

Przekrycie trybuny stadionu na przykładzie stadionu piłkarskiego Legii w Warszawie

Stadium roof illustrated with the example of the Legia Warszawa stadium

Stadion Legii był jednym z pierwszych z serii nowych stadionów w Polsce wybudowanych przed Euro 2012. Oddano go do użytku w maju 2011 r. Stadion Klubu Legii Warszawa to nowoczesny, pięciokondygnacyjny i wielofunkcyjny obiekt sportowy. Przyjęto 4 gwiazdkową rangę obiektu, co oznacza, że stadion powinien zawierać minimum 30 tys. miejsc siedzących. Standard nowego stadionu daje możliwość organizacji rozgrywek europejskich do półfinału Ligi Mistrzów włącznie. Trybuny są w pełni zadaszone bez podpór wewnętrznych i spełniają najwyższy standard UEFA.

Ze względu na to, że dookoła obiektu rozciągają się rozległe tereny parkowe architekci zdecydowali się na filigranową konstrukcję dachu, która optycznie nadaje lekkości. Zastosowano pokrycie membranowe wsparte na wspornikowych kratownicach, co przypomina postawiane obok siebie namioty. Rozpiętość przekrycia w kierunku podłużnym wynosi 204,8 m, a w kierunku poprzecznym – 162,4 m.

Opracowano trzy koncepcje wykonania konstrukcji przekrycia. Finalnie wybrana i zrealizowana została koncepcja trzecia. Koncepcja druga została przeanalizowana w pracy dyplomowej „Projekt przekrycia trybuny stadionu piłkarskiego” [5]. W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki pracy dyplomowej na temat

koncepcji 2A oraz opis konstrukcji wykonanej na podstawie koncepcji 3.

Opis ogólny konstrukcji

Koncepcja aktualna na dzień rozpoczęcia pisanie pracy dyplomowej [5] zakładała zadaszenie składające się z dwudziestu niezależnych powtarzalnych segmentów i czterech segmentów narożnych. Segmenty to konstrukcje wspornikowe prętowe, ramowe, oparte i zakotwiona w żelbetowej koronie trybun. Niestety konstrukcja prętowa przedstawiona w koncepcji nie była w stanie przenieść działających obciążeń przy takich roz-

piętościach. W pracy zaproponowano zastosowanie dodatkowych kratownic – dwóch układów kratowych podłużnych i trzech poprzecznych.

Konstrukcję zaprojektowano z profili rurowych okrągłych ze stali konstrukcyjnej St3S. Połączenia prętów – spawane głównie spoinami czołowymi. W węzłach bardziej rozbudowanych zastosowano blachy węzłowe. Segmenty posadowione są na żelbetowej konstrukcji trybuny za pośrednictwem słupów. Konstrukcja ma wymiary rzutu 38 x 21 m i prawie 10 m wysokości. Należy ją podzielić na elementy wysyłkowe o gabarytach

STRESZCZENIE:

Przedmiotem artykułu jest konstrukcja stalowego zadaszenia stadionu Legii Warszawa pokrytego membraną. Wykonano 3 wstępne koncepcje stadionu. Jedną z tych koncepcji była przedmiotem pracy dyplomowej, w której zaprojektowano i przeanalizowano pracę układu prętowego podtrzymującego membranowe pokrycie. Koncepcja ta była koncepcją aktualną w trakcie pisania pracy. Ostatecznie wycofano się z jej realizacji i opracowano kolejną koncepcję, która została zrealizowana i którą również opisano. Jest to przekrycie składające się z szeregu wspornikowych kratownic pokrytych tkaniną techniczną. Na końcu dokonano krótkiego porównania obydwu koncepcji.

SŁOWA KLUCZOWE:

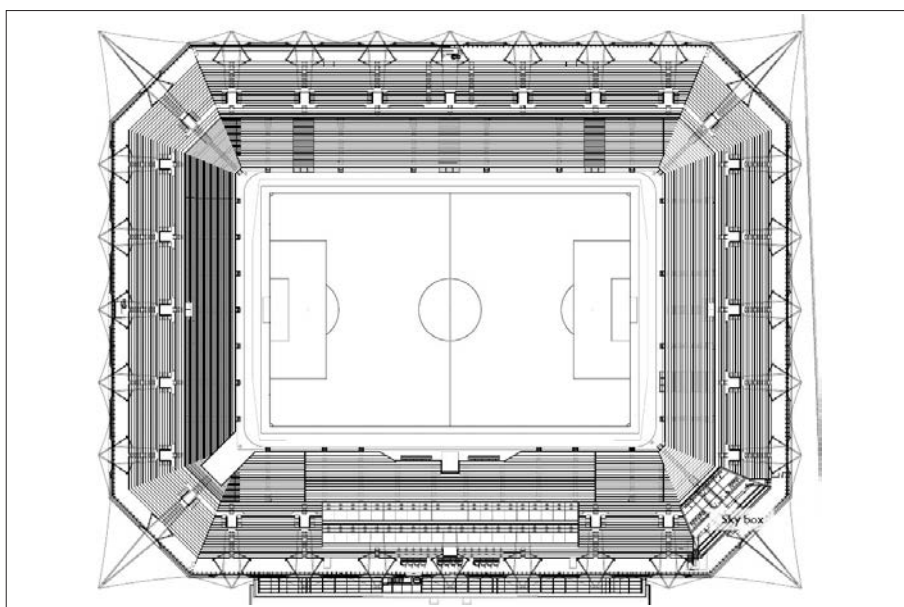
zadaszenie stadionu, stadion Legii Warszawa, przekrycie membranowe, konstrukcja prętowa przestrzenna

SUMMARY:

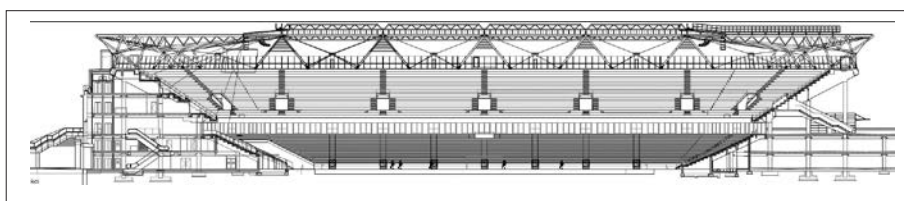
The article presents the steel roof structure of the Legia Warszawa stadium covered with membrane. Three initial concepts of the stadium had been developed. One of them had been the subject of a dissertation in which a truss system supporting a membrane roof had been designed and its functioning had been analysed. That concept had been valid at the time when the dissertation had been written. However it had been abandoned, and another concept was developed, which was completed and described in the article. It is a roof comprising of numerous supportive trusses covered with technical fabric. A short comparison of both concepts have been also presented in the article.

KEYWORDS:

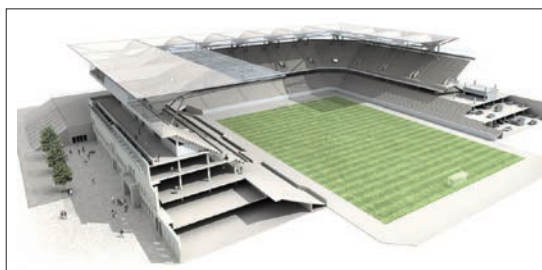
stadium's roof, Legia Warszawa stadium, membrane roof, space truss structures



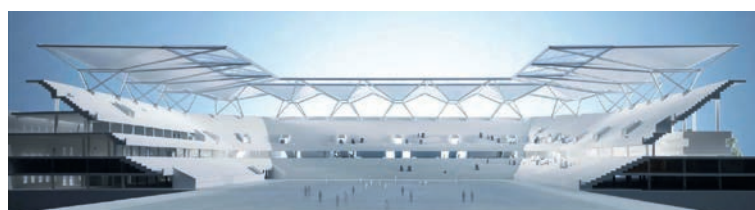
Rys. 1. Rzut trybun stadionu [2]



Rys. 2. Przekrój przez stadion [2]



Rys. 4. Wizualizacja przekrycia stadionu [6]



Rys. 3. Koncepcje przekrycia stadionu [1]

umożliwiających transport. Elementy wysyłkowe zostaną zespane na placu budowy. Następnie gotowe segmenty będą podniesione i umieszczone w miejscu wbudowania za pomocą dwóch dźwigów. Przeanalizowano dwa warianty mocowania pokrycia:

- Wariant 1 – pokrycie mocowane do dolnej części konstrukcji. Wariant zbliżony do koncepcji architektonicznej, wymagający jednak dobrego uszczelnienia przejść elementów konstrukcyjnych przez pokrycie.
- Wariant 2 – pokrycie mocowane w górnej części konstrukcji. Rozwiązanie znacznie odbiegające od koncepcji architektonicznej, ale pozbawione problemu uszczelnienia przejść

elementów konstrukcyjnych przez pokrycie, co ma miejsce w wariantcie 1.

Obliczenia, wybrane wyniki dla wariantu 1

Konstrukcję w obu wariantach zamodelowano w programie komputerowym jako kratownicę przestrzenną. Dla takiego modelu wykonano kombinacje obciążeń dla stanu granicznego nośności i stanu granicznego użytkowania.

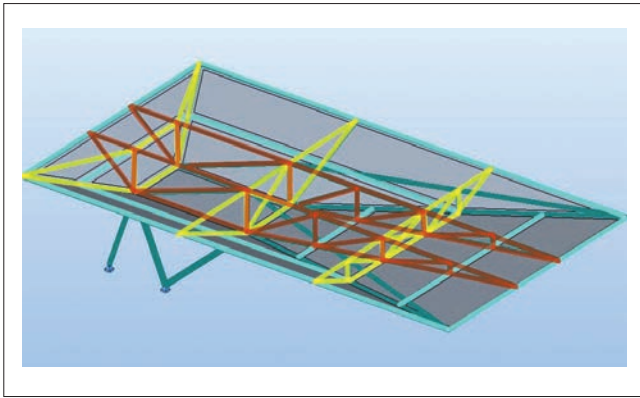
W wyniku obliczeń otrzymano wartości maksymalnych sił osiowych. Dla wariantu 1 maksymalna siła ściskająca występuje w słupie ściskającym i wynosi 3569,6 kN. Maksymalna siła rozciągająca występuje w słupie rozciągającym i wynosi 3562,9 kN.

Obliczenia, wybrane wyniki dla wariantu 2

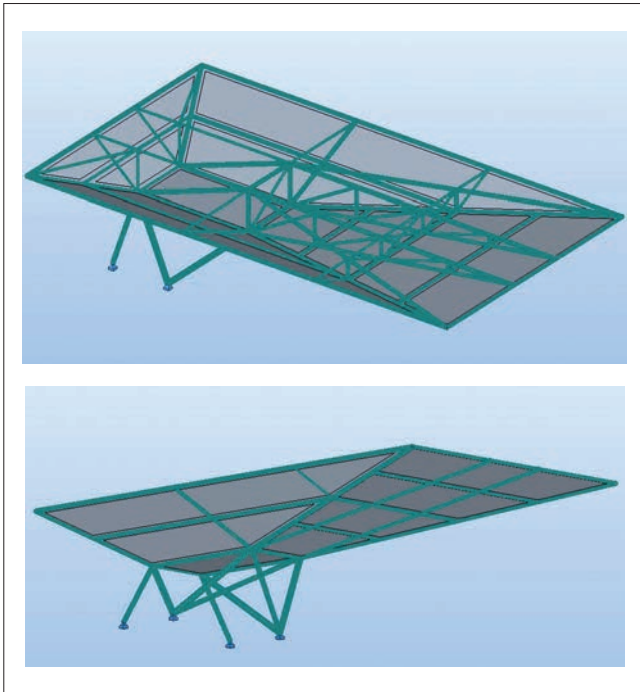
W wyniku obliczeń otrzymano wartości maksymalnych sił osiowych. Dla wariantu 2 maksymalna siła ściskająca występuje w słupie ściskającym i wynosi 2837,4 kN. Maksymalna siła rozciągająca występuje w słupie rozciągającym i wynosi 2455,8 kN.

Wybrany wariant

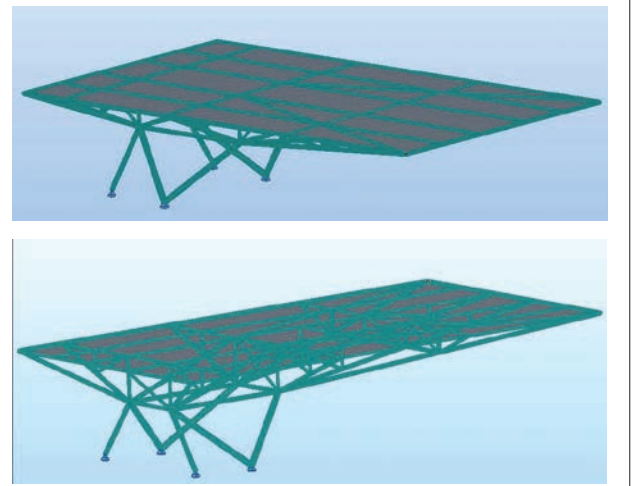
Mniejsze siły wewnętrzne oraz przemieszczenia uzyskano dla wariantu 2. Wynika to z bardziej korzystnej geometrii dachu w tym wariantcie. Pręty słupów podpierających przekrycie wykonano z rur okrągłych 457 x 20 mm, słupy rozciągane 355,6 x 20 mm, pozostałe pręty – z rur o średnicach od 193,



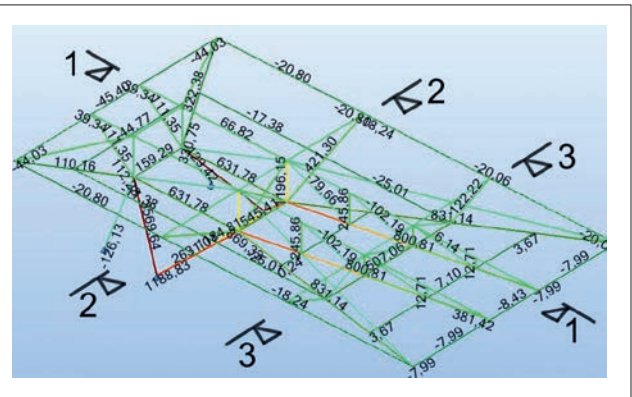
Rys. 5. Konstrukcja nośna pojedynczego segmentu



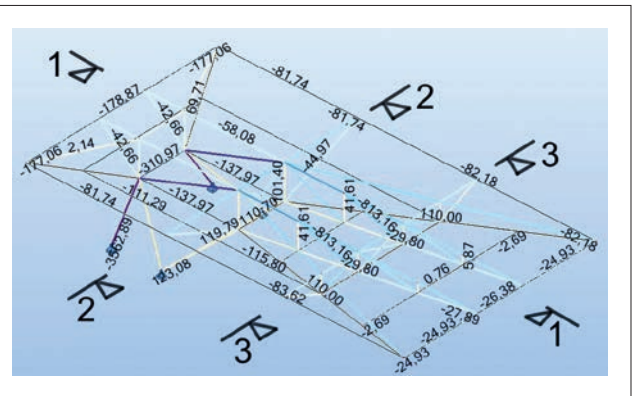
Rys. 6. Pokrycie – wariant 1



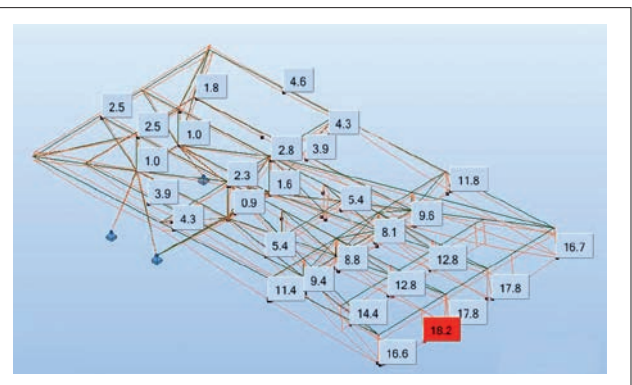
Rys. 7. Pokrycie – wariant 2



Rys. 8. Wartości maksymalnych sił ściskających dla wariantu 1



Rys. 9. Wartości maksymalnych sił rozciągających dla wariantu 1

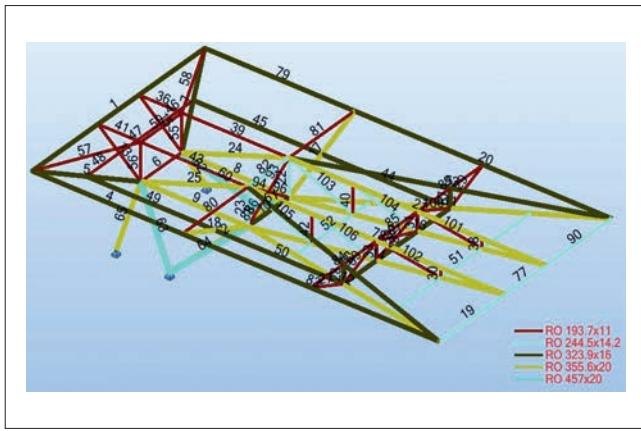


Rys. 10. Maksymalne przemieszczenia konstrukcji w cm wariantu 1

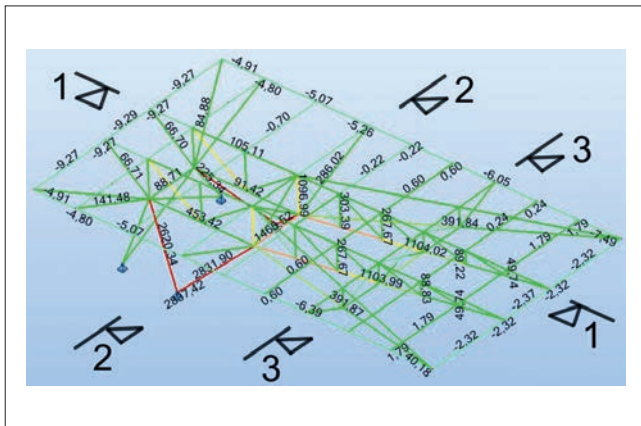
7 x 7,1 mm do 355,6 x 28 mm. Podstawy słupów prostopadłe do osi słupów będą osadzone w gniazdach ukształtowanych w konstrukcji żelbetowej. W przypadku słupa rozciąganego zastosowano kotwy płytkowe o średnicy 36 mm, dla słupa ściskanego – kotwy o średnicy 20 mm. Masa stali potrzebnej na wykonanie takiego zadania wyniosła ok. 2600-2700 ton. Masa stali potrzebna na same pręty kratownicy wyniosła 2300 ton, należy do tego doliczyć stal płatwi pod poliwęglan, odlewów stalowych zakończeń węzłów kratownic, lin i cięgien membran.

Opis ogólny konstrukcji

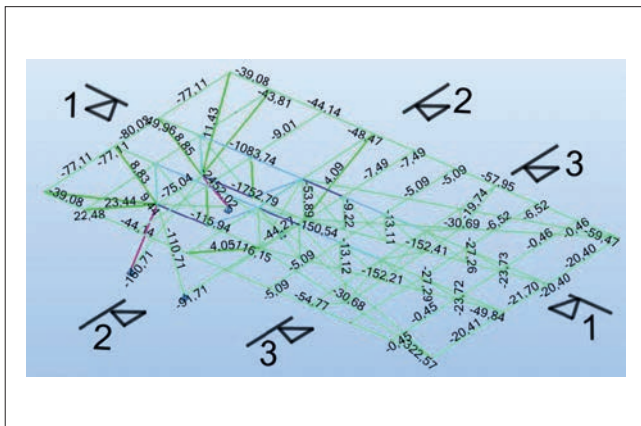
Podstawowym elementem nośnym konstrukcji dachu jest powtarzalny wspornik o długości 40,325 m i długości 57,03 m dla dźwigara narożnego, zamocowany na żelbetowej konstrukcji wsporczej, wykonany jako przestrzenny dźwigar kratownicowy złożony z trzech pasów. Całkowita wysokość konstrukcji dachu wynosi 6,40 m. Maksymalna wysokość kratownicy przy zewnętrznej krawędzi dachu wynosi 4,04 m. Wysokość



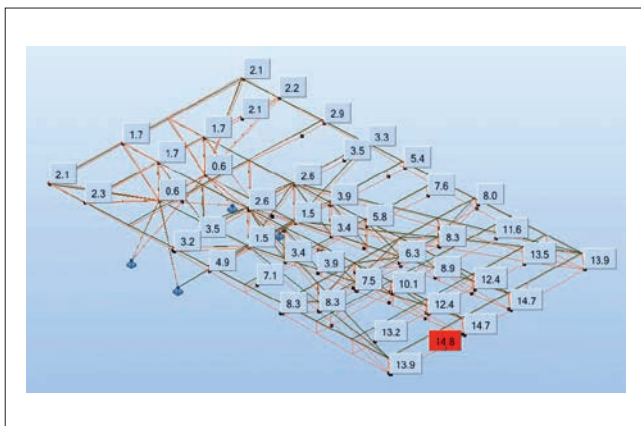
■ Rys. 11. Zastosowane profile dla wariantu 1



■ Rys. 12. Wartości maksymalnych sił ściskających dla wariantu 2



■ Rys. 13. Wartości maksymalnych sił rozciągających dla wariantu 2



■ Rys. 14. Maksymalne przemieszczenia konstrukcji w cm wariantu 2

ta zmniejsza się liniowo aż do momentu połączenia pasa górnego z pasami dolnymi. Krzyżulce znajdują się w 2 bocznych, wzajemnie do siebie nachylonych i łączących się w pasie górnym płaszczyznach. W przekroju poprzecznym pręty dźwigara tworzą literę A. Dźwigary rozstawione są co 21,2 m, w narożniku co 38,79 m.

Konstrukcję główną dachu uzupełniają dźwigary drugorzędne i płatwie. Pasy i krzyżulce są wykonane z rur walcowanych na gorąco. Pas górny to rura o średnicy 457 mm i grubości ścianki 40 mm. Natomiast rury 2 pasów dolnych mają średnicę 324 mm i grubość 40 mm. Krzyżulce mają przekrój 159 x 10 mm. W obszarze w pobliżu wewnętrznej krawędzi dachu nie ma już krzyżulców, gdyż pasy łączą się pod stosunkowo ostrym kątem.

Pokrycie wykonane jest z tkaniny technicznej z włókien szklanych pokrytych tworzywem PTFE. Właściwe napięcie membrany gwarantuje odpowiednio zaprojektowany system lin. Membrana jest napięta przy użyciu lin założonych na jej brzegach oraz liny wewnętrznej, która z kolei formuje dolinę dachu. Liny krawędziowe napinane są liną odciągową mocowaną do zewnętrznej podpory dźwigara dachowego. Brzeży membrany mocowane są do pasa górnego dźwigara głównego oraz wewnętrznego dźwigara kratowego podpierającego płyty poliwęglanowe.

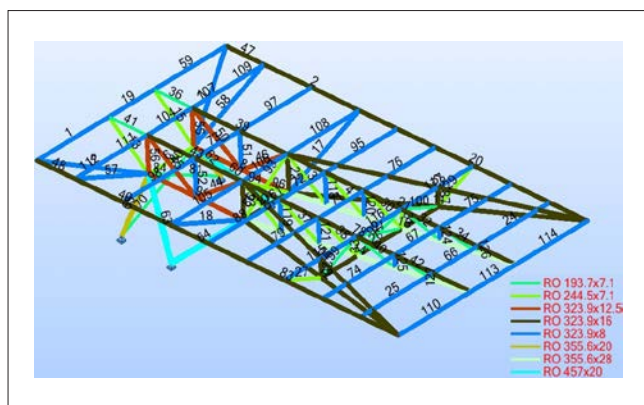
Wewnętrzna powierzchnia dachu na szerokości 9,35 m pokryta jest pasem przezroczystych płyt poliwęglanowych, który zapewnia lepsze doświetlenie naturalne murawy.

Ze względu na małą sztywność płyt poliwęglanowych wymagany odstęp między płatwiami wynosi 1,2 m. Z tego powodu zaprojektowano płatwie o znacznej rozpiętości ok. 8m i znacznej smukłości z profili prostokątnych 160 x 80 mm.

Odwodnienie dachu odbywa się za pomocą stalowych koryt na zewnątrz dachu, do których woda spływa poprzez niecki dachu o lekkim spadku utworzone w połowie rozpiętości między dźwigarami. Następnie z koryt woda odprowadzana jest za pomocą rur spustowych ukrytych w elementach konstrukcyjnych. Teflonowe pokrycie membrany usprawnia ześlizgiwanie się śniegu z powierzchni dachu w okresie zimowym. Dźwigary oparte są w 4 miejscach za pomocą stalowych blach podstawy, do których przyspawane są stalowe bolce zakotwione w żelbetowej koronie trybuny. Kratownice drugorzędne znajdujące się pomiędzy dźwigarami głównymi zostały także wykonane z profili gorąco walcowanych. Połączenie tych belek z jednej strony jest nieprzesuwne, a z drugiej strony przesuwne tak, aby uniknąć naprężeń powstałych od zmian temperatury i pracy żelbetowej korony trybun. Jedna kratownica znajduje się między membraną a płytami poliwęglanowymi. Górna krawędź górnej półki i dolna niższego pasa leżą na tej samej wysokości co pasy dźwigara głównego. Druga kratownica wystaje ponad dach o 1,7 m i jest umiejscowiona na krawędzi dachu. Są na niej przymocowane elementy oświetlenia.

Obliczenia

Obliczeń membrany dokonano na podstawie wytycznych europejskiego przewodnika dla struktur membranowych *European design guide for surface tensile structures* opublikowanego przez towarzystwo Tensinet.



Rys. 15. Zastosowane profile dla wariantu 2



Rys. 16. Wizualizacja przekrycia stadionu [2]

Obciążenia wiatrem zostały ustalone na podstawie badań w tunelu aerodynamicznym, biorąc pod uwagę także różne etapy budowy. Prędkość maksymalną wiatru na wysokości 10 m występującą w okresie co 50 lat określono na podstawie statystycznej prędkości wiatru na lotnisku w Warszawie w latach 1971-2000. Prędkość wiatru wyniosła 21,6 m/s i była o 8% większa niż wartość podana w Polskich Normach, gdzie prędkość wynosi 20 m/s. W tunelu aerodynamicznym przeprowadzono badania dla różnych kierunków wiatru różniących się o 30 stopni. Obciążenie śniegiem obliczono na podstawie normy PN EN 1991-1-3:2005.

Obliczenia zostały wykonane dla wszystkich etapów budowy. W modelu obliczeniowym zostały uwzględnione wszystkie elementy łącznie z membraną.

Zużycie materiałów konstrukcji wykonanej na budowie

Zużycie stali dla całej konstrukcji zrealizowanego zadania wyniosło 2635 ton, w tym:

- dźwigar główny prosty – 16 szt., 877 ton,
- dźwigar główny przynarozny – 8 szt., 441 ton,
- dźwigar główny narozny – 4 szt., 288 ton,
- dźwigary drugorzędne – 173 tony,
- płatwie – 110 ton.

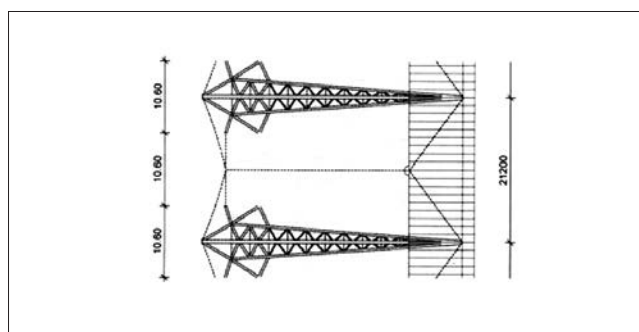
Zużyto 18 000 m² membrany oraz 4 200 m² poliwęglanu dachowego. Waga całej membrany wynosi ok. 30 ton.

Wykonane końcówki dźwigarów

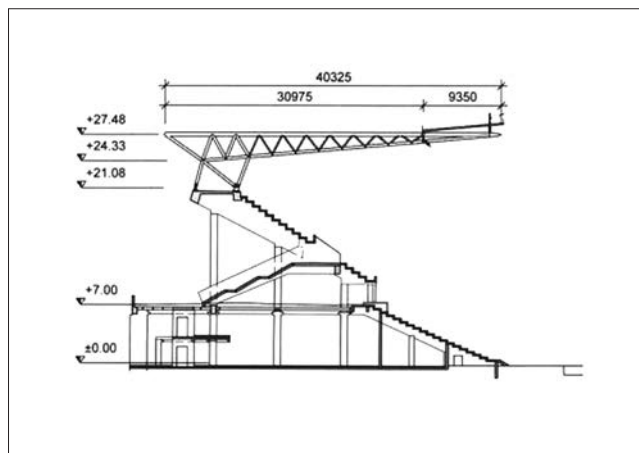
Zakończenie dźwigarów w miejscu połączenia pasów kratownicy zostało wykonane z indywidualnie zaprojektowanych odlewów stalowych wyprodukowanych w niemieckiej odlewni żelaza i stali w Bielefeld. Pojedyncze odlewy ważą do 1,2 t. Wymiary najdłuższego odlewu wynoszą 176 x 59 x 55 cm, grubość ścianki to 50 mm. Węzeł ten jest przyspawany do stalowej konstrukcji dźwigara.

Montaż konstrukcji na budowie

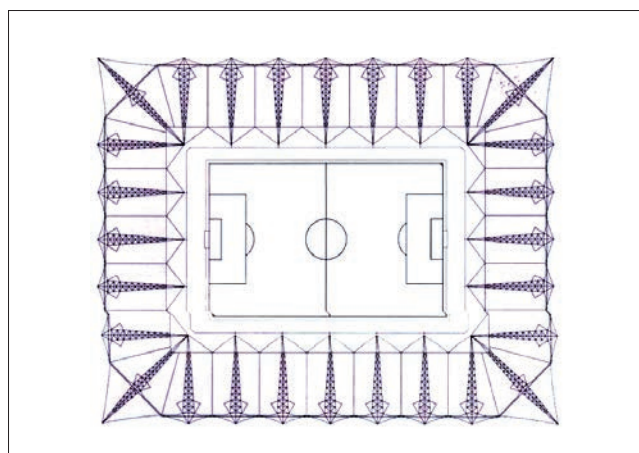
Ze względu na ograniczenia transportowe dźwigary główne zostały wykonane w częściach i przetransportowane z zakładu produkcyjnego w Siedlcach, oddalonego o ok. 90 km od Warszawy. Elementy dźwigara złożono i zespawano na placu budowy (dźwigar powtarzalny – rozpiętość 40,31 m, dźwigar narozny – rozpiętość 57,03 m). Malowanie również odbyło



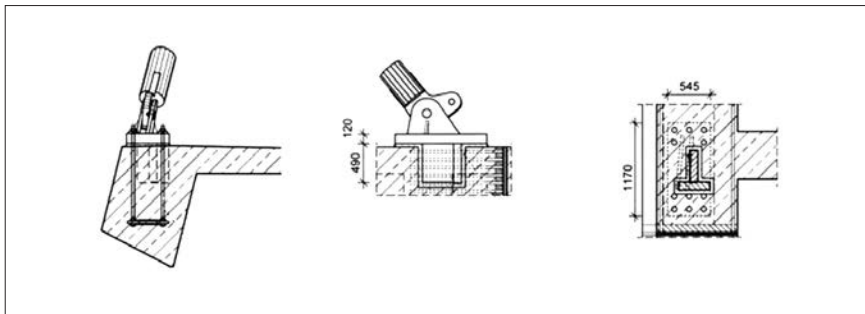
Rys. 17. Rzut konstrukcji dźwigarów głównych [1]



Rys. 18. Przekrój podłużny [1]



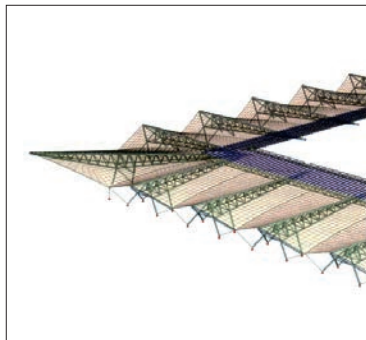
Rys. 19. Rzut konstrukcji przekrycia [1]



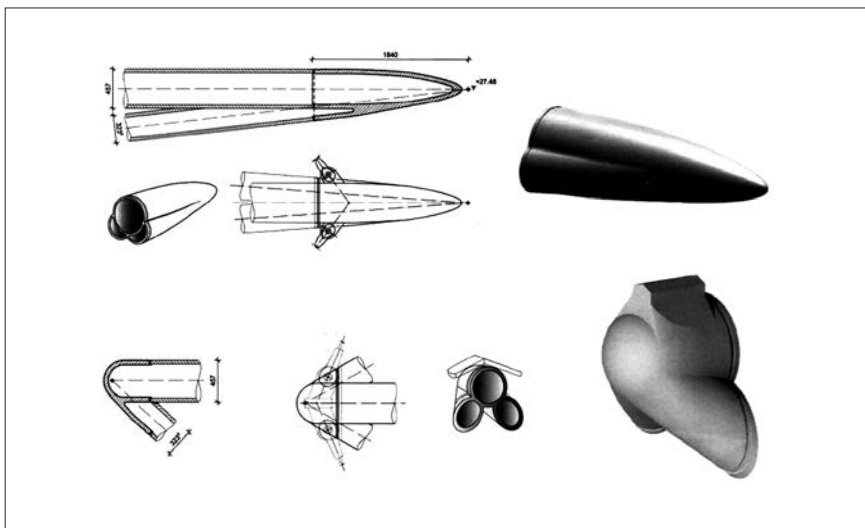
Rys. 20. Szczegóły zakotwienia dźwigara głównego [1]



Rys. 21. Wizualizacja podparcia zadaszzenia [2]



Rys. 22. Model obliczeniowy konstrukcji dachu [1]



Rys. 23. Zakończenie węzłów kratownicy [1]



Rys. 24. Element spawany na placu budowy [1]



Rys. 26. Montaż membrany [6]



Rys. 25. Montaż dźwigara głównego [1]

się na budowie. Konstrukcja została zabezpieczona systemem epoksydowo-polisiloksanowym na łączną grubość sięgającą 240 μm .

Dźwigary zostały zamontowane za pomocą dźwigu gąsienicowego. Wykonano także specjalne rusztowanie, które podpierało wewnętrzny koniec dźwigara. Prędkość wiatru w trakcie montażu nie mogła przekroczyć 8 m/s. Równoległe do montażu konstrukcji stalowej rozpoczęły się przygotowania do nałożenia i naciągnięcia za pomocą lin membrany, a także montażu płyt poliwęglanowych. Ze względu na okres zimowy należało zadbać o to, aby prace związane z nakładaniem membrany odbywały się w temperaturze powyżej 5°C.

Podsumowanie

Koncepcja 2A była bardzo wczesna. Po wstępnej analizie okazało się, że taka rama wymaga dodatkowych prętów, co zostało uwzględnione w koncepcji 2B. Taka konstrukcja traci jednak optyczną lekkość, prawdopodobnie dlatego została opracowana kolejna wersja, z góry zakładająca kratownice przestrzenne możliwie smukłe i lekkie optycznie. Dla obu koncepcji zużycie stali konstrukcyjnej jest zbliżone. Dla wersji 3 łączna masa stali zużyta na zadaszzenie wyniosła 2635 ton. Dla koncepcji 2A masa stali potrzebna na same pręty kratownicy wyniosła 2300 ton. Nie uwzględniono tu płyt pod poliwęglan, odlewów stalowych zakończeń węzłów kratownic, lin i cięgien membrany. Z uwagi na zużycie materiału oba rozwiązania są porównywalne.

Należy przy tym podkreślić, że – w stosunku do innych przekryć obiektów sportowych wybudowanych w Polsce – to wybudowane na stadionie Legii charakteryzuje się godnymi pochwalenia umiarem, prostotą i funkcjonalnością.

Piśmiennictwo

1. Göppert K., Justiz S.: *Ein Dach für das neue Stadion Legia Warschau.*
2. „Świat Architektury”, 7/2010 r.
3. Kłosowski P.: *Projektowanie przekryć z tkanin technicznych.*
4. Ambroziak A., Kłosowski P.: *O projektowaniu konstrukcji membranowych.*
5. Rduch Ł., Gremza G. (promotor): *Projekt przekrycia trybuny stadionu piłkarskiego.*
6. www.legia.com.