

mgr inż. Piotr Kapela<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0009-0008-0637-2194

dr hab. inż. Wojciech Kubissa<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0001-5626-7917

# Assessment of the structural condition of the roof of the historic church

## *Ocena stanu technicznego dachu zabytkowego kościoła*

DOI: 10.15199/33.2026.05.07

**Abstract.** The article describes the timber roof structure above the nave of the historic St Dominic's Church in Plock, which was subjected to investigation and a comprehensive structural analysis. It also presents an assessment of the technical condition of the roof truss, along with the identification of critical areas from the standpoint of structural safety and the continued use of the building. For this purpose, a numerical analysis was carried out using the finite element method, developing two variants of the computational model that differ in the level of structural idealisation. Based on the results of the technical diagnostics and the numerical calculations, conclusions were drawn regarding the necessary repair and strengthening measures. The strengthening works carried out on the roof structure are described, ensuring the safe continued use of the building.

**Keywords:** historic church; assessment of technical condition; structural reinforcement; finite element method; timber structures.

All structures deteriorate over time as a result of atmospheric influences and human activity. The lack of regular maintenance leads to a significant deterioration in the technical condition of the structure and an increase in the scope of necessary repair works [1]. Consequently, it becomes necessary to carry out extensive renovation works enabling the continued use of the facility. Integral parts of many historic buildings are timber structures, primarily roof trusses. Wood, as a material, is susceptible to biological corrosion [2], therefore, mycological investigations are currently carried out during technical condition assessments [3 ÷ 5]. The design of renovation works in historic buildings requires a special approach, as it is crucial to limit the number of introduced changes to the necessary minimum in order to preserve the full historical value of the structure. Such an approach requires a precise structural analysis of the system, which will identify critical areas in the structure requiring strengthening. Replacement of the roof structure is a last-resort solution and is associated not only with the loss of the historic structure, but often also with flooding of the building interior and its furnishings.

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Szkoła Doktorska

<sup>2)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii

\*) Correspondence address: piotr.kapela\_2000@gmail.com

**Streszczenie.** W artykule opisano drewnianą konstrukcję dachu nad nawą zabytkowego kościoła pw. św. Dominika w Płocku, która została poddana badaniom i kompleksowej analizie statycznej. Przedstawiono również analizę stanu technicznego więźby dachowej oraz identyfikację obszarów krytycznych z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji i dalszej eksploatacji obiektu. W tym celu przeprowadzono analizę numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych, opracowując dwa warianty modelu obliczeniowego, różniące się stopniem idealizacji układu. Na podstawie wyników diagnostyki technicznej oraz rezultatów obliczeń numerycznych przedstawiono wnioski dotyczące niezbędnych działań naprawczo-wzmacniających. Opisano wykonane prace wzmacniające konstrukcję dachu, które zapewnią bezpieczną eksploatację obiektu.

**Słowa kluczowe:** zabytkowy kościół; ocena stanu technicznego; wzmocnienia konstrukcji; metoda elementów skończonych; konstrukcje drewniane.

Wszystkie obiekty z biegiem czasu ulegają deterioracji na skutek oddziaływań atmosferycznych oraz działalności człowieka. Brak regularnej konserwacji prowadzi do znacznego pogorszenia stanu technicznego konstrukcji oraz zwiększenia zakresu niezbędnych działań naprawczych [1]. W konsekwencji konieczne staje się przeprowadzenie szeroko zakrojonych prac remontowych, umożliwiających dalsze funkcjonowanie obiektu. Integralną częścią wielu budynków zabytkowych są konstrukcje drewniane, przede wszystkim więźby dachowe. Drewno jako materiał jest podatne na korozję biologiczną [2], dlatego współcześnie podczas wykonywania oceny stanu technicznego przeprowadzane są badania mykologiczne [3 ÷ 5]. Projektowanie remontu w budynkach zabytkowych wymaga szczególnego podejścia, gdyż kluczowe jest ograniczenie liczby wprowadzanych zmian do niezbędnego minimum w celu zachowania pełnej wartości historycznej obiektu. Takie podejście wymaga precyzyjnej analizy statycznej układu, która wskaże krytyczne miejsca w konstrukcji wymagające wzmocnienia. Wymiana konstrukcji dachu jest rozwiązaniem ostatecznym i wiąże się nie tylko z utratą zabytkowej konstrukcji, ale często również zalaniem wnętrza obiektu i jego wyposażenia.

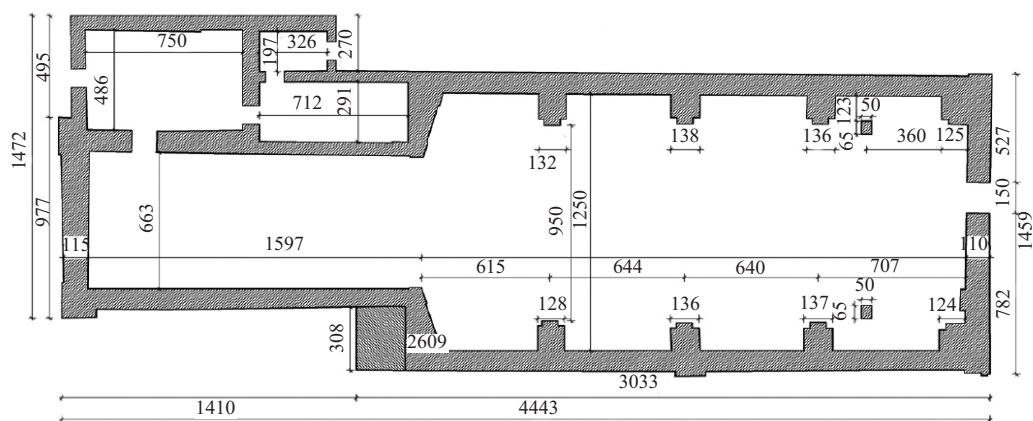
W artykule przedstawiono informacje dotyczące remontu zabytkowego kościoła św. Dominika. Początki budynku sięgają lat trzydziestych XIII w., co czyni go jednym

The article presents information concerning the renovation of the historic Church of St. Dominic. The origins of the building date back to the 1230s, which makes it one of the oldest churches in Poland [6]. The church has a single-nave layout on a rectangular plan, with a clearly separated chancel shortened to approximately half the length of the nave. The plan of the building is shown in Figure 1.

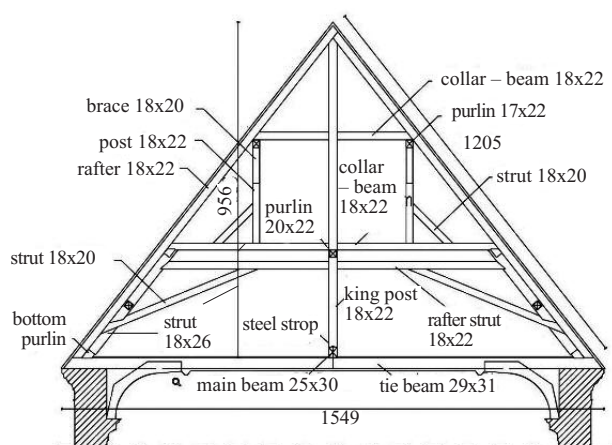
The roof truss structure dates back to the period when the monastery and church functioned as a Protestant congregation, that is, the first half of the 19th century. The church roof consists of two separate parts: above the nave and above the chancel. Above the chancel there is a two-post collar beam truss system, whereas the roof structure above the nave of the church is a mixed system. In its lower part, a single-king-post truss was used, while in the upper part a two-post collar beam truss system was used (Figure 2), in which the collar beam is supported by purlins resting on posts. The centrally located king post is fixed at the ridge Photo 1 and is additionally connected to the collar beam and the strut, increasing the stiffness of the system. A main beam is suspended from the king posts, and the tie beams are indirectly supported. Due to its large span and structural complexity, the roof above the nave is the subject of further analysis.

z najstarszych kościołów w Polsce [6]. Świątynia ma układ jednonawowy na planie prostokąta, z wyraźnie wyodrębnionym prezbiterium, skróconym w przybliżeniu do połowy długości nawy. Rzut obiektu przedstawiono na rysunku 1.

Konstrukcja więźby dachowej pochodzi z czasów, w których klasztor i kościół pełniły rolę zboru protestanckiego, a więc z pierwszej połowy XIX w. Dach kościoła składa się z dwóch oddzielnych części: nad nawą i prezbiterium. Nad prezbiterium znajduje się konstrukcja jętkowa dwustolcowa, natomiast więźba dachowa nad nawą kościoła stanowi ustrój mieszany. W części dolnej zastosowano konstrukcję wieszarowo-rozporową jednowieszakową, natomiast w części górnej – konstrukcję jętkową dwustolcową (rysunek 2), gdzie jętka podparta jest płattwami opartymi na stolcach. Centralnie usytuowany wieszak jest zamocowany w kalenicy (fotografia 1) i łączy się dodatkowo z jętką i rozporą, zwiększając sztywność układu. Na wieszakach zawieszony jest nadciąg i pośrednio belki stropowe. Ze względu na dużą rozpiętość i złożoność konstrukcyjną dach nad nawą stanowi przedmiot dalszych analiz.



**Fig. 1. Plan of St. Dominic's Church in Plock**  
Rys. 1. Plan kościoła pw. św. Dominika w Plocku



**Fig. 2. Cross-section of the roof over the nave – full truss**  
Rys. 2. Przekrój dachu nad nawą – więźba pełna



**Photo 1. Joint of the king post with the rafters**  
Fot. 1. Połączenie wieszaka z krokiewiami

### Technical condition of the building prior to renovation works

The technical condition reflects the situation in 2022, that is, prior to the execution of renovation works. Individual elements of the roof truss structure are hewn and connected using traditional carpentry joints. According to archival documentation, the last renovation of the roof structure took place in 1974. Due to the passage of time, the technical condition of the roof deteriorated. One of the main reasons for the main reasons were leakages in the roof covering, causing water penetration and moisture accumulation in the timber. The deterioration of the technical condition was also contributed to by the activity of wood-boring insect larvae. The impregnation of the roof load-bearing structure with Xylamit carried out in 1974 limited the development of their population, protecting the structure against more severe damage. At the same time, however, the use of unbarked and untreated boards for roof sheathing and flooring during the same renovation promoted secondary infestation of the structural timber by insects. In 2022, the presence of larvae of the house longhorn beetle (*Hylotrupes bajulus*) was identified in the timber. The infestation was located primarily in the lower parts of the king posts (Photo 2), rafters (Photo 3), and on the upper surfaces of collar beams and bottom purlins. The timber elements of the truss are old and made of hardwood, which, due to its age is less susceptible to damage caused by insects [7]. The most significant deterioration affects the sapwood, while no substantial damage to the heartwood has been observed. Damage to the timber roof structure is also caused by wood-decay fungi – *Serpula lacrymans*. Prismatic cracking of the timber, resulting from brown rot decay, is visible at the ends of tie beams and rafters (Photo 4). This primarily concerns the ends of rafters (Photo 5) and beams that were exposed to persistent moisture ingress, especially before the roof had been covered with roofing felt and was protected only by relatively leaky roof tiles. The development of fungi in these areas was additionally associated with moisture accumulation in hygroscopic timber elements caused by the adjacent masonry, which exhibits the ability to absorb moisture as air humidity increases.



**Photo 2.** Old feeding site of larvae of the old house borer located in the lower part of the king post

Fot. 2. Stare żerowisko larw spuszczela pospolitego zlokalizowane w dolnej części wieszaka

### Stan techniczny budynku przed pracami remontowymi

Stan techniczny obrazuje sytuację z 2022 r., a więc przed wykonaniem prac remontowych. Poszczególne elementy konstrukcji więźby dachowej są ciosane i połączone złączami ciesielskimi. Zgodnie z archiwalną dokumentacją ostatni remont konstrukcji dachu miał miejsce w 1974 r. W związku z upływem czasu stan techniczny dachu uległ pogorszeniu. Jednym z głównych powodów były nieszczelności pokrycia powodujące przecieki i zawilgocenie drewna. Do pogorszenia stanu technicznego przyczyniła się również aktywność żerujących larw owadów. Przeprowadzona w 1974 r. impregnacja konstrukcji nośnej dachu ksylamitem ograniczyła rozwój ich populacji, chroniąc konstrukcję przed większymi uszkodzeniami. Jednocześnie jednak zastosowanie podczas tego samego remontu nieokorowanych i nieimpregnowanych desek do deskowania dachu i podłogi sprzyjało wtórnemu porażeniu drewna konstrukcyjnego przez owady. W 2022 r. stwierdzono w drewnie żerowanie larw spuszczela pospolitego (*Hylotrupes bajulus*). Ogniska znajdowały się przede wszystkim w dolnych częściach wieszaków (fotografia 2), krokwi (fotografia 3) oraz na górnych powierzchniach jętek i płatwiach stopowych. Drewniane elementy więźby są stare, wykonane z twardego drewna, które ze względu na swoją wiekowość jest mniej podatne na uszkodzenia spowodowane przez owady [7]. Największe zniszczenia obejmują bielastą część drewna, przy braku istotnych uszkodzeń twardzieli. Uszkodzenia drewnianej konstrukcji dachowej są spowodowane również przez grzyby domowe – *Serpula lacrymans*. Na końcach belek i krokwi widoczne są przyrzątkowe spękania drewna będące efektem brunatnego rozkładu drewna (fotografia 4). Dotyczy to przede wszystkim końców krokwi (fotografia 5) i belek, które były narażone na stałe zamakanie szczególnie wówczas, gdy dach nie był jeszcze pokryty papą, a jedynie mało szczelną dachówką. Rozwój grzybów w tych strefach był ponadto związany z zawilgacaniem elementów drewnianych o charakterze higroskopijnym, pochodzącym od muru wykazującego zdolność do sorpcji wilgoci wraz ze wzrostem wilgotności powietrza.



**Photo 3.** Old feeding site located in the lower part of the rafter with a visible carpenter's mark

Fot. 3. Stare żerowisko zlokalizowane w dolnej części krokwi z widocznym znakiem ciesielskim



**Photo 4. Prismatic cracking at the joints between rafters bottom purlins and tie beams**

*Fot. 4. Pryzmatyczne spękanie połączenia krokwi, płatwi stopowej oraz belki więzardowej*



**Photo 5. Damage of the wall-side rafter caused by fungi**

*Fot. 5. Zniszczenie krokwi przyściennej spowodowane przez grzyby*

The assessment of the technical condition of the roof in 2022, with regard to material losses caused by biological corrosion and insect activity, was carried out using the method for evaluating the degree of element degradation described in [8]. In the literature concerning the assessment of the technical condition of historic timber buildings, other classification systems are also applied, as presented, among others, in [9]. However, the results obtained using these methods may be of a subjective nature. For this reason, the method described in [8] was adopted in this study. According to this method, three classes of element degradation are distinguished:

- D1 – characterised by timber loss at a depth of up to 1.0 cm and up to 10.0% of the cross-section; it requires only removal of the damaged wood and structural capacity calculations;

- D2 – characterised by timber loss at a depth of 1.1–3.0 cm and 10.1–25% of the cross-section; it requires structural capacity calculations and the design of strengthening measures;

- D3 – characterised by timber loss exceeding 3.0 cm and more than 25% of the cross-section; it requires removal of the entire element or its affected part (the removed element should be replaced with a new, impregnated, and unbarked one, followed by structural capacity calculations for the new system).

The depth of the losses was assessed using a 19 mm diameter wood auger and macroscopic examination of the specimen cross-section. Table 1 presents the degree of degradation of the elements within their spans. Minor losses of elements in the spans were observed, classifying them as D1.

The degree of degradation of joints mainly included categories D2 and D3, which necessitated the removal of parts of certain elements and the design of strengthening measures. The overall technical condition of the roof in 2022, determined on the basis of cross-sectional degradation, wood mass moisture content measurements, and visual inspection, **was assessed as moderate**. The condition of the ends of selected structural elements, such as rafters and ceiling beams, was considered poor.

In the analysed roof structure, full king post trusses play a key role. Bottom purlins supporting the intermediate trusses are

Ocenę stanu technicznego dachu w 2022 r., pod względem ubytków spowodowanych korozją biologiczną oraz żerowaniem owadów, przeprowadzono z wykorzystaniem metody oceny stopnia degradacji elementów opisanej w [8]. W literaturze dotyczącej oceny stanu technicznego drewnianych budynków zabytkowych stosuje się również inne klasyfikacje, przedstawione m.in. w [9]. Jednak wyniki uzyskiwane w tych metodach mogą mieć charakter subiektywny. Z tego względu w badaniach zastosowano metodę opisaną w [8]. Zgodnie z nią wyróżnia się trzy klasy degradacji elementu:

- D1 – charakteryzuje się ubytkiem drewna na głębokości do 1,0 cm i 10,0% przekroju, wymaga usunięcia jedynie zniszczonego drewna oraz obliczenia nośności;

- D2 – charakteryzuje się ubytkiem drewna na głębokości 1,1 – 3,0 cm i 10,1 – 25% przekroju; wymaga przeprowadzenia obliczeń nośności oraz zaprojektowania wzmocnienia;

- D3 – charakteryzuje się ubytkiem drewna powyżej 3,0 cm i 25% przekroju; wymaga usunięcia całego elementu bądź jego porażonej części (należy zastąpić usunięty element nowym zaimpregnowanym i nieokorowanym, a następnie przeprowadzić obliczenia nośności nowego układu).

Głębokość ubytków została oceniona przy użyciu otworownicy do drewna o średnicy 19 mm i po badaniu makroskopowym przekroju próbki. W tabeli 1 przedstawiono stopień degradacji elementów w ich przęsłach. Stwierdzono niewielkie ubytki elementów w przęsłach, klasyfikując je do klasy D1.

Stopień degradacji węzłów obejmował przede wszystkim kategorie D2 oraz D3, co spowodowało konieczność usunięcia części elementów i zaprojektowania wzmocnień. Ogólny stan techniczny dachu w 2022 r., określony na podstawie stopnia degradacji przekroju, pomiarów wilgotności masowej drewna oraz inspekcji wizualnej, **oceniono jako średni**. Stan końców wybranych elementów konstrukcyjnych, takich jak krokwie i belki stropowe, uznano natomiast za zły.

W analizowanej konstrukcji dachu kluczową rolę odgrywają więzary pełne. Opierają się na nich płatwie podpier-

**Table 1. Degree of cross-section degradation in the span of elements**

Tabela 1. Stopień degradacji przekroju w przęśle elementów

Element name and cross-section dimensions [cm]/ Nazwa elementu i wymiary przekroju [cm]	$\Delta x$ [cm]	A [cm <sup>2</sup> ]	A' [cm <sup>2</sup> ]	Loss [%]/ Ubytek [%]	Degree of cross-section degradation/ Stopień degradacji przekroju
Rafter 18 x 22/Krokiew 18 x 22	0,7	396	368,49	6,9	D1
Collar beam 18 x 22/Jętka 18 x 22	0,3	396	384,09	3,0	D1
Purlin 17 x 22/Płatew 17 x 22	0,6	374	350,96	6,2	D1
Post 18 x 22/Słupek 18 x 22	0,6	396	372,36	6,0	D1
Brace 18 x 20/Miecz 18 x 20	0,1	360	356,21	1,1	D1
Strut 18 x 20/Zastrzał 18 x 20	0,4	360	344,96	4,2	D1
Rafter strut 18 x 22/Rozpora 18 x 22	0,7	396	368,49	6,9	D1
King post 18 x 22/Wieszak 18 x 22	0,7	396	368,49	6,9	D1
Main beam 25 x 30/Nadciąg 25 x 30	0,8	750	706,64	5,8	D1
Bottom purlin 18 x 22/Płatew stopowa 18 x 22	0,7	396	368,49	6,9	D1
Tie beam 29 x 31/Belka wiązarowa 29 x 31	0,8	899	851,64	5,3	D1

where/gdzie:

$\Delta x$  – average cross-section loss caused by biological corrosion [cm]/średni ubytek przekroju spowodowany korozją biologiczną [cm];

A – cross-sectional area [cm<sup>2</sup>]/pole przekroju [cm<sup>2</sup>];

A' – reduced cross-sectional area obtained by subtracting  $\Delta x$  from the side lengths of the cross-section [cm<sup>2</sup>]/pole przekroju zmniejszone przez odjęcie  $\Delta x$  od długości boków przekroju [cm<sup>2</sup>].

based on them, and longitudinal beams (main beams) are also suspended from them, providing intermediate support for the tie beams. Due to this structural scheme, damage to a full king post truss joint may lead to redistribution of internal forces and, consequently, to exceeding the ultimate limit state not only in the truss itself but also in the elements supported on it. A significant issue concerned the structural connections, in particular the supports of rafters and struts on tie beams, the connections of king posts with the main beam, and the connections of ceiling beams with the main beam (Photos 1 and 6). Poor workmanship of carpentry joints and the presence of biological corrosion in joint zones, which prevented an unambiguous assessment of their load-bearing capacity. According to the requirements of class D1, in order to assess the load-bearing capacity of elements outside joint zones, a computational analysis of the roof structure was carried out prior to the development of renovation recommendations.



Photo 6. Joint of the king post with the main beam  
Fot. 6. Połączenie wieszaka z nadciągami

jące wiązary niepełne, a także podwieszane są do nich belki podłużne (nadciąg), stanowiące środkową podpórę belek stropowych. Ze względu na taki schemat statyczny, uszkodzenie węzła wiązara pełnego może prowadzić do redystrybucji sił wewnętrznych i w konsekwencji do przekroczenia stanu granicznego nośności nie tylko w samym wiązarze, lecz również w elementach na nim opartych. Istotny problem stanowiły połączenia konstrukcyjne, szczególnie oparcia krokwi i zastrzałów na belkach wiązarowych, wieszaków z nadciągami oraz belek stropowych z nadciągami (fotografie 1 i 6). Stwierdzono złą jakość wykonania złączy ciesielskich oraz obecność korozji biologicznej w strefach połączeń, co uniemożliwiało jednoznaczną ocenę ich nośności. Zgodnie z wymaganiami klasy D1, w celu oceny nośności elementów poza strefami węzłowymi, przed opracowaniem zaleceń remontowych przeprowadzono analizę obliczeniową konstrukcji dachu.

## Analysis of FEM Models

To develop finite element method models, a spatial inventory obtained using 3D laser scanning was applied. Such an approach is currently widely used in the analysis of existing structures [10 ÷ 12]. The 3D inventory is highly accurate (typically 3 – 5 mm) and allows not only precise determination of structural geometry, but also of

## Analiza modeli MES

Do stworzenia modeli wykorzystujących metodę elementów skończonych wykorzystano inwentaryzację przestrzenną za pomocą skaningu laserowego 3D. Takie podejście jest obecnie powszechnie stosowane w analizach istniejących konstrukcji [10 ÷ 12]. Inwentaryzacja 3D jest dokładna (zwykle 3 do 5 mm) i pozwala nie tylko na precyzyjne określenie geometrii

deformations and deflections of elements. This provides a significantly better representation of the behaviour of historic structures after years of service. In comparison, methods based on traditional surveying techniques are not capable of faithfully reproducing numerous imperfections and are suitable only for the analysis of simple truss structures.

In the available literature concerning historic timber roofs, there is a lack of clear and systematic comparisons between planar and spatial numerical models, particularly in relation to structures with complex configurations. Therefore, for the structure presented in Figure 3, a comparison between a planar model and a spatial model was carried out (Figure 4).

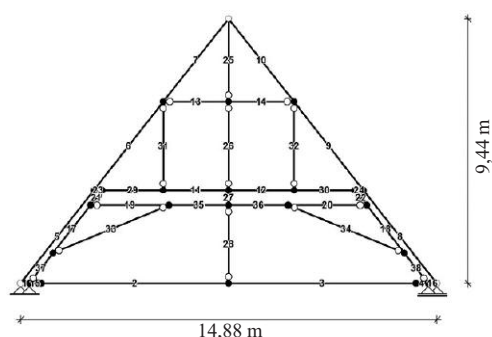


Fig. 3. Model created in the Specbud software  
Rys. 3. Model wykonany w programie Specbud

The computational models take into account a reduction of the cross-section by the average loss  $\Delta x$  in both directions along the entire length of the elements. The roof truss members were modelled as elastic beam elements in accordance with the Euler–Bernoulli theory of bending of slender beams. Boundary conditions in both models included pinned connections as well as roller and fixed supports, which is a conservative and more realistic approach compared to modelling the joints as fully fixed connections [13].

The determination of the actual stiffness of timber joints in historic structures is complex, and the number of available publications on this topic remains limited to only a few types of connections [14 ÷ 17]. The beam elements were assigned a linear elastic material model corresponding to timber class C27 in accordance with [18]. The timber class was estimated based on volumetric density testing, determined at a moisture content of 10.8% and equal to  $458 \text{ kg/m}^3$ , as well as macroscopic examinations including assessment of growth ring width, number, and size of knots. Such an approach is considered appropriate for historic timber structures [19, 20]. The same approach, in terms of beam modelling, their connections, boundary conditions, and material properties, was applied in the analysis of the structural behaviour of Notre-Dame Cathedral in Paris [21]. The results for selected elements are presented in Table 2. The utilisation

konstrukcji, ale również występujących odkształceń i ugięć elementów. Daje to znacznie lepszy obraz zachowania się konstrukcji zabytkowych po latach eksploatacji. W porównaniu z nią metody wykorzystujące tradycyjne techniki pomiaru nie są w stanie wiernie odwzorować licznych imperfekcji i nadają się jedynie do analizy prostych konstrukcji więzarych.

W dostępnej literaturze, dotyczącej zabytkowych dachów drewnianych, brakuje jednoznacznych i systematycznych porównań numerycznych modeli płaskich i przestrzennych, szczególnie w odniesieniu do obiektów o złożonym ustroju. W związku z tym w przypadku konstrukcji przedstawionej na rysunku 3 przeprowadzono porównanie modelu płaskiego z modelem przestrzennym (rysunek 4).

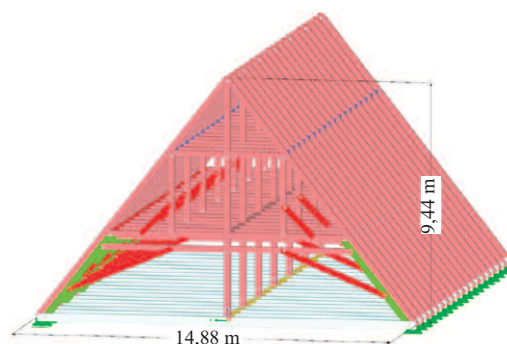


Fig. 4. Model created in the Dlubal RFEM software  
Rys. 4. Model wykonany w programie Dlubal RFEM

Modele obliczeniowe uwzględniają pomniejszenie przekroju o średni ubytek  $\Delta x$  w obu kierunkach na całej długości elementów. Elementy więzby dachowej zamodelowano jako elastyczne pręty belkowe zgodnie z teorią Eulera–Bernoulliego dotyczącą zginania pręta płaskiego. Jako warunki brzegowe w obu modelach przyjęto połączenia przegubowe oraz podpory przesuwne i nieprzesuwne, co jest podejściem konserwatywnym i bardziej realistycznym w porównaniu z modelowaniem połączeń jako utwierdzonych [13].

Określenie rzeczywistej sztywności połączeń drewnianych w obiektach zabytkowych jest złożone, a liczba dostępnych publikacji na ten temat pozostaje ograniczona do kilku typów węzłów [14 ÷ 17]. Prętom zadano liniowo sprężysty model materiałowy odpowiadający klasie drewna C27 zgodnie z [18]. Klasę drewna oszacowano na podstawie badania gęstości

objętościowej, określonej przy wilgotności 10,8% i wynoszącej  $458 \text{ kg/m}^3$ , oraz badań makroskopowych, obejmujących ocenę szerokości słoju, liczby i wielkości sęków. Takie podejście jest uznawane za odpowiednie w przypadku zabytkowych konstrukcji drewnianych [19, 20]. Tożsame podejście, jeśli chodzi o modelowanie prętów, ich połączeń, warunki brzegowe oraz właściwości materiałowe, zastosowano w analizie pracy układu katedry Notre-Dame w Paryżu [21]. Wyniki dotyczące wybranych elementów zamieszczono w tabeli 2.

Table 2. Comparison of the utilization ratios of the primary elements in the planar and spatial models  
Tabela 2. Porównanie wyęteżenia podstawowych elementów modelu płaskiego i przestrzennego

Structural element/Element konstrukcyjny	Utilization of/Wyęteżenie	
	planar model/model płaski [%]	spatial model/model przestrzenny [%]
Strut/Rozpora	67	45
Rafter/Krokiew	38	30
Tie beam/Belka więzary	28	25

of selected elements in the planar model is higher than the corresponding utilisation in the spatial model. In the case of the strut, the difference in utilisation reaches as much as 33%. This is caused by the redistribution of forces to longitudinal elements in the spatial model, which are not taken into account in the planar model.

The planar model in this case is on the safe side; however, it assumes unrealistic structural behaviour of the system. The use of a planar model for the analysis of complex systems in historic roof trusses may lead to unnecessary modifications and to potentially incorrect conclusions regarding the structural behaviour. Due to the low utilisation levels observed in the elements, the analysis of the models did not indicate the need for strengthening the structure in areas outside the joints.

### Implementation of renovation works

Based on the assessment of the technical condition and structural and strength calculations, a roof renovation design was developed and approved by the heritage conservation authority. The following works have been carried out to date:

- 1) impregnation combined with disinfection of the roof structure was carried out, and the floor boards were replaced;
- 2) after impregnation, the connections between tie beams and rafters were strengthened using timber overlay elements (Photo 7). The new timber elements were air-dried and pressure-treated with agents protecting against biological corrosion;
- 3) steel elements were used to strengthen the ridge connections of rafters (Photo 8), as well as the connections of king posts with the main beam and tie beams (Photo 9);
- 4) the floor boards were replaced with new, impregnated ones (Photo 10);
- 5) thermal insulation of the ceiling was installed using a 15 cm layer of cellulose wool and covered with a highly vapour-permeable roofing membrane.



**Photo 7. Implementation of the strengthening of the joint connecting the rafter and the beam**

*Fot. 7. Realizacja wzmocnienia węzła łączącego krokiew i belkę*

Uzyskane wyężnienie wybranych elementów w modelu płaskim są większe niż odpowiadające im wyężnienia w modelu przestrzennym. W przypadku rozpory różnica w wyężnieniu wynosi aż 33%. Jest to spowodowane redystrybucją sił do elementów podłużnych w modelu przestrzennym, które nie są uwzględniane w modelu płaskim.

Model płaski w tym przypadku znajduje się po bezpiecznej stronie, ale zakłada nierealistyczne warunki pracy układu. Stosowanie modelu płaskiego do analizy złożonych ustrojów w zabytkowych więźbach dachowych może prowadzić do niepotrzebnych zmian oraz formułowania potencjalnie błędnych wniosków dotyczących pracy konstrukcji. Ze względu na małe wyężnienia występujące w elementach, analiza modeli nie wykazała potrzeby wzmocniania konstrukcji w częściach pozawęzłowych.

### Realizacja prac remontowych

Na podstawie oceny stanu technicznego oraz obliczeń statyczno-wytrzymałościowych opracowany został projekt remontu dachu, zaakceptowany przez konserwatora zabytków. Dotychczas wykonano następujące prace:

- 1) przeprowadzono impregnację połączoną z dezynsekcją konstrukcji dachu i wymianę desek podłogowych;
- 2) po impregnacji wzmocniono połączenia belek i krokwi nakładkami (fotografia 7); nowe elementy drewniane były powietrzno-suche i ciśnieniowo zabezpieczone środkami przeciw korozji biologicznej;
- 3) elementami stalowymi wzmocniono połączenia krokwi w kalenicy (fotografia 8) oraz wieszaków z nadciągami i belkami wiązarowymi (fotografia 9);
- 4) dokonano wymiany desek podłogowych na nowe, zaimpregnowane (fotografia 10);
- 5) wykonano ocieplenie stropu warstwą wełny celulozowej grubości 15 cm oraz przykrycie membraną dachową o dużej paroprzepuszczalności.



**Photo 8. Implementation of the strengthening of the joint between the rafter and the king post at the ridge**

*Fot. 8. Realizacja wzmocnienia połączenia krokwi i wieszaka w kalenicy*



**Photo 9. Implementation of the strengthening of the joint between the king post and the main beam**

*Fot. 9. Realizacja wzmocnienia połączenia wieszaka z nadciągim*

The ceiling insulation will contribute to reducing heating costs, increasing temperature stability inside the church, and improving the indoor microclimate. The renovation works carried out in the Church of St. Dominic in Plock should ensure the safe use of the structure for many years. The article describes the applied strengthening measures; however, they do not represent the only possible solution. A review of strengthening methods and examples of their application is presented in [8, 22].

### Summary

The assessment of the technical condition of the roof truss above the nave of the Church of St. Dominic in Plock demonstrated the necessity of undertaking repair and protective measures. Of critical importance was the strengthening and securing of structural joints, in which local reductions in cross-sections and degradation of timber material were identified, caused by insect larval activity and the development of biological corrosion. The performed numerical analysis using the finite element method revealed the existence of significant load-bearing reserves within the spans of the elements, while simultaneously showing a considerable variation in results obtained for models with different levels of idealisation. These differences concerned both displacement values and cross-sectional utilisation, which may result from different representations of the spatial stiffness of the system. The obtained results may indicate a tendency of the planar model to concentrate internal forces, leading to an apparent increase in element utilisation in the ultimate and serviceability limit state analyses. The use of planar models in the analysis of complex historic roof truss systems could therefore lead to unnecessary interventions from a technical point of view, thereby disturbing the integral historical value of the monument.

Historic buildings require a comprehensive technical assessment performed by a specialist, as well as a thorough analysis of structural behaviour, allowing the real condition of the system to be faithfully represented in the computational



**Photo 10. Lower part of the roof structure after strengthening**

*Fot. 10. Dolna część więźby po wykonaniu wzmocnień*

Ocieplenie stropu przyczyni się do zmniejszenia kosztów ogrzewania, zwiększenia stabilności temperatury we wnętrzu kościoła oraz poprawy mikroklimatu. Przeprowadzone prace remontowe w kościele św. Dominika w Płocku powinny zapewnić bezpieczne użytkowanie konstrukcji przez wiele lat. W artykule opisano zastosowane wzmocnienia. Nie stanowi ono jedyne go możliwego rozwiązania. Przegląd metod wzmacniania oraz przykłady ich zastosowania przedstawiono w [8, 22].

### Podsumowanie

Ocena stanu technicznego więźby dachowej nad nawą kościoła św. Dominika w Płocku wykazała konieczność podjęcia działań remontowo-zabezpieczających. Krytyczne znaczenie miało wzmocnienie oraz zabezpieczenie węzłów konstrukcyjnych, w których stwierdzono lokalne osłabienie przekrojów i degradację materiału drzewnego, spowodowaną zerowaniem larw owadów oraz rozwojem korozji biologicznej. Przeprowadzona analiza numeryczna, z wykorzystaniem metody elementów skończonych, wykazała istnienie dużych rezerw nośności elementów w obrębie przęśla, przy jednoczesnym istotnym zróżnicowaniu rezultatów obliczeń uzyskanych w przypadku modeli o różnym stopniu idealizacji. Różnice te dotyczyły zarówno wartości przemieszczeń, jak i wyteżenia przekroju, co może wynikać z odmiennego odwzorowania sztywności przestrzennej układu. Uzyskane wyniki mogą wskazywać na tendencję modelu płaskiego do koncentracji sił wewnętrznych, powodujących pozorne zwiększenie wyteżenia elementów w analizie stanu granicznego nośności i użyteczności. Używanie modeli płaskich w analizie złożonych, historycznych układów więźb dachowych mogłoby doprowadzić do zmian zbędnych z technicznego punktu widzenia, zaburzając integralną wartość historyczną zabytku.

Budynki zabytkowe wymagają kompleksowej oceny technicznej, wykonanej przez specjalistę oraz wnikliwej analizy pracy układu, pozwalającej na wierne odwzorowanie stanu rzeczywistego w modelu obliczeniowym. Decyzje dotyczące

model. Decisions regarding the scope and technology of repair works should be made in consultation with the relevant heritage conservation authority. Such an approach enables the preservation of full historical value, minimisation of intervention in the historic structure, and extension of the safe service life of the building.

*Photo and figures: P. Kapela*

*Received: 12.01.2026*

*Revised: 02.03.2026*

*Published: 21.05.2026*

zakresu i technologii robót remontowych powinny być podejmowane w trybie uzgodnień z właściwym organem ochrony zabytków. Takie postępowanie umożliwi zachowanie pełnej wartości historycznej, minimalizację ingerencji w konstrukcję zabytkową oraz wydłużenie okresu bezpiecznej eksploatacji obiektu.

*Fotografie i rysunki: P. Kapela*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 12.01.2026 r.*

*Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.03.2026 r.*

*Opublikowano: 21.05.2026 r.*

## Literature

- [1] Nowogońska B, Drobiec J. Prevention of failure of heritage buildings through diagnostic testing using the example of testing of roof structure elements from the 15th century. *Engineering Failure Analysis*. 2025. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2025.109709.
- [2] Arriaga F, Wang X, Íñiguez-González G, Llana DF, Esteban M, Niemi P. Mechanical Properties of Wood: A Review. *Forests*. 2023. DOI: 10.3390/f14061202.
- [3] Grzyb K, Drobiec Ł, Zając J. Stan techniczny i wytyczne remontu zabytkowego kościoła w Zakopanem – Harendzie. *Construction Materials*. 2022. DOI: 10.15199/33.2022.05.05.
- [4] Palma P, Steiger R. Structural health monitoring of timber structures – Review of available methods and case studies. *Construction and Building Materials*. 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118528.
- [5] Mączyński D. Konstrukcyjne drewno zabytkowe – rozszerzone metody badań na przykładzie dawnych więźb dachowych. 2020. DOI: 10.35784/odk.1291.
- [6] „kościół, ob. parafialny pw. św. Dominika – Zabytek. pl”. Dostęp: 10 marca 2026. [Online]. Dostępne na: <https://zabytek.pl/pl/obiekty/plock-kościol-ob-par-pw-sw-dominika>.
- [7] Zhang J et al. Influence of wood species and natural aging on the mechanical properties and microstructure of wood. *Journal of Building Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.job.2024.109469.
- [8] Ochrona przed wilgocią i korozją biologiczną w budownictwie: praca zbiorowa/pod red. Jerzego Karysia; [aut. Jerzy Karyś, et al.]. Warszawa: Grupa Medium, 2014.
- [9] Keller AI, Mosoarca M. Historic timber roof structure vulnerability assessment procedures – Critical analysis and comparison. *Journal of Cultural Heritage*. 2024. DOI: 10.1016/j.culher.2023.11.011.
- [10] Özkan T, Lavric I, Hochreiner G, Pfeifer N. Automated 3D Modeling vs. Manual Methods: A Comparative Study on Historic Timber Tower Structure Assessment. *Remote Sensing*. 2025. DOI: 10.3390/rs17030448.
- [11] Özkan T, Pfeifer N, Styhler-Aydın G, Hochreiner G, Herbig U, Döring-Williams M. Historic Timber Roof Structure Reconstruction

- through Automated Analysis of Point Clouds. *J. Imaging*. 2022. DOI: 10.3390/jimaging8010010.
- [12] Pöchtrager M, Hochreiner G, Pfeifer N, Wien T. Processing 3D Point Clouds of Historical Timber Structures for Analysing their Structural Behaviour pressed for Time. 2018.
- [13] Mackiewicz M, Zimiński K, Pawłowicz JA, Knyziak P. Evaluation of the historic wooden structure condition based on the results of non-destructive tests. *Engineering Failure Analysis*. 2024. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108116.
- [14] Karolak A, Jasińko J. Static behaviour of the selected carpentry joints in the flexural elements. *Journal of Building Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.job.2023.108225.
- [15] Baniotopoulos CC, Wald F. Red., The Paramount Role of Joints into the Reliable Response of Structures, t. 4. w *Mathematics. Physics and Chemistry*, no. II, vol. 4. Dordrecht: Springer Netherlands. 2000. DOI: 10.1007/978-94-010-0950-8.
- [16] Baszeń M. Semi-rigid Behavior of Joints in Wood Light-frame Structures. *Procedia Engineering*. 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.022.
- [17] Branco J, Descamps T. Analysis and strengthening of carpentry joints. *Construction and Building Materials*. 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.089.
- [18] PN-EN 338:2016 Drewno konstrukcyjne – Klasy wytrzymałości.
- [19] PN-EN 17121:2020-01 Konserwacja dziedzictwa kulturowego – Historyczne konstrukcje drewniane – Wytyczne dotyczące oceny i projektowania, Polski Komitet Normalizacyjny. 2020.
- [20] Nowak T, Patalas F, Karolak A. Estimating Mechanical Properties of Wood in Existing Structures – Selected Aspects. *Materials*. 2021. DOI: 10.3390/ma14081941.
- [21] Vannucci P. A study on the structural functioning of the ancient charpente of Notre-Dame, with a historical perspective. *Journal of Cultural Heritage*. 2021. DOI: 10.1016/j.culher.2021.02.007.
- [22] Abramyan SG, Ishmametov RK. Strengthening Timber Roof Trusses During Building Construction and Reconstruction. *Procedia Engineering*. 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.253.