

Kondycja dachu katowickiego Spodka w świetle aktualnych pomiarów sił w dźwigarach linowo-prętowych

dr hab. inż. Rafał Szydłowski, prof. uczelni, mgr inż. Barbara Łabuzek, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

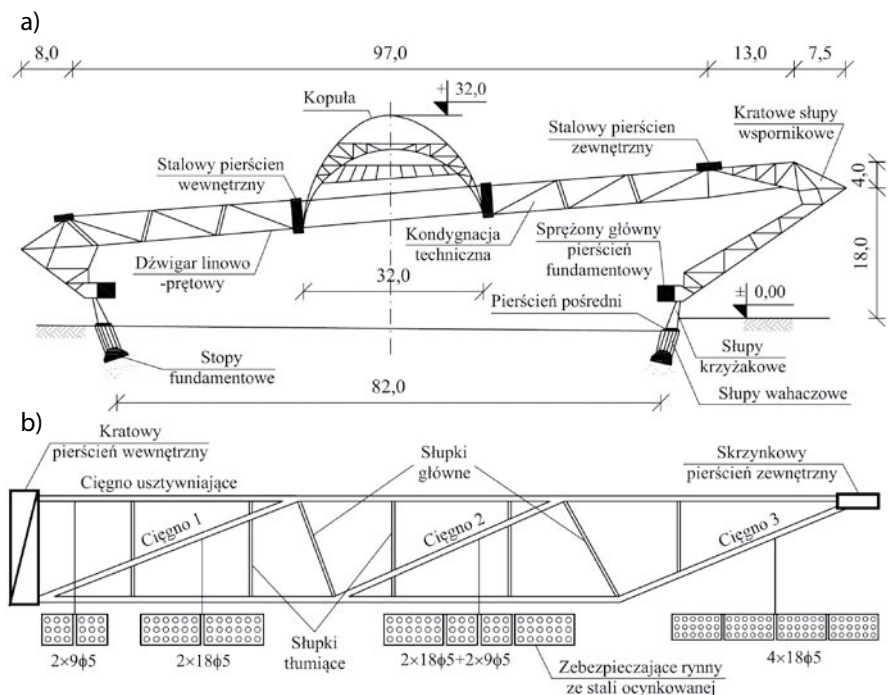
Budowę odważnego na owe czasy obiektu, jakim jest Hala Widowiskowo-Sportowa Spodek w Katowicach, rozpoczęto w 1964 roku i trwała ona przez 5 lat. Realizacja została poprzedzona konkursem. Pierwszą nagrodę w konkursie otrzymał projekt Biura Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego w Warszawie, którego architekturę inspirowaną kształtem dachu Supersamu przy ulicy Puławskiej 2 w Warszawie opracowali Maciej Gintowt i Maciej Krasiński, a konstrukcję Wacław Zalewski. Zaproponowano bryłę hali w kształcie latającego Spodka. Zwycięski projekt nie miał swojego odpowiednika w budownictwie światowym. W pierwszym zamyśle halę planowano wznieść na przedmieściach Katowic, jednak ze względu na jej niepowtarzalną formę lokalizację zmieniono, sytuując ją w samym centrum Katowic.

Uroczyste otwarcie hali odbyło się 8 maja 1971 roku. Ze względu na innowacyjność projektu konstrukcji oddanie obiektu do użytkowania poprzedzono próbą obciążenia dachu. Do próbnego obciążenia zaproszono 4000 żołnierzy, którzy obciążając konstrukcję dynamicznie poprzez skakanie i tupanie potwierdzili poprawność założeń przyjętych na etapie projektowania. Przez lata hala pełniła różnorakie funkcje. Odbyło się w niej między innymi spotkanie polskiej młodzieży z Fidelem Castro, liczne koncerty znanych gwiazd polskich i światowych, wydarzenia sportowe i seanse kinowe. Pierwszym

wydarzeniem, które najbardziej rozświetliło obiekt w kształcie ufo, był jednak pokaz Fiata 126p podczas Wielkiej Wystawy Samochodów w 1972 roku.

2. Konstrukcja obiektu i dachu wiszącego

Zmiana lokalizacji hali znacząco wpłynęła na jej układ konstrukcyjny. Największą trudnością, jaka stanęła przed zespołem projektowym, było dostosowanie konstrukcji do trudnego



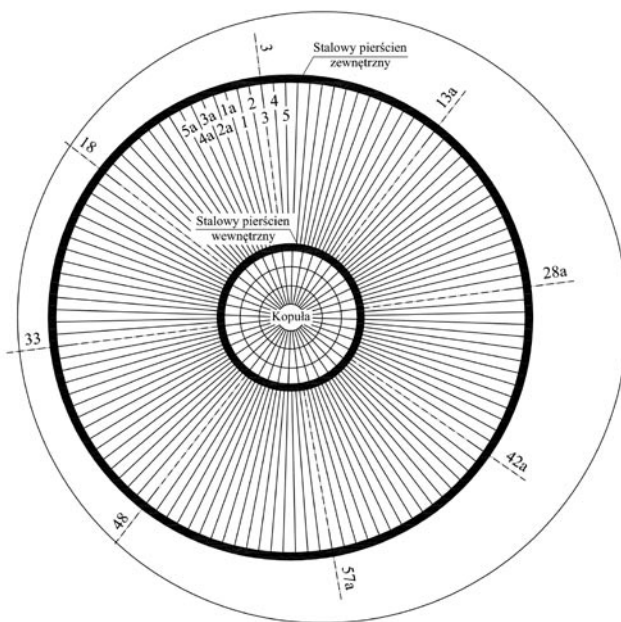
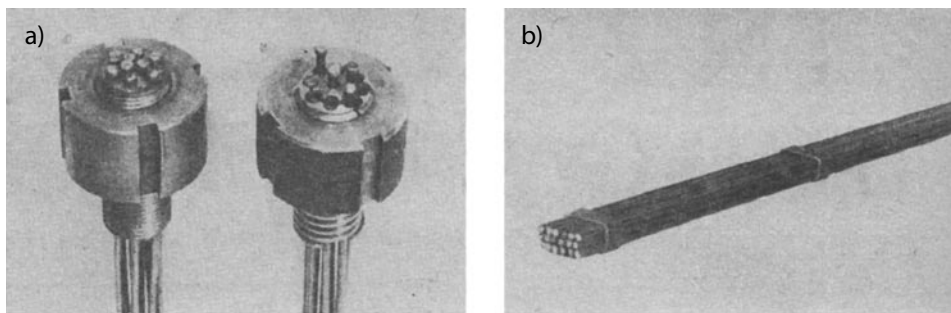
Rys. 1. Schemat konstrukcji hali (a), budowa dźwigara linowo-prętowego (b), widok dźwigarów w kondygnacji technicznej (c)

terenu, który wybrano na budowę hali Spodka. Wybrano teren, na którym występowały liczne szkody górnicze po zakończonej już eksploatacji węgla. Dodatkowym utrudnieniem okazał się grunt, który był bardzo zróżnicowany i nierównomiernie uwarstwiony. Wyżej opisane trudności przyczyniły się do ewolucji projektu i ostatecznie zrealizowano jego czwartą koncepcję. Schemat zrealizowanej konstrukcji pokazano na rysunku 1, a dokładny przebieg etapów projektowych opisano w [1]. W finalnej wersji projektu konstrukcję o kształcie spodka oparto na sprężonym pierścieniu fundamentowym, który wsparto na pochylonych słupach składających się z dwóch części: górnych słupów krzyżakowych i dolnych wahaczy, które w poziomie terenu połączone są pierścieniem pośrednim.

Konstrukcję dachu hali pokazano w przekroju budynku na rysunku 1a i w rzucie na rysunku 2. Konstrukcję wsporczą dachu stanowi 120 wspornikowych słupów kratowych połączonych na górze stalowym pierścieniem o przekroju skrzynkowym (stalowy pierścień zewnętrzny). Na pierścieniu zewnętrznym rozpięto konstrukcję dachu złożoną ze 120 linowo-prętowych kratownic połączonych w środku pierścieniem wewnętrznym o budowie kratowej. Na pierścieniu wewnętrznym wsparto stalową konstrukcję kopuły o średnicy 32,0 m i wysokości 16,0 m. Kopułę tworzy 40 południkowych żeber kratownicowych, dodatkowo skratowanych obwodowo.

Dźwigar linowo-prętowy o rozpiętości 36,0 m zaprojektowano w formie płaskiej kratownicy (rys. 1b), w której pas górny i dolny oraz krzyżulce wykonane są z lin, natomiast geometria kratownicy utrzymana jest przez stalowe słupki główne i słupki tłumiące. Pas górny jest równocześnie konstrukcją dachu, a pas dolny konstrukcją stropu podwieszonego, na którym zlokalizowano liczne urządzenia mechaniczne i instalacje – wentylacyjną i elektryczną. Dźwigar linowy tworzy 12 lin nośnych (wiązek). 4 liny zbudowane są z 9 drutów $\Phi 5$ mm, a 8 lin zbudowanych jest z 18 drutów $\Phi 5$ mm. Budowę liny $18\Phi 5$ mm pokazano na rysunku 3b. Druty rozmieszczono w 3 warstwach i w 3 rzędach pionowych. Łączna liczba drutów $\Phi 5$ mm w dźwigarze wynosi 180. Rozmieszczenie lin w poszczególnych cięgnach dźwigara pokazano na rysunku 1b. W cięgnach nośnych umieszczono odpowiednio: 2 liny $18\Phi 5$ mm w cięgnie 1, 2 liny $18\Phi 5$ mm + dwie liny $9\Phi 5$ mm w cięgnie 2 oraz 4 liny $18\Phi 5$ mm w cięgnie 3. W cięgnie usztywniającym umieszczono 2 liny $9\Phi 5$ mm. Liny kotwione są w zakotwieniach biernych na pierścieniu wewnętrznym i w zakotwieniach czynnych na pierścieniu zewnętrznym, po 9 drutów

Rys. 3. Widok dwudzielnego zakotwienia gwintowanego (a), widok wiązki $18\Phi 5$ mm (b) [2]



Rys. 2. Rzut dachu z zaznaczaniem dźwigarów podlegających kontroli siły

w zakotwieniu. Lina $18\Phi 5$ mm jest więc rozwidlona i kotwiona z każdej strony w 2 zakotwieniach. Na każdym końcu dźwigara zainstalowano łącznie 20 zakotwień. Wiązki lin przebiegające w pasach górnych i dolnych oraz krzyżulcach są obudowane blachą ocynkowaną, tworząc szczelne rynny o przekroju prostokątnym (rys. 1c). Rynny w celu zabezpieczenia stalowych lin zostały wypełnione kompozycją bitumiczną. W analogiczny sposób zabezpieczono zakotwienia bierne. Konstrukcję głowicy zakotwienia czynnego wypełniono betonem żywicznym.

System zakotwień i naciągu lin został opracowany przez Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej [2]. W laboratorium PK zaprojektowano, wykonano badania i opracowano technologię produkcji systemu zakotwień gwintowanych z kotwieniem drutów za pomocą główek. Wykonano 4800 zakotwień oraz 48000 główek. Widok zakotwienia pokazano na rysunku 3a. Zakotwienia czynne tak zaprojektowano, aby umożliwiły wstępny naciąg oraz pomiar i regulację siły w linach w poszczególnych fazach montażu przekrycia hali. Dwudzielne zakotwienie zbudowane jest z gwintowanego trzpienia oraz nakrętki z gwintem M38. Do wykonania zakotwień użyto stali narzędziowej

Rys. 4. Wyniki pomiaru sił w wiązkach 9Φ5 mm wciągach usztywniających po zmontowaniu wszystkich 120 dźwigarów, przed regulacją siły [2]

55 (obecnie C55). Na etapie przygotowań przeprowadzono badania zakotwień obciążając liny do zerwania oraz dodatkowo wykonując testy zmęczeniowe

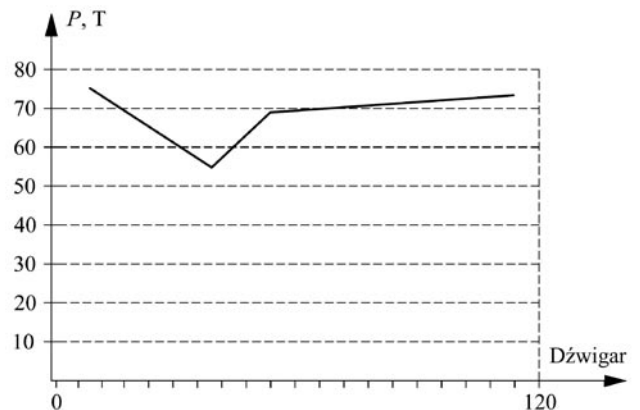
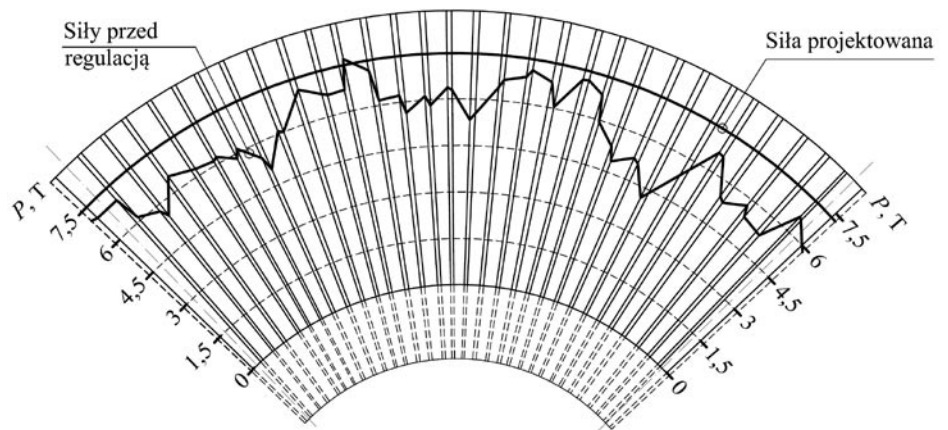
3. Realizacja dachu i pomiary sił w trakcie realizacji

Dźwigary linowe prefabrykowano na placu budowy, na którym wydzielono stanowiska do poszczególnych etapów prac. Pierwszym etapem było prostowanie strun i formowanie lin. Wyprostowane liny przycinano na odpowiednią długość, a następnie przeciągano w celu poprawy parametrów wytrzymałościowych. Ostatnim etapem prefabrykacji było formowanie dźwigarów, które jako kompletne montowano w konstrukcji. Po montażu wszystkich 120 dźwigarów równocześnie napinano liny w 3 dźwigarach rozmieszczonych co 120°. Pierwsze napinano liny usztywniające 9Φ5 mm do siły 7,5 T, a po nich jednocześnie liny nośne.

Montaż konstrukcji dachu miał charakter wieloetapowy, co wywoływało wielokrotną zmianę sił w linach. Po wykonaniu 99 dźwigarów zdemontowano montażowe podpory pierścienia zewnętrznego. Miało to istotny wpływ na wartości sił w zamontowanych już dźwigarach. Konieczne było wykonanie pomiaru przyrostów sił, aby móc wprowadzić korektę sił w montowanych później dźwigarach.

Pomiary siły kotwiącej w wybranych dźwigarach linowych przeprowadzono w 7 kolejnych fazach obciążenia. Istotne znaczenie dla otrzymania jednolitej połaci dachowej miało uzyskanie w linach usztywniających dźwigara jednakowej siły równej 7,5 T. W tym celu, po zamontowaniu wszystkich 120 dźwigarów, przeprowadzono pomiar i regulację siły do tej wartości. Wyniki pomiarów pokazano na rysunku 4. Linia łamana przedstawia siłę zarejestrowaną w linach usztywniających po napięciu wszystkich 120 dźwigarów, przed regulacją sił. Po wykonaniu regulacji sprawdzono wrywkowo wartość sił, co pokazało, że wartości tylko nieznacznie odbiegają od wartości projektowanej 7,5 T. Rozkład całkowitych sił w dźwigarach, zarejestrowany po ostatnim etapie montażu dachu, kiedy zamontowano wszystkie elementy dachu, tj. pokrycie dachowe, zabezpieczenie antykorozyjne lin, wyposażenie kondygnacji technicznej pokazano na rysunku 5. Wartość sił wynosiła od 55 do 75 ton.

Bloki z zakotwieniami czynnymi w 7 dźwigarach zostały przystosowane do wykonywania kontroli sił w wiązkach.

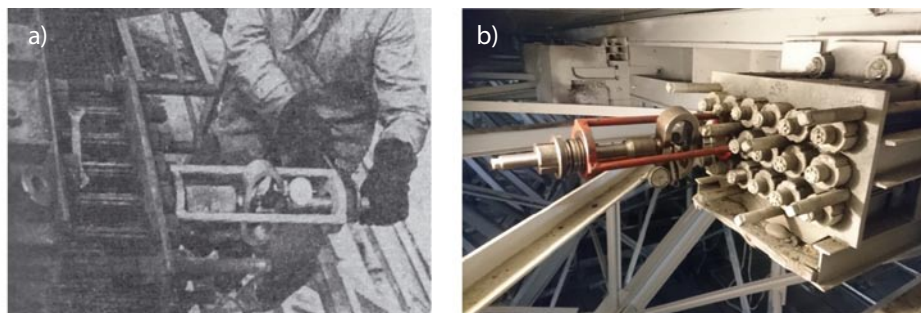


Rys. 5. Rozkład sił w dźwigarach linowych po ukończeniu konstrukcji dachu

Lokalizacje i numerację tych dźwigarów pokazano na rysunku 2. Kontrolne pomiary sił wykonano w latach 1978, 1985, 1990, 2006 oraz 2019 [3], a najnowsze pomiary po modernizacji wyposażenia kopuły, będącej przyczynkiem do powstania niniejszej pracy, przeprowadzono w 2021 roku. Pomiar siły w zakotwieniach czynnych dźwigarów każdorazowo wykonywany jest za pomocą zestawu, który skonstruowano i wykorzystywano do regulacji sił w trakcie wznoszenia obiektu (rys. 6). Zestaw ten (rys. 7) zbudowany jest z siłomierza pierścieniowego oraz śruby naciągowej wraz z nakrętką napinającą opartą na stoliku oporowym za pośrednictwem łożyska ślizgowego. Pomiar siły polega na odciąganiu zakotwienia śrubą naciągową przez dokręcanie nakrętki. Pomiedzy zakotwieniem a śrubą naciągową zainstalowany jest siłomierz, którego deformacja jest miarą siły. Za rzeczywistą siłę uznaje się wartość pomierzoną przez siłomierz, gdy możliwy jest swobodny ruch nakrętki.

Wyniki pomiarów sił w linach (wiązkach) dźwigara nr 3, przeprowadzone w 2021 roku przedstawiono w tabeli 1. Wartości sił w poszczególnych wiązkach 9Φ5 wynoszą od 23,8 do 40,1 kN, a wartość średnia siły w wiązce 32,1 kN. Średnie naprężenia w stali wynoszą 181,2 MPa. Wartość całkowitej siły w linach wynosi 642 kN. Wartości sił w pozostałych dźwigarach wynoszą: 488 kN w dźwigarze nr 13a, 431 kN w dźwigarze nr 28a, 529 kN w dźwigarze nr 33 i 511 kN

Rys. 6. Zestaw do pomiaru siły w wiązkach drutów 9Φ5 mm: a) w trakcie wykonywania dachu [2], b) podczas aktualnie wykonywanych pomiarów [3]

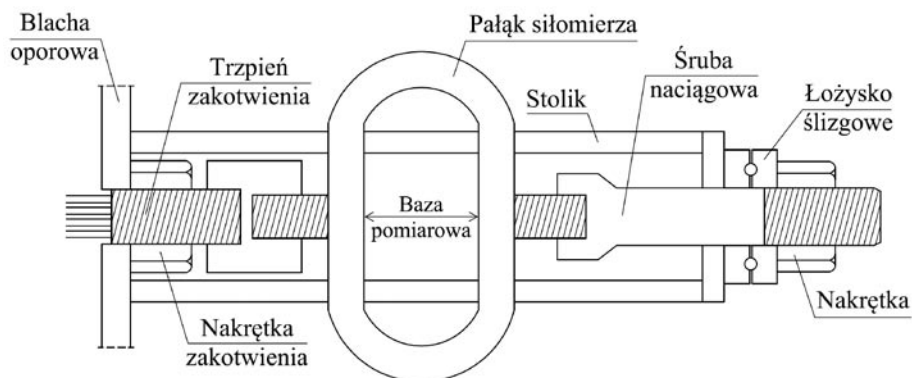


w dźwigarze nr 18. Otrzymane wartości sił warto w tym miejscu porównać z wartościami pomierzo-

nymi po ukończeniu montażu dachu, które zmieniały się od 550 do 750 kN (rys. 5). Pomierzone obecnie siły nie wykraczają poza zarejestrowany wówczas zakres sił w linach. Zmianę sił w badanych dźwigarach na przełomie lat od 1971 aż do chwili obecnej pokazano graficznie na rysunku 8. Łątwo zauważyć, że część dźwigarów w niektórych pomiarach wyłączono z pomiarów. W 1985 roku nie wykonano pomiarów w dźwigarach 57a, 48 i 33 (prawdopodobnie ze względu na czasowy brak dostępności do tych głowic, do których dostęp był jedynie z dachu).

W latach 2019 i 2021 nie wykonywano pomiarów w dźwigarach 57a i 48. Dźwigary te zostały już wyłączone z kontroli, ponieważ w trakcie wykonywania wymiany pokrycia dachowego pomiędzy latami 2006, a 2019 zrezygnowano z klap rewizyjnych w dachu, które pierwotnie wykonano w celu umożliwienia dostępu do głowic. Średnie wartości pomierzonych sił w poszczególnych latach wynoszą: 669 kN w 1971 roku, 691 kN w 1977 roku, 674 kN w 1985 roku, 695 kN w 1990 roku, 742 kN w 2006 roku, 682 kN w 2019 roku oraz 507 kN w 2021 roku. Można zauważyć, że w okresie do 2006 roku średnia wartość siły systematycznie wzrastała, a wartość wzrostu wyniosła 10,9% (średnia siła w 1971 roku wynosiła 669 kN, a w 2006 roku 742 kN). Największy wzrost o 6,8% wystąpił pomiędzy 1990 a 2006 rokiem. Systematyczny wzrost sił łatwo wytłumaczyć zwiększającym się systematycznie obciążeniem dachu, wywołanym ciągłym wzrostem wyposażenia montowanego na stropie technicznym. Od 2006 roku siły w dźwigarach, w dwóch kolejnych pomiarach znacząco spadają. Pomiar w 2019 roku wykazały spadek średniej siły w stosunku do poprzednio zarejestrowanej wartości o 8,1%. W okresie pomiędzy 2006 a 2019 rokiem przeprowadzono gruntowny remont dachu. Zmieniono pierwotne pokrycie dachowe wykonane z warstwowych płyt azbestowo-cementowych na znacznie lżejsze pokrycie w postaci nowoczesnych płyt warstwowych.

Rys. 7. Budowa zestawu do pomiaru siły

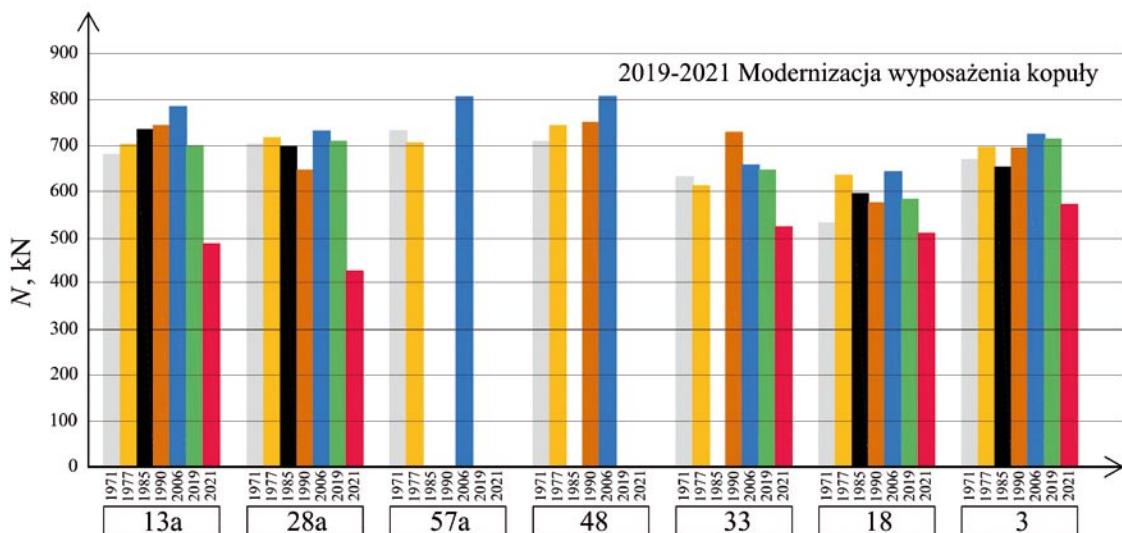


Spadek średniej siły pomiędzy 2021 a 2019 rokiem wyniósł aż 26%. Przyczyną spadku sił był remont i wymiana wyposażenia technicznego znajdującego się wewnątrz kopuły, które wymieniono na nowoczesne i znacznie lżejsze. Zabiegi te były przyczyną zlecenia pomiarów kontrolnych w celu oceny wpływu remontu na bezpieczeństwo dachu przed zaplanowanymi w obiekcie meczami Mistrzostw Europy w Piłce Siatkowej Mężczyzn w 2021 roku. Stąd wynika niewielka przerwa pomiędzy ostatnimi pomiarami wynosząca zaledwie 2 lata oraz dostęp do najnowszych danych o wartościach sił w dźwigarach. Całkowity spadek średniej siły od 2006 roku wynosi 38%.

Analizując otrzymane z pomiarów wartości sił w linach stwierdzono, że zarejestrowana średnia wartość naprężeń w stali wynosi obecnie 147 MPa (powierzchnia stali 3534 mm²), a wartość maksymalna 226,7 MPa (tabela 1). Źródła nie podają wytrzymałości stali, lecz powszechnie stosowana do sprężania konstrukcji stal miała wówczas wytrzymałość maksymalną równą 1470 MPa. Przed montażem dźwigarów wszystkie liny, w celu ich przetestowania, poddano przeciągnięciu wstępnemu przez okres 10 minut przy naprężeniach wynoszących 950 MPa [2]. Były to naprężenia ponad czterokrotnie wyższe od maksymalnych, obliczonych dla pełnego obciążenia dachu. Biorąc pod uwagę pomierzone aktualnie wartości naprężeń, można stwierdzić, iż w chwili obecnej konstrukcja dachu pracuje z dużym współczynnikiem bezpieczeństwa, który bez uwzględnienia obciążenia śniegiem, wynosi 4,2 w stosunku do wytrzymałości lin sprawdzonej doświadczalnie przed montażem dachu oraz 6,5 w stosunku do teoretycznej wytrzymałości stali na zerwanie.

Tabela 1. Wyniki pomiaru sił w linach w dźwigarze nr 3

Zakotwienie	1/A	1/B	1/C	1/D	1/E	1/F
ΔL_i , mm	2,30	2,01	2,81	1,81	2,70	2,11
N_i , kN	30,26	26,45	36,97	23,82	35,53	27,76
σ_i , MPa	171,0	149,4	208,9	134,6	200,7	156,9
Zakotwienie	2/A	2/B	2/C	2/D	2/E	2/F
ΔL_i , mm	2,55	2,09	2,35	1,84	2,78	2,8
N_i , kN	33,55	27,50	30,92	24,21	36,58	36,84
σ_i , MPa	189,6	155,4	174,7	136,8	206,7	208,1
Zakotwienie	3/A	3/B	3/C	3/D	3/E	3/F
ΔL_i , mm	2,55	3,02	2,23	2,2	3,05	2,67
N_i , kN	33,55	39,74	29,34	28,95	40,13	35,13
σ_i , MPa	189,6	224,5	165,8	163,5	226,7	198,5
Siła w zakotwieniu: N, kN = 577,24			Średnie naprężenie: σ, MPa = 181,18			



Rys. 8. Wyniki wszystkich przeprowadzonych dotąd pomiarów kontrolnych sił w dźwigarach po oddaniu obiektu do użytkowania

4. Podsumowanie

Dach Hali Widowiskowo Sportowej Spodek w Katowicach to unikatowa jak na ówczesne czasy konstrukcja wisząca. Przeznaczenie obiektu oraz brak odpowiednich narzędzi obliczeniowych pozwalających na weryfikację konstrukcji wywołały wątpliwości autorów rozwiązania. Było to przyczynkiem do prowadzonych cyklicznie pomiarów napięcia lin nośnych w dźwigarach dachowych. Pomiary takie zlecano cyklicznie (z maksymalnym odstępem czasu co 16 lat), jak również po gruntownej modernizacji dachu. Prowadzone pomiary pozwoliły poznać historię obciążenia dachu, które do 2006 roku systematycznie i powoli wzrastało, a od 2006 roku bardzo spada (w wyniku wymiany wyposażenia dachu na lepsze i nowocześniejsze). Ostatnie przeprowadzone w 2021 roku pomiary wykazały, że średnia zarejestrowana siła na bloku kotwiącym dźwigara jest obecnie o 38% mniejsza niż największa w 2006 roku. W chwili prowadzenia ostatnich pomiarów w 2021 roku mierzone dźwigary pracowały ze współczynnikiem bezpieczeństwa równym 4,2 w stosunku do wytrzymałości lin sprawdzonej doświadczalnie przed

montażem dachu oraz 6,5 w stosunku do teoretycznej wytrzymałości stali na zerwanie.

Należy mieć na uwadze, że wszystkie pomiary były prowadzone przy braku śniegu na dachu, którego wpływ bez numerycznego zamodelowania konstrukcji jest trudny do oszacowania. Przy wysokich współczynnikach bezpieczeństwa można stwierdzić, że w dachu drzemią duże zapasy nośności i poziom bezpieczeństwa jest wysoki. Wzrósł on po odciążeniu dachu od 2006 roku.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Żórawski A., Ewolucja projektu konstrukcyjnego Hali Widowiskowo-Sportowej w Katowicach, Inżynieria i Budownictwo, 10/1969, str. 381–386
- [2] Detko W., Dyduch K., Libura S., Zagadnienia technologiczne przy realizacji dachu wiszącego nad halą główną WHWS w Katowicach, Inżynieria i Budownictwo 7/1972, str. 239–244
- [3] Szydłowski R., Łabuzek B., 50 years have passed, current state, studies and safety assesment of hanging roof above the main sport and entertainment hall in Katowice, MATEC Web of Conferences, 284(2019). Proc. of 29th International Conference on Structural Failures, Międzyzdroje, Poland, May 20–24, 2019
- [4] Sieńko R., Szydłowski R., Badania zmian sił wciąganych przekrycia dachowego pod wpływem oddziaływania w postaci fali akustycznej, Czasopismo Techniczne. Budownictwo 4-B/2012, str. 183–191