



Dr inż. Robert KORZENIOWSKI, [robertk@imikb.wil.pk.edu.pl](mailto:robertk@imikb.wil.pk.edu.pl)  
Mgr inż. Artur LUPA, [alupa@imikb.wil.pk.edu.pl](mailto:alupa@imikb.wil.pk.edu.pl)  
Zakład Budownictwa Ogólnego i Przemysłowego  
Politechnika Krakowska

## ANALIZA PRZYCZYN AWARYJNEGO STANU DREWNIANYCH DŹWIGARÓW PRZEKRYCIA HALI SPORTOWEJ

### ANALYSIS OF CAUSES OF FAILURE STATE OF TIMBER GIRDERS OF SPORTS HALL ROOF

**Streszczenie** W pracy przedstawiono analizę przyczyn powstania znacznych ugięć drewnianych dźwigarów składających się z kilku belek z drewna litego połączonych ze sobą łącznikami mechanicznymi. Analizę przeprowadzono z uwzględnieniem podatności łączników, która pozwoliła uzyskać dużą zgodność wyników z wykonanymi pomiarami ugięć. Analiza wykazała również, iż ważną rolę mogą odgrywać także warunki termiczno-wilgotnościowe w jakich pracują elementy drewniane.

**Abstract** In the paper the analysis of causes of large deflections of timber girders which are made of a few timber beams and connected together with the help of mechanical connectors was presented. Analysis was carried out taking into consideration the flexibility of connectors which allows to achieve a good conformity with the results of measurements. This analysis also showed that thermal and moisture conditions in which timber elements are working may play a very important role.

#### 1. Wprowadzenie

Przedmiotem analizy była konstrukcja dachu hali sportowej, a w szczególności dźwigary przekrycia tej konstrukcji wykonane z drewna litego. Początkowo dźwigary dachowe miały zostać zaprojektowane i wykonane z drewna klejonego. Jednak inwestor w celu ograniczenia kosztów inwestycji zdecydował się na wykonanie dźwigarów w postaci trzech belek z drewna litego połączonych między sobą łącznikami mechanicznymi.

Celem niniejszej analizy było stwierdzenie rzeczywistych przyczyn powstania awaryjnego stanu konstrukcji w postaci niepokojąco dużych ugięć drewnianych dźwigarów dachowych oraz przeciekania dachu i załamania się podłogi sali sportowej.

Dlatego też dokonano szeregu wizji lokalnych, w trakcie których były wykonywane odkrywki posadzki oraz na szeroką skalę odkrywki dachu umożliwiające wykonanie:

- identyfikacji zastosowanego rzeczywistego układu konstrukcyjnego, rozwiązań detali konstrukcyjnych oraz warstw pokrycia dachu i posadzki,
- pomiarów i inwentaryzacji układu konstrukcyjnego i jego elementów składowych w tym pomiarów ugięć dźwigarów,
- inwentaryzacji znacznych pęknięć drewna dźwigarów.

Powyższe działania stanowiły podstawę między innymi do dalszych analiz numerycznych i inżynierskich w tym do analizy poprawności zaprojektowanej oraz rzeczywiście wykonanej konstrukcji a także zgodności z normami oraz zasadami sztuki inżynierskiej.

## 2. Opis analizowanej konstrukcji

Obiekt będący przedmiotem niniejszej analizy był wolnostojącym budynkiem sali sportowej z zapleczem socjalnym (szatnie, łazienki), którego strop tworzył antresolę dla publiczności. Sala połączona była z istniejącym budynkiem szkolnym łącznikiem. Obiekt nie posiadał podpiwniczenia. Wymiary zewnętrzne sali gimnastycznej w rzucie poziomym wynosiły 25,49 x 18,60m a wysokość 9,50m. Ściany nośne zewnętrzne i wewnętrzne wykonane były z pustaka ceramicznego przy czym ściany zewnętrzne ocieplone zostały warstwą styropianu. Układ ścian nośnych był podłużny a zasadniczym elementem konstrukcyjnym przekrycia obiektu były dźwigary drewniane rozstawione co ok. 6,0 m. Posiadały one rozpiętość nad antresolą 6,0 m natomiast nad salą gimnastyczną 12,0 m. Całkowity przekrój dźwigarów nad antresolą wynosił ok. 18/34 cm, a nad salą gimnastyczną ok. 18/46 cm. Dźwigary spoczywały na zewnętrznych ścianach nośnych oraz na pośrednich podporach – słupach stalowych zlokalizowanych przy antresoli o średnicy zewnętrznej 32,4 cm wypełnionych betonem i dodatkowo zbrojonych. Nachylenie połączy dachu wynosiło około  $18^{\circ}$ .



Rys. 1. Widok hali oraz otworów wywiewnych w kalenicy

Wentylację stanowiły w obiekcie otwory nawiewne usytuowane nad grzejnikami w ścianie zewnętrznej o średnicy 190mm w połowie rozpiętości pomiędzy dźwigarami oraz wentylatory usytuowane w kalenicy również w połowie rozpiętości pomiędzy dźwigarami [Rys. 1.].

Dźwigary składały się z trzech litych bełek drewnianych połączonych ze sobą za pomocą pierścieni zębatych typu Buldog ściągniętych śrubami M16. W okolicy kalenicy natrafiono w dźwigarze nr 1 na śruby M14 (w projekcie pierścienie Geka oraz śruby ściągające M24). Rozstaw średni pierścieni Buldog wynosił ok. 50 cm. Nad salą gimnastyczną dźwigary zostały spięte ze sobą ściągami w postaci prętów stalowych  $\varnothing 27$  mm (w projekcie  $\varnothing 32$ ). Do dźwigarów zamocowano płatwie dachowe stalowe z IPE 160 oraz drewniane o przekroju 7,5x13,5 cm rozstawione średnio co 100 cm, do których zamocowano blachę trapezową T35 grubości 0.55 mm

Na warstwy dachu składały się: od spodu płyty gipsowo-kartonowe gr. 12,5 mm, folia dachowa, warstwa termoizolacji w postaci maty z wełny mineralnej gr. 20 cm oraz płyty styropianowej gr. 5 cm. Nie stwierdzono występowania wiatroizolacji.

### 3. Stan awaryjny dźwigarów - opis zaistniałych uszkodzeń

W analizowanym obiekcie wystąpiły znaczące ugięcia drewnianych dźwigarów dachowych widoczne gołym okiem [Rys. 2] i przekraczające ugięcia dopuszczalne.



Rys. 2. Obserwowalne gołym okiem ugięcia dźwigarów nad salą

Pomierzone maksymalne ugięcia wynosiły dla dźwigarów nad antresolą od 33 do 91 mm a nad salą do ćwiczeń od 12 do 51 mm. Pomiar powyższych wartości ugięć miał miejsce praktycznie przy obciążeniu tylko ciężarem własnym. W związku z tym powyższe wartości były sumą ugięcia od tego obciążenia oraz pozostałego ugięcia trwałego. Należy jednak podkreślić, że pomierzone ugięcia nie uwzględniały obciążeń zmiennych np. obciążenia śniegiem.



Rys. 3. Pęknięcie drewna belki dźwigara

We wszystkich dźwigarach stwierdzono poważne pęknięcia belek drewnianych. Dla dźwigarów nad antresolą pęknięcia boczne belek środkowych dochodziły do 15 mm



szerokości głębokości co najmniej 80 mm. Dla belek dolnych pęknięcia od spodu belki miały szerokość do 13 mm i głębokość do 70 mm. Dla dźwigarów nad salą gimnastyczną pęknięcia boczne belek wyniosły 15 mm i również sięgały na głębokość 80 mm, natomiast pęknięcia belek dolnych wynosiły odpowiednio 15 mm i 90 mm. Również podobne wartości osiągały pęknięcia belek górnych zarówno nad antresolą jak i salą gimnastyczną .



Rys. 4. Pęknięcia drewna oraz przerwa pomiędzy folią a dźwigarem dachowym

Pomiędzy belkami tworzącymi dźwigar nastąpiły rozwarcia. Dla belek nad antresolą pomiędzy belką górną a środkową rozwarcie dochodziło do 5 mm, natomiast pomiędzy środkową a dolną sięgały one 8 mm Dla dźwigarów nad salą gimnastyczną rozwarcia były jeszcze większe i wynosiły odpowiednio 8 oraz 18 mm.



Rys. 5. Znaczne rozwarcie belek dźwigara, widoczne wysunięte zęby pierścienia z drewnianej belki

Zaobserwowano również licznie występujące plamy i zacieki spowodowane nieszczelnościami pokrycia jak również kondensacją pary wodnej, świadczące o systematycznym zamakaniu wełny mineralnej.

Około pięć miesięcy od zauważenia dużych ugięć, w trakcie zajęć sportowych na sali doszło do załamania się podłogi na pewnej powierzchni i sala została najpierw częściowo a potem całkowicie wyłączona z dalszego użytkowania.

#### 4. Analiza przyczyn powstałych uszkodzeń

W celu ustalenia głównych przyczyn powstałego stanu awaryjnego dźwigarów dachowych wykonano szereg analiz statyczno-wytrzymałościowych w tym analizy komputerowe przy zastosowaniu trójwymiarowego modelu konstrukcji. [Rys.6].



Rys. 6. Widok modelu obliczeniowego 3D

Analizy prowadzono dla trzech możliwych sytuacji dotyczących współpracy belek drewnianych w dźwigarze:

- współpraca składowych belek połączonych pierścieniami buldog D48
- współpraca składowych belek połączonych tylko śrubami M16
- brak współpracy pomiędzy belkami – belki pracują niezależnie.

Podczas sprawdzania SGN w płatwiach oraz stężeniach dodatkowo uwzględniono siłę utrzymującą dźwigary przed wyboczeniem z płaszczyzny dźwigara na podstawie przyjętych założeń do wymiarowania dźwigarów w obliczeniach konstrukcyjnych.

Otrzymane w wyniku analizy ugięcia porównano z ugięciami pomierzonymi podczas inwentaryzacji. Najbliższy rzeczywistości okazał się model, w którym belki współpracują ze sobą jedynie poprzez śruby ściągające bez udziału pierścieni zębatych. Jest to tym bardziej uzasadnione, iż podczas oględzin konstrukcji stwierdzono znaczne szczeliny pomiędzy belkami. W wielu miejscach szczeliny były na tyle duże, że pierścienie nie były zagłębione w łączonych belkach (były praktycznie całe widoczne). Dlatego też do dalszej analizy przyjęto sztywność zastępczą dla tego modelu.

Poniżej w tabelicy 1. zestawiono ugięcia dźwigarów: pomierzone oraz obliczone dla zastosowanych pierścieni, dla samych śrub oraz trzech nie zespolonych ze sobą belek dźwigarowych. Analizę statyczno-wytrzymałościową przeprowadzono z uwzględnieniem warunków oraz PN-81/B-03150 oraz PN-B-03150:2000

W wyniku przeprowadzonych oględzin i analiz zauważono szereg rozbieżności pomiędzy projektem a rzeczywistą konstrukcją a także błędów projektowych i wykonawczych, które miały wpływ na zaistniały stan konstrukcji.

Za bezpośrednią przyczynę powstania nadmiernych ugięć drewnianych dźwigarów należy uznać zastosowanie pierścieni Buldog D48 zamiast Geka D115 oraz zmianę ich rozstawu. Zastosowano również mniejszą niż zaprojektowano podkładkę pod nakrętkę ściągu zamiast 150x150x8 założono 80x80x6. W związku z tym nie sprawdzili się normy docisk pod podkładką i w konsekwencji możliwe były większe deformacje dźwigarów. W trakcie oględzin stwierdzono, że ściąg jest luźny i nie spełnia swej roli w konstrukcji. Nie zaprojektowano ani nie wykonano żadnej regulacji ściągu (w postaci 2-ch śrub rzymskich) i w związku z tym nie było możliwości zwiększenia naciągu. Ponadto zastosowano do

wykonania dźwigarów belki o trochę innych wymiarach poprzecznych niż zaprojektowano (3x18x15,4 sala i 3x18x11,3 antresola zamiast 3x 16x16 sala i 3x16x14 antresola) co dodatkowo zmniejszyło sztywność dźwigara i zwiększyło ugięcie dźwigarów.

Tablica 1. Zestawienie pomierzonych, dopuszczalnych i obliczonych ugięć dla trzech wariantów pracy, (klasa użytkowania II lub III)

	dźwigary skrajne - antresola [mm]					dźwigary środkowe - antresola [mm]				
	dopuszczalne	pierścienie	śruby	trzy luzem	pomierzone	dopuszczalne	pierścienie	śruby	trzy luzem	pomierzone
g - stara norma	20	14	39	48	31, 44	20	25	67	83	55, 80, 91
g+s - stara norma		46	127	158			89	237	293	
g - nowa norma, dorażne		11	30	37			19	52	64	
s - nowa norma, dorażne		25	67	84			49	131	162	
$g^*(1+k_{def})+s^*k_{def}$ II		20	54	67			34	94	115	
$g^*(1+k_{def})+s^*k_{def}$ III		41	110	136			72	195	241	
$g^*(1+k_{def})+s^*(1+k_{def})$ II		45	121	151			83	225	277	
$g^*(1+k_{def})+s^*(1+k_{def})$ III		66	177	220			121	326	403	

	dźwigary skrajne - sala [mm]					dźwigary środkowe - sala [mm]				
	dopuszczalne	pierścienie	śruby	trzy luzem	pomierzone	dopuszczalne	pierścienie	śruby	trzy luzem	pomierzone
g - stara norma	21	8	20	23	15, 21	21	14	34	40	43, 48, 51
g+s - stara norma		25	60	72			47	114	135	
g - nowa norma, dorażne		6	15	18			11	26	31	
s - nowa norma, dorażne		13	31	37			26	62	73	
$g^*(1+k_{def})+s^*k_{def}$ II		11	27	32			20	47	56	
$g^*(1+k_{def})+s^*k_{def}$ III		22	54	65			41	97	115	
$g^*(1+k_{def})+s^*(1+k_{def})$ II		24	58	69			46	109	129	
$g^*(1+k_{def})+s^*(1+k_{def})$ III		35	85	102			67	159	188	

Na etapie wykonywania zmieniono układ płatwi poprzez wprowadzenie dodatkowych płatwi drewnianych zmniejszając równocześnie przekrój płatwi stalowych z IPE 180 na IPE 160. Zmiana ta spowodowała jednak zwiększenie momentu w dźwigarze.

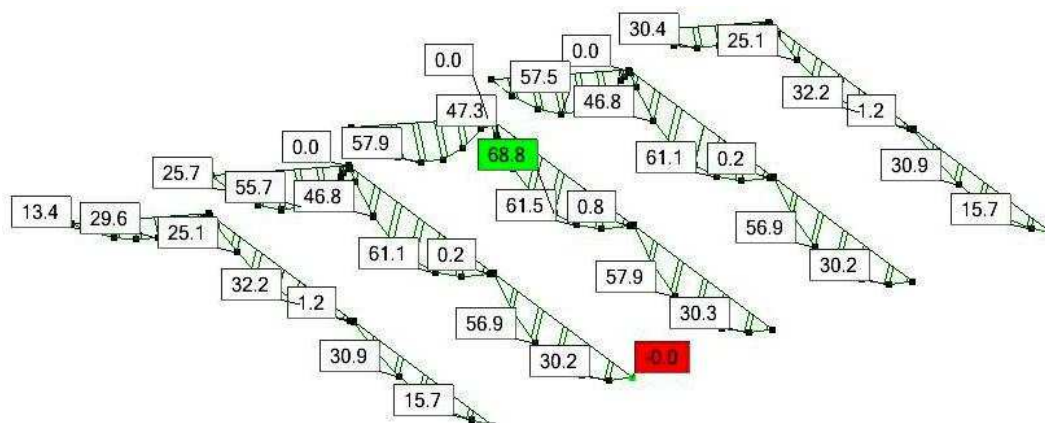
Analiza projektu konstrukcyjnego wykazała, iż błędnie założono pełną współpracę pomiędzy blachą trapezową a płatwiami stalowymi i tym samym założono brak możliwości zwiczerzenia płatwi IPE. Założenie to wymaga jednak specjalnych zabiegów, a tych nie przewidziano.

Założono również w projekcie dla dźwigara złożonego z trzech belek litych połączonych na łączniki mechaniczne pełny przekrój i sztywne połączenie składowych belek co ze względu na występowanie podatność połączeń na łączniki mechaniczne jest także niewłaściwe. W wyniku czego nieświadomie przekroczono graniczne naprężenie ściskające w dźwigarach a także nośność samych pierścieni przy podporze dla dźwigarów nad salą gimnastyczną.

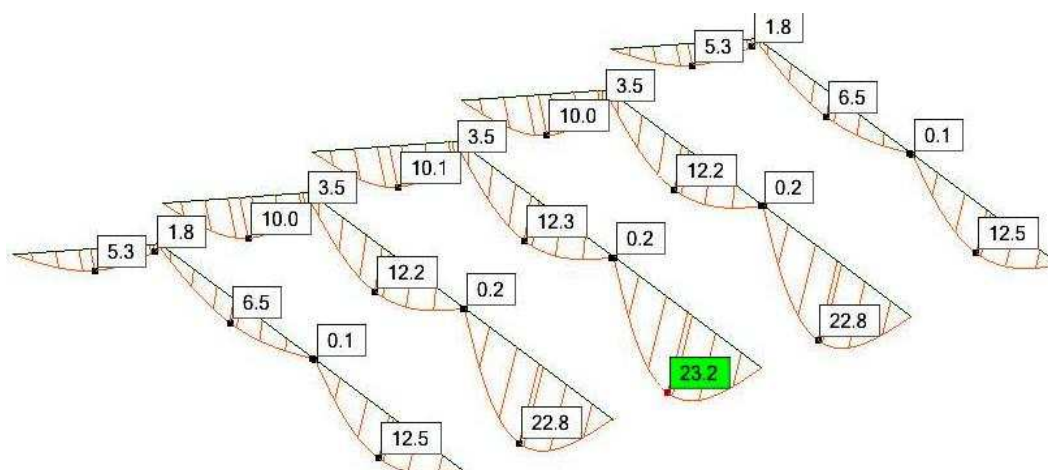
Zamiana pierścieni zębatych Geka na pierścienie typu Bulldog bez pełnej analizy statyczno-wytrzymałościowej okazała się nieprawidłowa i spowodowała, iż pierścienie nie spełniły swojej roli. W kilku miejscach powstały rozstępy pomiędzy belkami, które spowodowały, iż część płytek było praktycznie niezagłębionych w łączonych belkach i tym samym przestały one pracować. Pracować zaczęły same śruby, które nie mogły jednak spełnić swojego zadania. Co więcej oddziaływały bezpośrednio na drewno śruby (przekroczone



docisk) zaczęły przecinać drewno tworząc tzw. 'efekt noża' w wyniku czego powstały duże pęknięcia drewna na górnej i dolnej powierzchni dźwigara.



Rys. 7. Wartości momentów zginających w dźwigarach dla obciążeń obliczeniowych (ciężar własny + śnieg)



Rys. 8. Deformacja dźwigarów dla obciążeń charakterystycznych (ciężar własny + śnieg)

Konstrukcja dachu została wykonana w wadliwy sposób. Po pierwsze nie zastosowano rozwiązania ze specjalną folią wstępnego krycia jaka powinna być zastosowana dla poszycia blachą. W wyniku tego dochodzić musiało do bardzo częstego wykraplania się pary wodnej po wewnętrznej stronie blachy kryjącej, która w postaci wody (skroplin) przenikała pomiędzy płytami styropianowymi co prowadziło do zawilgocenia wełny ocieplającej dach. Ta z kolei przy zawilgoceniu traciła swoje właściwości izolacyjne Ślady zawilgocenia zauważono na suchym tynku oraz na wełnie (zmiana koloru wełny na ciemny). Utrata izolacyjności dachu doprowadzała do obniżenia się temperatury w pomieszczeniu hali sportowej, a wręcz uniemożliwiała utrzymanie właściwej temperatury eksploatacyjnej hali. Ze względu na obniżanie się temperatury hali (w okresie zimowym temperatura nie przekraczała 10-12 °C) użytkownik zatkał otwory nawiewne w ścianie zewnętrznej sali blachą na silikonie zmniejszając znacząco przewiew hali co w połączeniu z niepoprawnym wykonaniem dachu hali spowodować musiało zwiększenie wilgotności powietrza w hali i dodatkowo niekorzystnie oddziaływać na posadzkę i dźwigary tym bardziej, iż w kalenicy pomiędzy stalowym gąsiorem a arkuszami blachy wykonano uszczelnienie w postaci folii oraz pianki uniemożliwiający swobodną cyrkulację powietrza i samowysuszenie się dachu.

Brak staranności podczas montażu listew przyściennych spowodował zatkanie przewidzianych otworów wentylacyjnych posadzki co doprowadziło w konsekwencji do zawilgocenie posadzki i późniejszego jej załamania a także zagrzybienia.

Zawilgoceniu uległa nie tylko wełna ale drewno samych dźwigarów dachowych co przy obniżeniu temperatury w hali powoduje obniżanie temperatury pracy samych dźwigarów drewnianych i powoduje, że zaczynają pracować bardziej w klasie użytkowania 2 zamiast w klasie 1. Wełna i dźwigary ulegały cyklicznemu zawilgoceniu ale równie suszeniu (w sprzyjających okolicznościach temperaturowo-wilgotnościowych) szczególnie latem. Zmienne oddziaływanie wilgoci i temperatury nie pozostaje bez wpływu na stan samego drewna dźwigarów, które przy cyklach intensywnego zawilgocenia i suszenia mogło doznawać dodatkowo typowych odkształceń i pęknięć skurczowych.

Szczęśliwie zastosowano wełnę mineralną Gullfiber (stwierdzono występowanie pojedynczych płyt ze zwykłej wełny mineralnej), która nie absorbuje znacząco wilgoci i nie zwiększa swojego ciężaru objętościowego a tym samym obciążenia dźwigarów.

Poniżej wełny ocieplającej powinna być zastosowana folia, która powinna być paroizolacją (paroszczelną) od strony wnętrza hali i odbijać ciepło z powrotem do wnętrza.

Niestety zastosowano folię paroprzepuszczalną JF 96 SILVER D (przepuszczalność pary wodnej 30g/m<sup>2</sup>/24h), która jest folią wstępnego krycia na dodatek układaną raz lewą raz prawą stroną. Ponadto folia nie stanowiła szczelnej membrany a była rozłożona tylko między dźwigarami i to w taki sposób iż nie dochodziła do nich (szczeliny bezfoliowe dochodziły do 50 mm szerokości). Na pewnych odcinkach (pomiędzy skrajnymi dźwigarami a ścianami szczytowymi) w ogóle nie zastosowano folii.

## 5. Podsumowanie

W konkluzji niniejszego referatu należy stwierdzić, że w wyniku wielu błędów projektowych i wykonawczych doszło do niebezpiecznego i nadmiernego ugięcia dźwigarów oraz pęknięć drewna tych dźwigarów. Kilkakrotnie zostały przekroczone wartości dopuszczalnych ugięć a drewno doznało trwałych i nieodwracalnych deformacji a na domiar złego stan ten będzie pogłębiał się w czasie.

Techniczny stan dźwigarów oraz samego drewna belek dźwigarów był na tyle zły, iż sala gimnastyczna na wniosek autorów referatu została wyłączona z użytkowania przez Nadzór Budowlany oraz nakazano podjęcie działań zabezpieczających przed wykonaniem nowego przekrycia hali oraz poprawnego zaprojektowania i wykonania wentylacji konstrukcji.

Z przedstawionej powyżej analizy wynika wniosek, iż przy projektowaniu konstrukcji drewnianych należy zwrócić szczególną uwagę na podatność łączników a nie uwzględnienie tej podatności na etapie projektowania może nieść za sobą poważne skutki. Należy również zwracać szczególną uwagę na warunki termiczno-wilgotnościowe (klasę użytkowania) w jakich pracują elementy drewniane oraz na poprawne zaprojektowanie i wykonanie wentylacji.

## Literatura

1. PN-81/B-03150 „Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Obliczenia statyczne i projektowanie.”
2. PN-B-03150: 2000 „Konstrukcje drewniane. Obliczenia statyczne i projektowanie.”
3. Michniewicz W.: Konstrukcje drewniane. Arkady Warszawa, 1958.
4. Neuhaus H.: Budownictwo drewniane. PWT Rzeszów, 2004.