

# Wybrane zagadnienia projektowania i realizacji konstrukcji membranowych

Dr inż. Andrzej Kowal, Politechnika Wroclawska

## 1. Wprowadzenie

Konstrukcje membranowe stosowane są na świecie już od lat 50-tych zeszłego wieku. Pionierem i największym propagatorem konstrukcji membranowych jest niemiecki architekt Otto Frei. W latach pięćdziesiątych rozpoczął sprzedaż typowego przekrycia membranowego. Do lat siedemdziesiątych zrealizował wiele bardzo ciekawych projektów. Podstawowym sposobem znajdowania kształtu i wyroju membrany było wykonanie fizycznego modelu. W latach siedemdziesiątych



**Rys. 1.** Membrana nad wejściem do kancelarii premiera w Berlinie

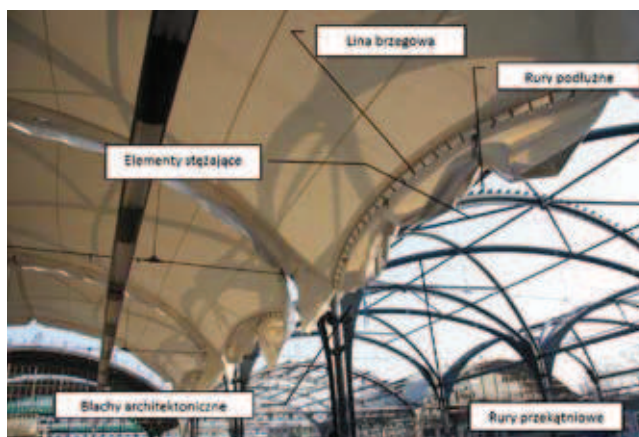
rozwój maszyn cyfrowych umożliwił analizę numeryczną tych niezwykle trudnych do analizy konstrukcji. Dziś przekrycia membranowe spotykamy niemal wszędzie: stadiony, amfiteatry, wiaty przystankowe, fasady budynków, elementy małej architektury, często także jako dachy nad wejściami reprezentacyjnych budynków (rys. 1) lub jako tanie przekrycia przestrzeni magazynowych, wykopalisk, placów budowy itp. Rozwój technologii prowokuje dalszy rozwój tych niezwykle trudnych konstrukcji. W Polsce dopiero mistrzostwa Euro 2012 spowodowały znaczące pojawienie się konstrukcji membranowych. Najbardziej spektakularnym obiektem, w którym zastosowano membranę tekstylną, jest oczywiście Stadion Narodowy w Warszawie.

## 2. Problematyka projektowania konstrukcji membranowych

Podstawowe aspekty projektowania konstrukcji membranowych przedstawiono na przykładzie projektu zadania peronów Dworca PKP we Wrocławiu. Głów-



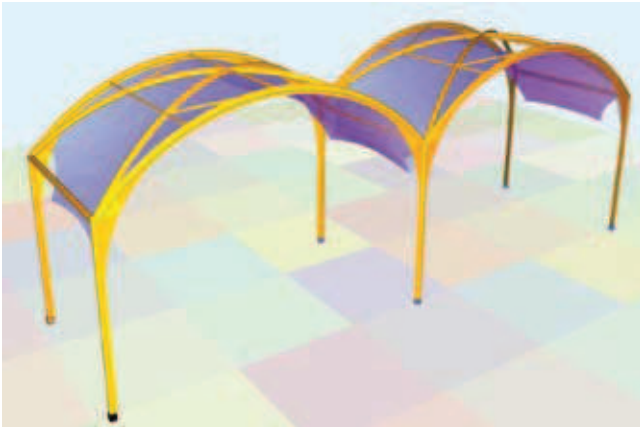
**Rys. 2.** Nowe możliwości kształtowania konstrukcji – nad widownią amfiteatru wykonano dach składany (amfiteatr w Kadzielni)



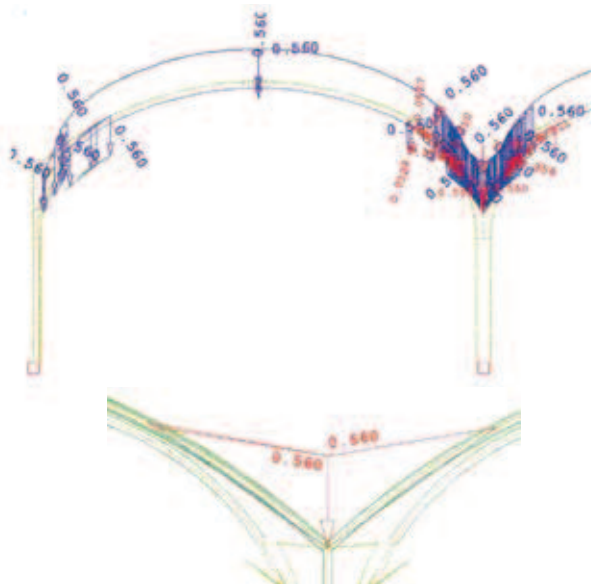
**Rys. 3.** Membranowy dach i konstrukcja stalowa nad peronami Dworca PKP we Wrocławiu w trakcie realizacji

na konstrukcja nośna przekrycia składa się z łuków podłużnych (rura  $\varnothing 355,6 \times 16$ ) sztywno mocowanych na słupach, łuków przekątniowych oraz elementów stężących, co przedstawiono poniżej na rysunkach 3 i 4. Słupy rozmieszczone są w module  $21,40 \times 11,60$  m.

Membrana mocowana jest po długości do dwóch łuków stalowych, a po szerokości do lin typu OSS (liny PG 55 Pfeifer). Napięcie wstępne formuje antyklastycz-



**Rys. 4.** Wizualizacja konstrukcji zastosowanej na Dworcu PKP we Wrocławiu po procedurze formfinding (przedstawiono tylko dwa przęsła)

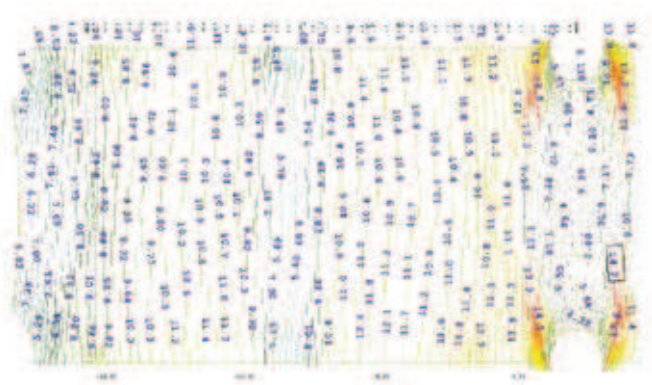


**Rys. 5.** Obciążenie równomierne śniegiem i zaspą śnieżną

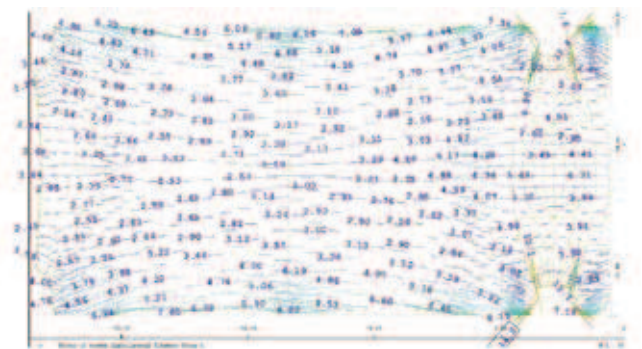
ną powierzchnię membrany, która jest zdolna przeciwstawić się obciążeniom działającym zarówno w górę jak i w dół. W części środkowej zastosowano linę, która zapobiega nadmiernym ugięciom membrany oraz tworzeniu się ewentualnych jeziorzek wodnych (z ang. ponding).

Procedurą prowadzącą do znalezienia kształtu membrany jest tzw. procedura formfinding. W trakcie tej procedury nadaje się konstrukcji membranowej i linom zerową sztywność i wymusza prognozowane siły napięcia wstępnego. W przedstawianej konstrukcji przyjęto napięcie wstępne w membranie od 4,0 do 4,5 kN/m, a w linach od 20 do 80 kN. Na rysunku 4 pokazano wizualizację konstrukcji zadaszania peronów po procedurze formfinding.

Dopiero po doborze sił napięcia wstępnego i znalezieniu kształtu konstrukcji można przyłożyć obciążenia



**Rys. 6.** Siły w membranie w kierunku prostopadłym do łuków głównych (pokazano jedno pole membrany)

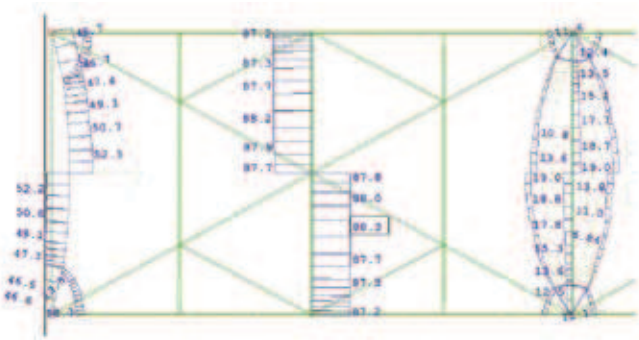


**Rys. 7.** Siły w membranie w kierunku równoległym do łuków głównych (pokazano jedno pole membrany)

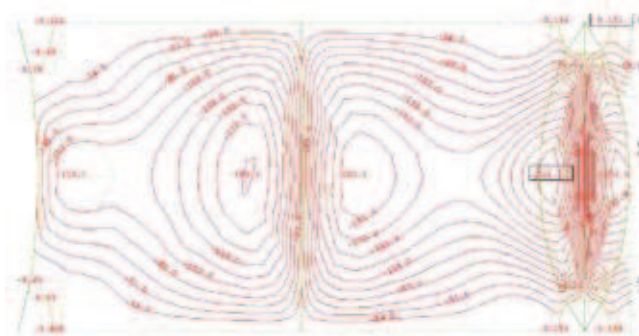
zewnątrzne, w szczególności wiatr, który należy przykładać prostopadle do powierzchni dachu. W dalszej części pracy prezentuje się wyniki analiz od wybranego przypadku obciążenia śniegiem i zaspą śnieżną (rys. 5). Na kolejnych rysunkach 6 i 7 pokazano siły błonowe ( $n_x$ ,  $n_y$ ) powstające w membranie (kierunek wektorów wskazuje kierunek siły). Siły w membranie nie przekraczają 14 kN/m. Obliczeniowa nośność membrany (z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa 5) wynosi 27 kN/m. Zatem warunek nośności spełniony jest z dużym zapasem. Siły w linach od obciążenia śniegiem nie przekraczają 90 kN (patrz rys. 8), ale większe siły generuje obciążenie wiatrem, dochodzące w linie skrajnej do wartości 160 kN.

Na rysunku 9 pokazano przemieszczenia membrany. Maksymalne ugięcie wynosi 255 mm. Rozpiętość między łukami wynosi 11,40 m, zatem ugięcie membrany jest równe około 1/44 rozpiętości. Z kolei na rysunku 10 przedstawiono poziomice wysokościowe zdeformowanej obciążeniem śniegiem membrany. Jak długo poziomice nie tworzą zamkniętego jeziorka, topiący się śnieg ma możliwość spływu do najniższego punktu. Ostatnim i niezwykle trudnym krokiem realizacji projektu membrany jest wykonanie wykroju membrany (ang.: cutting pattern). Wykroj membrany musi być wykonany tak by, membrana po montażu i kilku

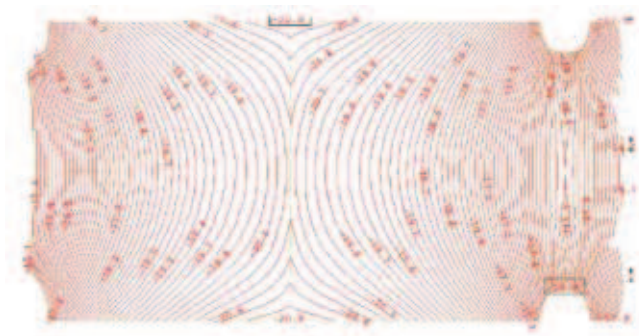




Rys. 8. Sily w linach od obciążenia śniegiem [kN]

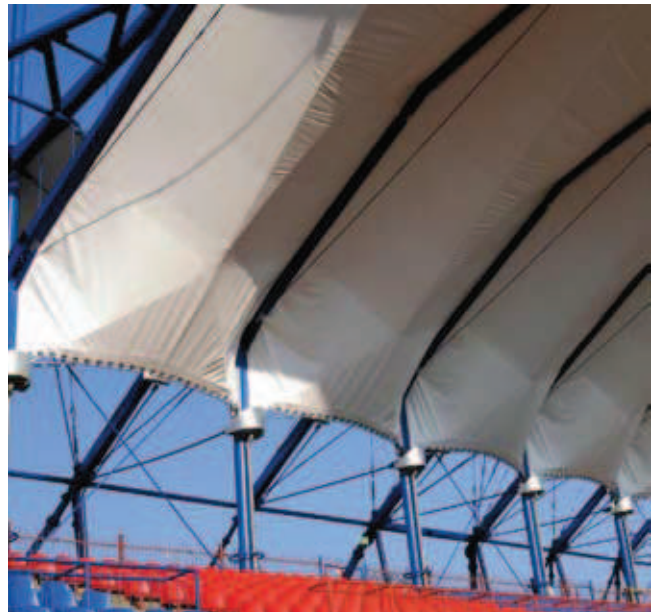


Rys. 9. Ugięcia membrany od śniegu i zaspy śnieżnej [mm]



Rys. 10. Poziomice wysokościowe obciążonej membrany. Woda ma możliwość spływu z każdego miejsca na membranie, gdyż izolacje nie tworzą zamkniętej depresji (wg opracowania autora)

cyklach obciążenia miała wciąż napięcie niezbędne do zapewnienia odpowiedniej sztywności. Membrany z tkaniny wykazują dużą zmienność właściwości mechanicznych w czasie. W trakcie pierwszych kilku cykli obciążenia i odciążenia membrana ulega znacznemu wydłużeniu (2–5%). Jest to związane ze specyfiką produkcji tkaniny. Trwałe wydłużenie membrany musi być uwzględnione w projekcie cięcia membrany, którą należy wykonać odpowiednio krótszą. Gdyby trwałe wydłużenie nie zostało uwzględnione, po pierwszym roku użytkowania obiektu, z powodu spadku napięcia,



Rys. 11. Niewłaściwie ukształtowana i wykonana konstrukcja membranowa

na membranie pojawiłyby się zmarszczki, a z czasem membrana uległaby uszkodzeniu.

### 3. Podsumowanie

Tkaniny z tworzyw sztucznych znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie. Niestety, jak do tej pory, znajomość problematyki projektowania konstrukcji membranowych w Polsce jest bardzo niska, zarówno wśród projektantów konstruktorów, architektów, wykonawców i inspektorów nadzoru. Jako przykład tego, do czego prowadzi brak wiedzy i doświadczenia w tej dziedzinie, może posłużyć membranowe zadaszanie przedstawione na rysunku 11. Obecna praktyka niektórych projektantów przerzucania obowiązku wykonania projektu na wykonawcę, już po przetargu, nie umożliwia znalezienia odpowiedniej formy konstrukcji, a także oceny sił na fundamenty i kosztów realizacji inwestycji. Często prowadzi do problemów zarówno finansowych, jak i terminowych. Inwestor powinien być wyczulony na właściwe wykonanie dokumentacji i żądać projektu, który uwzględnia przedstawione wcześniej elementy analizy statycznej. Podstawowe wymagania dotyczące dokumentacji projektowej i wykonawstwa podane są w [3].

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Otto F., Roland C., Spannweiten, Verlag Ullstein Frankfurt/M – Berlin 1965
- [2] Seidel M., Textile Hüllen, Bauen mit biegeweichen Tragelementen, Ernst&Sohn 2008
- [3] Forster B., Mollaert M., European Design Guide for Tensile Surface Structures, Tensinet 2004
- [4] Kowal A., Projekt warsztatowy membranowego zadaszania peronów Dworca PKP Wrocław