniny do masztu, w centralnej części zadania o stożkowym kształcie; dzięki pierścieniowi zwiększa się długość zamocowania tkaniny, co daje bardziej równomierny rozkład naprężeń; w przypadku punktu wysokiego powinien być nakryty, aby zabezpieczyć przed opadami. Jeśli jest używany w punkcie niskim, może być stosowany do zbierania wody deszczowej lub śniegu.

Płat *Panel, field*

Określenie używane w konstrukcjach membranowych, dotyczy pojedynczego fragmentu powłoki wykonanej z połączonych brytów; zwykle stanowi osobną część, ograniczoną sztywnymi elementami podporowymi lub wiotkimi ciągnami.

Płowienie *Bleaching*

Blaknięcie, zmniejszenie intensywności barwy tkaniny lub jej pokrycia, spowodowane przede wszystkim działaniem promieniowania ultrafioletowego.

Płótno *Canvas, cloth*

Tkanina o najprostszym splocie 1×1.

Płyta mocująca
Membrane plate, boss plate, gusset plate

Metalowa płyta o zaokrąglonym brzegu służąca do mocowania narożnika membrany do podpory lub do liny.

Poduszka *Cushion*

Element wielowarstwowej powłoki pneumatycznej, zwykle używany w strukturach z folii ETFE.

Pokrycie *Coating*

1) Zewnętrzna warstwa nakładana na powierzchnię materiału w celu ochrony lub dekoracji. W przypadku tkaniny jest to materiał stosowany dla zwiększenia wodoszczelności i ochrony przędzy przed promieniowaniem UV. Patrz *tkanina powlekana*.

2) Materiał stosowany jako wypełnienie konstrukcji dachowej, np. sieci linowej.

3) W przypadku przestrzeni, raczej powinno być stosowane słowo przekrycie.

Pokrycie górne *Top coat*

Patrz *tkanina powlekana*.

Pokrycie niskoemisyjne
Low-emittance coating

Rodzaj wykończenia powierzchni, która mocno odbija promieniowanie długofalowe podczerwone, czyli promieniowanie cieplne, natomiast przepuszcza promieniowanie słoneczne, a szczególnie światło dzienne.

Połączenie *Connection, fitting*

Element konstrukcji służący do przeniesienia obciążeń z jednego elementu nośnego na drugi. Połączenie ciągnien może być stałe lub nastawne, które pozwala zmieniać długość i wprowadzać naprężenie wstępne przez skracanie odległości.

Poszukiwanie kształtu
Form finding, form generation

Jeden z etapów procesu projektowego, polegający na wyznaczaniu kształtu powłoki obciążonej jedynie naprężeniem wstępnym, w którym wewnętrzne siły są w równowadze.

Powierzchnia *Surface, area*

1) Forma przestrzenna definiowana geometrycznie, np. walcowa, sferyczna itp.

2) Nazwa oznaczająca pole powierzchni, wyrażone w metrach kwadratowych.

Powierzchnia minimalna *Minimal surface*

Przestrzenna forma geometryczna mająca najmniejsze pole powierzchni przy określonych elementach brzegowych; ściśle jest definiowana, jako powierzchnia o zerowej średniej krzywiznie.

Powierzchnia rozwijalna
Developable surface

Powierzchnia, która ma krzywiznę Gaussa równą zero, czyli można ją wyprostować lub

rozwinąć bez konieczności cięcia lub łączenia, nie powinna występować w strukturach membranowych ze względu na gorsze właściwości konstrukcyjne.

Powierzchnia stałych naprężeń

Constant stress surface

Powierzchnia, w której główne naprężenia są równomierne we wszystkich punktach. Przykładem takiej powierzchni są powierzchnie minimalne.

Powierzchnia wielowarstwowa

Multiple layer surface

W celu poprawy mikroklimatu stosowane są konstrukcje z powłokami dwu- lub trzywarstwowymi. Przestrzeń między warstwami może być pusta, wypełniona izolacją lub sprężonym powietrzem.

Powlekanie

Coating

Patrz *tkanina powlekana*.

Powłoka

Shell, coating

- 1) Powierzchniowy system konstrukcyjny, np. sklepienie, kopuła, membrana itp.
- 2) Warstwa wierzchnia elementu, np. powłoka ochronna, lakierowana itp.

Powłoka ochronna

Protective film

Zewnętrzna warstwa nakładana podczas produkcji tkaniny technicznej dla zapewnienia lepszych właściwości, np. samoczyszczących.

Preconstraint

Precontract

Opatentowana technika produkcji tkaniny poliesterowej pokrytej PCW polegająca na wstępnym naprężeniu włókien wątku podczas procesu powlekania, powoduje to zmniejszenie tendencji do fałdowania powłoki.

Pręt ściskany

Strut

Patrz *rozpora*.

Promień krzywizny

Radius of curvature

Promień okręgu stycznego do krzywej w danym punkcie leżący w tej samej płaszczyźnie co krzywa. W przypadku promienia krzywizny powierzchni to promień okręgu stycznego do powierzchni, leżącego w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni w tym punkcie – odwrotność krzywizny.

Przeciążenie

Over-stress

Stan konstrukcji, w którym naprężenia są większe niż projektowane dla stanu długotrwałego; stosowane jest w celu zmniejszenia relaksacji tkaniny, czyli aby w przyszłości materiał mniej się wydłużał.

Przekrycie

Canopy

Termin stosowany w budownictwie, ogólnie oznaczający konstrukcję osłaniającą obszar przestrzeni zamkniętej lub otwartej; częściej stosowany do zadaszeń otwartych.

Przepuszczalność światła

Light transmission

Patrz *przezroczystość*.

Przezroczystość

Translucence, transparency

Zdolność materiału do przewodzenia światła, wyrażona stopniem ilości światła przechodzącego na drugą stronę do ilości światła padającego na powierzchnię, wyrażona jest w procentach.

Przędza

Yarn

Termin włókienniczy oznaczający materiał, z którego produkowane są tkaniny lub taśmy, który powstaje z połączenia lub skręcenia od kilku do kilkudziesięciu naturalnych lub sztucznych włókien.

Przyleganie pokrycia

Coating adhesion

Wytrzymałość połączenia pomiędzy tkaniną bazową a jej pokryciem np. PCW; wpływa na wytrzymałość połączeń brytów.

PTFE

PTFE

Politetrafluoroetylen to materiał używany do pokrywania tkaniny z włókien szklanych o wysokiej wytrzymałości. Popularnie używana jest też firmowa nawa teflon. Pokrycie z obu stron PTFE powoduje dużą trwałość chemiczną, większą niż 30 lat, ma właściwości samoczyszczące.

Punkt węzłowy

Node points

W analizie obliczeniowej membrana przedstawiana jest w formie teoretycznej sieci węzłów i najczęściej trójkątnych pól między nimi. Wynikiem obliczeń zwykle jest macierz punktów o wyznaczonych współrzędnych i wielkościach sił w nich występujących.

Punkt wysoki *High point*

Powszechnie stosowany termin dla określenia miejsca zamocowania membrany, może znajdować się w środkowej części (formy stożkowe) lub przy krawędzi brzegowej; jest to miejsce podparcia lub podwieszenia membrany; przeciwieństwem jest punkt niski, czyli miejsce, gdzie membrana jest naciągana w dół.

PCW, polichlorek winylu *PVC, Polyvinyl chloride*

Ogólna nazwa tkaniny technicznej wykonanej z włókien poliestrowych z obustronnym pokryciem PCW dla zabezpieczenia przed promieniowaniem słonecznym.

PVDF, polifluorek winylidenu *PVDF*

Polimer fluorowy o wysokim stopniu krystalizacji, ma dobre właściwości mechaniczne i znakomitą odporność chemiczną, stosowany jako warstwa zewnętrzna.

Reakcja *Reaction*

Siła działająca w podporze, np. fundamentach, równoważąca obciążenia konstrukcji. W konstrukcjach membranowych często jest to siła wymagająca odpowiedniego zakotwienia, a nie podparcia jak w innych rodzajach konstrukcji.

Relaksacja *Relaxation*

Powolne samoczynne ustępowanie naprężeń w obciążonym materiale, wynika z jego właściwości; wiąże się z wydłużeniem tkaniny i koniecznością ponownego naprężania.

Relaksacja dynamiczna *Dynamic Relaxation*

Patrz *metoda dynamicznej relaksacji*.

Remizki *Grommets*

Patrz *oczka*.

Rękaw, mankiet, kieszeń ciągnowa *Sleeve, cable cuff, cable pocket*

Patrz *tunel*.

Rozciąganie *Tension, stretch*

Stan naprężenia wywołanego siłą, która wydłuża elementy konstrukcji. W przypadku konstrukcji membranowych główne elementy nośne, jak napięta powłoka oraz mocujące ją ciągną, przenoszą jedynie siły rozciągające.

Rozpiętość *Span*

Odległość pomiędzy elementami podporowymi konstrukcji.

Rozpora *Strut*

Sztywny element konstrukcji przenoszący naprężenia ściskające, zapewniający odpowiednią odległość pomiędzy odsuwanymi elementami. Może to być rodzaj słupa albo zastrzału.

Sieć *Mesh*

Termin używany w trakcie komputerowego modelowania konstrukcji dla opisanego zbioru połączonych elementów skończonych, reprezentujących powierzchnie lub inne składniki konstrukcji.

Sieć linowa *Cable net, cable mesh*

Rodzaj konstrukcji powierzchniowych utworzonych z układu cięgien. Konstrukcje sieci linowych są zazwyczaj pokryte sztywnymi materiałami. Sieci ortogonalne pod wpływem naprężenia przyjmują podobne formy do membrany z gęstym układem nitki osnowy i wątku.

Silikon/szkło *Silicon/Glass*

Tkanina z włókien szklanych pokryta silikonem, rzadziej stosowana, choć wykazuje największą przepuszczalność światła.

Siodło *Saddle*

Popularne określenie formy powierzchni zbliżonej do paraboloidy hiperbolicznej. Ma przeciwną krzywiznę, a kształtem przypomina siodło.

Skos *Bias*

Kierunek nachylony pod kątem 45° do kierunku włókien przędzy i osnowy w tkaninie. Obciążenia w tym kierunku powodują znaczne zniekształcenie tkaniny.

Słup *Mast*

Prosty element konstrukcyjny służy do podtrzymania membrany lub cięgien; w konstrukcjach membranowych jest to jeden z niewielu elementów przenoszących siły ściskające i zapewniających odpowiednią wysokość.

Słup wiszący *Flying mast*

Element konstrukcji nośnej obciążony siłami ściskającymi, który zamiast opierać się o ziemię, podtrzymywany jest przez ciągną.

Skrętka Patrz <i>splotka</i> .	Strand	po tej samej stronie powierzchni, występuje w konstrukcjach pneumatycznych.
Spawanie wysoką częstotliwością <i>High frequency welding</i> Patrz <i>zgrzewanie</i> .		Szablon Patrz <i>wykrój</i> .
Splot Sposób skrzyżowania nitek osnowy z nitkami wątku w tkaninie, wpływa nie tylko wizualnie na właściwości materiału; w tkaninach technicznych stosowane są sploty: płócienny, panama i twill.	Weave	Szczelność Właściwość materiału określająca jak duży słup wody, powodujący wzrost ciśnienia, powoduje przesiąkanie na drugą stronę przez tkaninę.
Splot koszowy Patrz <i>panama</i> .	Basket weave	Szekla Metalowa klamra, mająca kształt podkowy spłaszczonej na końcach, zamykana jest gwintowanym sworzniem, służy do szybkiego łączenia lin.
Splotka Część liny lub linka wykonana ze skręconych spiralnie drutów; ma minimum 6 drutów owiniętych dookoła drutu środkowego; charakteryzuje się dużą sztywnością i małą elastycznością.	Strand	Szew Miejsce połączenia elementów z tkaniny wzdłuż określonej linii, uzyskiwany jest przez przekłucie materiału i przeplatanie dodatkowej nitki; termin ten używany jest dla połączeń zgrzewanych lub klejonych.
Spłaszczanie Proces przekształcania powierzchni przestrzennej, nierozwijalnej, do kształtu płaskiego; wymaga częściowej deformacji i podziału na osobne elementy stosowany podczas generacji wykrojów.	Flattening	Szycie Sposób łączenia tkaniny, używany jedynie do małych zadaszeń.
Struna Patrz <i>splotka</i>	Strand	Sznur brzegowy Patrz <i>keder</i> .
Stopień wygięcia Wielkość wyrażająca stosunek wygięcia ciężna brzegowego od długości jego ciężniwy wyrażona w procentach.	Sag percentage	Sznurowanie Jeden z prostszych sposobów łączenia tkaniny przez wykorzystanie pętli ze sznura oraz odpowiednio zabezpieczonych otworów; stosowane jest tymczasowo, np. w halach namiotowych lub plandekach samochodowych.
Stożek Popularna nazwa określająca jedną z najczęściej stosowanych form zadaszeń membranych; chociaż termin nawiązuje do formy geometrycznej, to w ścisłym znaczeniu nie jest stożkiem euklidesowym.	Cone/Conic	Śruba rzymska Przyrząd służący do regulowania długości i napinania ciężna, wykorzystuje dwa przeciwne gwinty; często ukryty jest wewnątrz podwójnie gwintowanej tulei.
Surówka Tkanina wykonana z przędzy bez dodatkowych warstw ochronnych, nazywana też tkaniną bazową.	Greige goods, base fabric	Taśma brzegowa Płaska tkana taśma, używana do wzmocnienia konstrukcji z tkaniny; zwykle wykorzystywana zamiast stalowych lin brzegowych w konstrukcjach o małych wymiarach lub składanych, tymczasowych dachach.
Synklastyczna Powierzchnia mająca dodatnią krzywiznę Gaussa, w której oba promienie krzywizny są	Synclastic	Tkanie Proces wykonywania tkaniny z przędzy przez przeplatanie nitek.
		Pattern
		Tightness
		Shackle
		Seam
		Sewing
		Keder
		Lacing
		Turnbuckle
		Belt, webbing
		Weaving

Tkane *Woven*

Patrz *tkanie*.

Tkanina *Fabric, textile, cloth*

Materiał wykonany z włókien w procesie przeplatania nitek osnowy z nitkami wątku, zwykle zorientowanymi prostopadle; w zależności od sposobu przeplatania tworzy się charakterystyczny wzór nazywany splotem.

Tekstylny *Textile*

Patrz *tkanina*.

Tkanina bazowa *Base fabric*

Patrz *surówka*.

Tkanina powlekana *Coated textile*

Większość materiałów używanych do konstrukcji membranowych to tkaniny powlekane, złożone z tkaniny bazowej i warstw pokrycia. Tkaniny poliestrowe są zwykle pokrywane PCW, a szklane pokrywane są PTFE.

Trwałość *Life expectancy, durability*

Okres, w którym obiekt zachowuje swoje właściwości użytkowe.

Tunel cięgowy *Catenary pocket*

Zakończenie brzegu membrany uzyskane przez podwinięcie materiału, przeznaczone jest dla ciężna umieszczonego wzdłuż jego krawędzi; wielkość powinna pozwolić na przeciągnięcie liny wraz z końcowym okuciem; pod wpływem obciążeń przyjmuje kształt linii łańcuchowej, ale musi być wcześniej przewidziany na etapie przygotowania wykrojów.

Układ wzorców cięcia *Cutting pattern layout*

Układ szwów tkaniny występujący w powierzchni połaci dachowej. Najczęściej stosowane układy to równoległy i promienisty.

Układ promienisty brytów *Radial pattern layout*

Jeden z najczęściej stosowanych podziałów na bryty w konstrukcjach błonowych, występuje w formach stożkowych. Bryty mają kształt klinów.

Układ równoległy brytów *Parallel pattern layout*

Często używanych podział na bryty w konstrukcjach błonowych, chociaż szwy wewnątrz

powłoki nie są dokładnie równoległe, ale są bardziej zbliżone do pasów niż do klinów.

Uszczegóławianie *Detailing*

Proces projektowania połączeń i detali regulujących, a także wzmocnień powłoki z tkaniny.

Wątek *Weft, fill*

Krótsza przędza w tkaninie, która biegnie prostopadle do nitek osnowy. Nazywana też jest przędzą wypełniającą, stąd amerykańska nazwa *fill*.

Widelki *Clevis*

Sposób zakończenia ciężna stosowany w połączeniu sworzniowym.

Włókno *Fiber*

Najmniejszy składnik, z którego wykonywana jest przędza, a następnie z przędzy wytwarzana jest tkanina. Włókna mogą być naturalne, np. z bawełny lub tworzyw sztucznych.

Włókno szklane *Glass thread*

Włókno sztuczne uzyskiwane ze szkła o grubości kilku mikrometrów, stosowane do produkcji tkaniny technicznej; ma stosunkowo dużą wytrzymałość na rozciąganie, ale jest kruche i mało odporne na promieniowanie UV.

Włókna szklane pokryte PTFE *PTFE/Glass*

Popularna nazwa tkaniny wykonanej z włókien szklanych, pokrytej PTFE (politetrafluoroetylenem). Stosowana przede wszystkim do stałych konstrukcji membranowych, wymagających dużej trwałości, nie nadaje się na konstrukcje tymczasowe ze względu na dużą sztywność.

Włókna poliestrowe pokryte PCW *PVC/Polyester*

Popularna nazwa tkaniny, wykonanej z włókien poliestrowych, pokrytej PCW (polichlorkiem winylu); najczęściej stosowana w konstrukcjach membranowych ze względu na niższe koszty i dużą elastyczność; dla zwiększenia odporności na zabrudzenia dodatkowo pokrywana jest warstwami ochronnymi.

Wskaźnik naprężeń pierwotnych *Prestress ratio*

Stosunek wartości naprężeń w tkaninie w kierunku osnowy do naprężeń w kierunku wątku, wynikających jedynie z naprężenia wstępnego, bez obciążeń zewnętrznych.

Wskaźnik naprężeń osnowa-wątek
Warp/weft stress ratio

Stosunek wielkości naprężeń w kierunku osnowy i kierunku włókien wątku w napiętych powłokach z tkaniny.

Worek wodny, śniegowy *Ponding*
Patrz *zastój*.

Wybielanie *Bleaching*
Patrz *plowienie*.

Wydłużenie *Elongation*
Zmiana długości materiału wynikająca z obciążenia siłą działającą na dany element. W tkaninie wydłużenie nie tylko wynika z napięcia włókna, jak w innych rodzajach konstrukcji, ale częściowo z wyprostowania przędzy pofałdowanej w splocie tkaniny

Wykończenie górne *Top finish*
Dodatkowe pokrycie tkaniny używane dla zwiększenia ochrony przed promieniowaniem UV lub łatwego zmywania, a nawet samoczyszczenia.

Wykrój *Cutting pattern*
Forma, według której wycinana jest tkanina dla uzyskania brytu; kształt powstaje w procesie podziału powierzchni na płaskie elementy.

Wytrzymałość na zerwanie
Tensile breaking strength

Dla tkaniny określone są wartości na podstawie badań pasa tkaniny w tzw. teście jednokierunkowym lub dwukierunkowym, kiedy sprawdzane są jednocześnie naprężone nitki osnowy i wątku.

Wytrzymałość na rozdarcie *Tear strength*
Wartość charakterystyczna dla tkaniny, określana na podstawie badań naciętego pasa materiału w teście jednokierunkowym.

Wzmocnienie *Reinforcement*
Dodatkowa warstwa materiału umieszczona na powierzchni membrany dla ochrony przed rozerwaniem lub przedarciem.

Wzorcowanie *Patterning*
Proces, w którym wyznaczane są wykroje do cięcia tkaniny. Patrz *wykrój*.

Wzorzec cięcia *Cutting pattern*
Patrz *wykrój*.

Wzór geodezyjny *Geodesic pattern*
Układ linii szwów, w którym wykroje powstały na podstawie podziału powierzchni liniami geodezyjnymi.

Zacisk, obejma *Swage, clamp*
Rodzaj zakończenia liny, w którym dopasowana tuleja jest nałożona i ściśnięta tworząc końcową pętlę.

Zacisk linowy *Wire rope clip*
Przyrząd służący do ściśnięcia lin i utworzenia pętli końcowej dzięki nagwintowanemu wygiętemu prętowi, kabłąkowi, obejmującemu podwójną linę.

Zacisk tkaninowy *Fabric clamp*
Sposób zamocowania krawędzi tkaniny w formie prostej lub profilowanej listwy wykonanej ze stali lub aluminium i przykręconej do konstrukcji.

Zadaszenie *Canopy*
Przegroda budowlana pozioma lub pochyła, osłaniająca od góry przestrzeń zamkniętą lub obszar przestrzeni otwartej.

Zakończenie *End termination*
Sposób kształtowania końca liny, najczęściej tworząc pętlę lub stosując dołączone kształtki. Zaprojektowane tak, aby stale łączyły linę do pozostałych elementów konstrukcji, np. masztu lub kotwy.

Zakotwienie tulejowe *Spelter, poured zinc*

Sposób zakończenia liny, w którym wiązka drutów lub lina jest rozpleciona wewnątrz stożkowej tulei i zalana ciekłym cynkiem dla zabezpieczenia cięgna przed wyrwaniem.

Zakuwka *Swage*
Patrz *zacisk*.

Zamocowanie *Fitting, socket, cable fitting*
Sposób zakończenia cięgna, pozwalający na połączenie z innymi elementami konstrukcji; może być typu pętla, tuleja lub zacisk.

Zastój *Ponding*
Niekorzystny stan, w którym obciążenie od śniegu lub deszczu powoduje lokalne obniżenie powłoki. Może być początkiem niebezpiecznego procesu kończącego się zniszczeniem membrany.

Zawinięcie brzegowe *Roll goods*

Sposób wykończenia tkaniny, w którym pas materiału jest podwinięty i połączony. Dla zwiększenia wytrzymałości może być wzmocniony dodatkowym sznurem lub taśmą.

Zeroklastyczna *Zeroclastic*

Powierzchnia o zerowej krzywiznie Gaussa to powierzchnia rozwijalna; forma przestrzenna, którą można otrzymać przez wyginanie płaskiego arkusza, bez konieczności nacinania i łączenia, przykładem może być powierzchnia walcowa lub stożkowa.

Zgrzewanie *Welding*

Sposób łączenia materiału przez docisk rozgrzanych do wysokiej temperatury części. W języku angielskim słowo *welding* oznacza również spawanie, co często powoduje mylne tłumaczenie.

Zgrzewanie gorącym powietrzem
Hot air welding

Prosty rodzaj łączenia, który może być wykonywany w miejscu montażu lub naprawy

uszkodzonej tkaniny poliestrowej pokrytej PCW.

Zgrzewanie wysoką częstotliwością
High frequency welding

Często stosowany rodzaj łączenia tkaniny przez wykorzystanie prądu wysokiej częstotliwości przy wytwarzaniu konstrukcji z tkaniny poliestrowej pokrytej PCW.

Zgrzewanie termiczne *Thermic welding*

Najczęściej stosowany rodzaj łączenia, wykonywany przy wytwarzaniu konstrukcji z tkaniny szklanej pokrytej PTFE oraz konstrukcji z folii ETFE.

Zszywanie *Stitching*

Sposób łączenia tkaniny przez przeplatanie nitki; wielokrotne przekłuwanie materiału powoduje zmniejszenie szczelności w rejonie połączenia.

Zwis *Sag*

Największa pionowa odległość pomiędzy ciężnem a linią łączącą punkty zamocowania; mierzony jest w połowie rozpiętości.

ZADASZENIA MEMBRANOWE W POLSCE – SWOBODA KSZTAŁTOWANIA

Streszczenie

Przedmiotem monografii są zagadnienia związane z projektowaniem architektonicznym dotyczącym formowania napiętej tkaniny w zadaszeniach membranowych. Membrany są rzadziej stosowanym materiałem budowlanym, choć mają wiele korzystnych cech. Przede wszystkim, za pomocą odpowiednio uformowanej powłoki, można przekryć dużo większą powierzchnię, uzyskując lekkie rozwiązanie konstrukcyjne. Innym atutem tkaniny technicznej jest częściowe przepuszczanie światła i odbijanie promieni słonecznych. Wydaje się, że powłoki z tkaniny są elastyczne i mogą przyjmować dowolny kształt. Natomiast ograniczenia wynikające z potrzeby właściwego pochylenia i odpowiedniej krzywizny powodują, że architekt od samego początku powinien współpracować z konstruktorem obsługującym program komputerowy przeznaczony do modelowania napiętej membrany. Kształt membrany wynika z sił wewnętrznych, które utrzymują ją w ciągłym napięciu.

Głównym celem autora jest przedstawienie jak realizowane są zasady formowania samej membrany w naszej strefie klimatycznej. Poza ochroną przed promieniowaniem słonecznym zadaszenia membranowe zabezpieczają przed opadami atmosferycznymi. W związku z tym narażone są na obciążenie od wiatru i deszczu, a w okresie zimy – śniegu. Projektując stałe elementy budynku, należy nie tylko nadać im atrakcyjną formę, ale trzeba przewidzieć właściwe odprowadzanie wody deszczowej i możliwość odśnieżania. To architekt podejmuje decyzję o wyborze kształtu napiętej membrany w koncepcji architektonicznej i dlatego potrzebuje odpowiednich narzędzi.

Bazą publikacji jest przegląd zagadnień związanych z projektowaniem architektonicznym struktur membranowych, w tym historyczny rozwój stosowania ich w architekturze. Główną część stanowią wyniki szczegółowych badań obiektów, które zostały zrealizowane na terenie Polski. Dzięki temu możliwe było zabranie kompletu dokumentacji i autorska ocena na miejscu wraz ze szczegółową dokumentacją fotograficzną. Analiza prawie 40 przykładów o różnej wielkości i przeznaczeniu pozwoliła porównać: lokalizacje, przyczyny powstania, formy, układy konstrukcyjne i wielkości poszczególnych zadaszeń.

Wynikiem tych badań jest opracowanie klasyfikacji form membran występujących w zadaszeniach. Ważną część stanowi przygotowanie planów warstwicznych większości membran. Dzięki temu przedstawione zostały charakterystyczne cechy geometryczne powłok występujących w zadaszeniach. Jest to nie tylko zestawienie analizowanych przykładów, ale także rodzaj narzędzia, a nawet metody, którą można wykorzystać w projektowaniu architektonicznym. Poza tym zostały określone sposoby mocowania membran do elementów podporowych oraz wpływ ukształtowania powłoki na prawidłowe odprowadzanie wody i zabezpieczenie przed śniegiem. Kolejnym autorskim elementem badań jest określenie wpływu zadaszenia membranowego na mikroklimat przestrzeni znajdującej się pod zadaszeniem.

Efektom końcowym monografii jest zestaw narzędzi – kryteriów ułatwiających architektowi podjęcie decyzji o wyborze właściwej formy.

MEMBRANE CANOPIES IN POLAND – FREEDOM OF FORMING

Abstract

The subject of the publication is issues related to architectural design regarding the formation of taut fabric in membrane roofs. Membrane is less frequently used as construction material, although it has numerous advantageous features. First of all, suitably formed coating provides covering of substantially larger area, which is a light structural solution. Another advantage of the technical fabric is partial transmission of light and reflection of sunlight. It seems that the fabric coatings are flexible and can take any shape. However, the limitations resulting from the need for proper inclination and proper curvature cause that the architect should work from the beginning with a structural engineer operating a computer program for modelling a tense diaphragm. The shape of the membrane results from internal forces that keep it in continuous tension.

The author's main goal is to show how the principles of forming the membrane are implemented in our climate zone. In addition to protection against solar radiation, membrane roofs protect against atmospheric precipitation. As a result, they are exposed to wind and rain loads, and snow in the winter. When designing permanent building elements, you should not only give them an attractive form, but you need to anticipate proper drainage of rainwater and the possibility of snow removal. It is the architect who decides to choose the shape of a tense diaphragm in the architectural concept and therefore, he needs the right tools.

The basis of the study is a review of issues related to the architectural design of membrane structures, including the historical development of their use in architecture. The main part is the results of detailed research on objects that have been implemented in Poland. Thanks to this, it was possible to put together a set of documentation and author's assessment on site, together with detailed photographic documentation. The analysis of almost 40 examples of various sizes and uses allowed to compare: locations, causes of creation, forms, construction systems and sizes of individual roofs.

The result of the research is the development of the classification of membrane forms found in canopies. An important part is the development of contour plans for most membranes. As a result, the characteristic geometric features of coatings found in canopies were presented. This is not only a summary of the analyzed examples, but a kind of tool and even a method that can be used in architectural design. In addition, there have been determined methods for attaching membranes to support elements and the effect of the coating's shape on proper water drainage and snow protection. Another proprietary element of the research is the determination of the effect of the membrane canopy on the microclimate of the space under the roof.

The final effect of the study is a set of tools – criteria that help the architect make the decision about choosing the right form.

**WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice
tel. (32) 237-13-81, faks (32) 237-15-02
www.wydawnictwopolitechniki.pl**

**Sprzedaż i Marketing
tel. (32)237-18-48
wydawnictwo_mark@polsl.pl**

Nakł. 31 + 44

Ark. wyd. 27

Ark. druk. 40,25

Papier offset 70x100,80 g

Zam. 244/18

ISBN 978-83-7880-560-1

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 5
tel.(32) 237-13-81, faks (32) 237-15-02
www.wydawnictwopolitechniki.pl
Dział Sprzedaży i Reklamy
tel.(32) 237-18-48
e-mail: wydawnictwo_mark@polsl.pl