

Krzysztof Ałykow*

orcid.org/0000-0002-5526-4551

Jerzy Jasieńko**

orcid.org/0000-0002-8574-6121

Romuald Tarczewski***

orcid.org/0000-0003-2033-3104

Wpływ uwzględnienia przekształceń, odkształceń oraz sposobu podparcia zabytkowej konstrukcji ciesielskiej na wyniki analizy statyczno-wytrzymałościowej na przykładzie ewangelickiego kościoła Zbawiciela w Jeleniej Górze-Cieplicach

Impact of Alterations, Deformation, and Type of Support of a Baroque Timber Truss on the Results of a Static Analysis: Case of the Evangelical Our Savior's Church in Jelenia Góra-Cieplice

Słowa kluczowe: dziedzictwo architektoniczne, historyczne konstrukcje ciesielskie, wzmocnienie konstrukcji, barokowe dachy

Keywords: Architectural Heritage, Historical Carpenter Construction, Structure Strengthening, Baroque Roofs

Wprowadzenie

Kościół Zbawiciela w Cieplicach (ryc. 1) został zbudowany w latach 1774–1777 na miejscu wcześniejszej budowli – drewnianego domu modlitwy [Dannenberg, Donath 2014] wzniesionego w 1741 r. Obiekt wpisano do rejestru zabytków 10 października 1964 pod numerem A/20131/1136.

Budynek z wieżą od zachodu, z pojedynczą nawą na rzucie prostokąta o długości 34,31 m, szerokości 22,76 m i kubaturze 18 930 m³, przekryto dachem mansardowym. Nawę w kształcie pośrednim między prostokątem a krzyżem z dwiema kondygnacjami wspartymi na kolumnach drewnianych empor przekrywa pseudokoleba z tynkiem.

Introduction

Our Savior's Church in Cieplice (Fig. 1) was built between 1774 and 1777 at the site of a former building, i.e., a wooden prayer house [Dannenberg, Donath 2014] erected in 1741. It became a listed building on October 10, 1964, entry No. A/20131/1136.

The building has a tower at the west end. It has a single nave, designed on a rectangular plan, 34.31 m long and 22.76 m wide; its volume is 18,93 m³, and it is topped with a mansard roof. Its two-story nave, with a compound shape between a rectangle and cross, rests on the columns of the wooden galleries and has a barrel-vaulted ceiling.

* dr inż., Zespół Inżynierów Ałykow

** prof. dr hab. inż., Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

*** prof. dr hab. inż., Politechnika Wrocławska, Wydział Architektury

* *Ph.D. Eng., Ałykow Zespół Inżynierów*

** *Prof. D.Sc. Ph.D. Eng., Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Science and Technology*

*** *Prof. D.Sc. Ph.D. Eng., Faculty of Architecture, Wrocław University of Science and Technology*

Cytowanie / Citation: Ałykow K., Jasieńko J., Tarczewski R. Impact of Alterations, Deformation, and Type of Support of a Baroque Timber Truss on the Results of a Static Analysis: Case of the Evangelical Our Savior's Church in Jelenia Góra-Cieplice. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2024, 78:29–45

Otrzymano / Received: 6.09.2023 • Zaakceptowano / Accepted: 29.02.2024

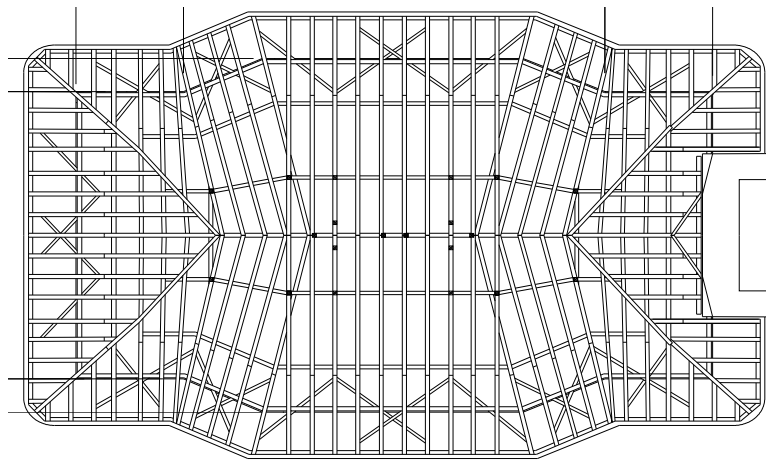
doi: 10.48234/WK78TRUSS

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews



Ryc. 1. Kościół Zbawiciela w miejscowości Cieplice, widok ogólny (z lewej), widok nawy (z prawej), 2012; fot. K. Ałykow.
 Fig. 1. The Church in Cieplice. General view (left), view of the nave (right), 2012; photo by K. Ałykow.



Ryc. 2. Rzut więźby dachowej; wszystkie rysunki oprac. K. Ałykow.
 Fig. 2. Roof truss structural plan; all Figures by K. Ałykow.

Kościół Zbawiciela w Jeleniej Górze-Cieplicach jest podręcznikowym przykładem typowych rozwiązań technicznych [Rapp, Ganowicz 2000] stosowanych przy wznoszeniu XVIII-wiecznych ciesielskich konstrukcji więźb dachowych barokowych kościołów halowych [Gronostajska et al. 2022] w zachodniej części Dolnego Śląska [Ałykow, Napiórkowska-Ałykow 2017], wzmocnianych w połowie XIX w. poprzez wbudowanie dodatkowych elementów konstrukcyjnych.

Opis konstrukcji ciesielskiej

Więźba dachowa w obecnym kształcie (ryc. 2) to więźba mansardowa wolna jednowieszakowa z drewnianą kolebą otynkowaną od spodu, jętkowa, zredukowana podłużnie z co trzecim wiązarem pełnym.

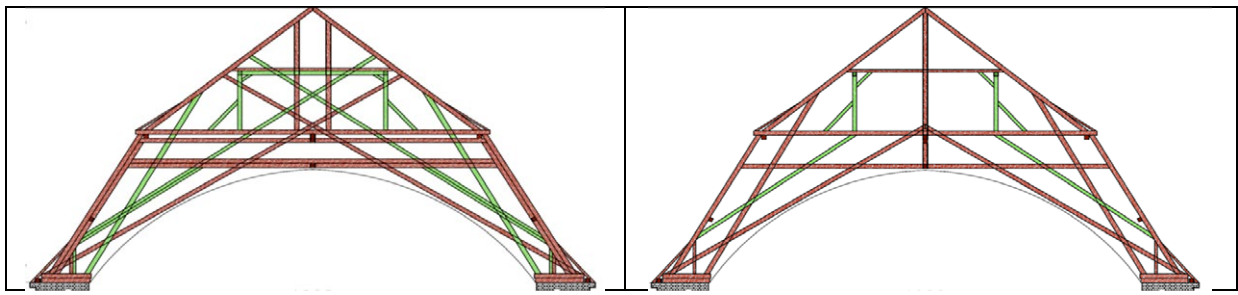
Wiązar pełny złożony z krokwi połaciowych i krokwi mansardowych z przypustnicami, wieszaka, belki wiązarowej, rygli, usztywniony parami równoległych zastrzałów w obrębie mansardy oraz dodatkową parą zastrzałów. Brak mieczy stopowych podłużnych i poprzecznych. Więźba usztywniona podłużnie para-

Our Savior's Church in Jelenia Góra-Cieplice is a textbook example of the typical technological solutions [Rapp, Ganowicz 2000] used for constructing eighteenth-century timber roof trusses in Baroque hall churches [Gronostajska et al. 2022] in the western part of Lower Silesia [Ałykow, Napiórkowska-Ałykow 2017], reinforced in the middle of the nineteenth century by incorporating some additional structural elements.

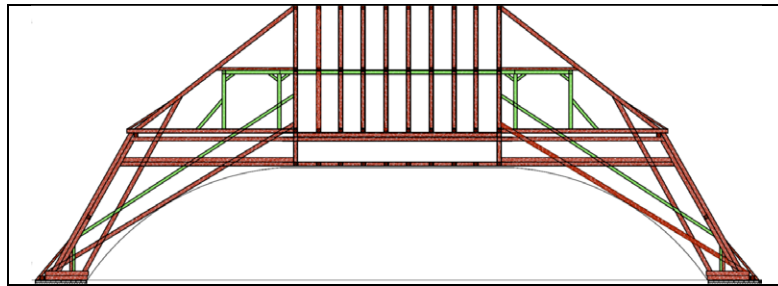
Timber roof truss description

In its present form, the timber roof truss (Fig. 2) is a mansard truss with a single post and wooden barrel vault with a plastered ceiling, a single-post truss with a collar beam, longitudinally reduced, with every third truss as full.

A full truss consists of rafters and mansard rafters with false rafters, a hang post, a tie beam, noggins, braced by pairs of parallel struts within the mansard area, and an additional pair of struts. There were no longitudinal or transverse webs used. The truss structure is braced with pairs of long struts in the shape of



Ryc. 3. Wiązary pełny, wiązar niepełny.
Fig. 3. Full truss, reduced truss.



Ryc. 4. Przekrój podłużny.
Fig. 4. Longitudinal Section.

mi długich zastrzałów w formie krzyża św. Andrzeja i wzmocniona dodatkowymi zastrzałami pomiędzy podwaliną a dolnym rygłem. Stopa w formie belki kulawkowej wspartej na namurnicy.

Część wiązarów pełnych jest dodatkowo wzmocniona elementami drewnianymi albo ma dwa wieszary lub stolce leżące. W obrębie skosów (zweżenia nawy) wiązary zredukowane o zmiennej rozpiętości, dostosowane do zmniejszającego się rozstawu murów, asymetryczne w formie połowy wiązara nawy, umiejscowione pod kątem do głównej osi symetrii. W obrębie wieży i szczytu wiązary prostopadłe do głównej osi symetrii z górną częścią równomiernie dostosowaną do nachylenia połaci dachu kopertowego.

W wyniku analizy układu konstrukcji więzby dachowej, deformacji poszczególnych elementów, jak również połączeń ciesielskich dokonano rozwarstwienia historycznego etapów budowy, wyniki zaś zaprezentowano w formie graficznej. Na rysunkach przedstawiono wiązary pełne (ryc. 3) i podłużne układy usztywniające (ryc. 4). Kolorem brązowym oznaczono elementy oryginalne, natomiast zielonym elementy wzmocnień dokonanych po upływie ok. 100 lat, w drugiej połowie XIX w. [Alykow, Napiórkowska-Alykow 2015].

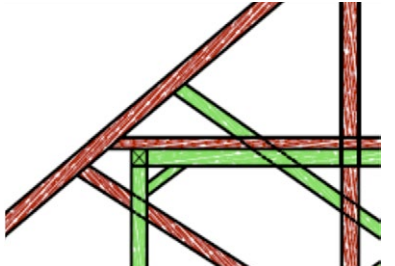

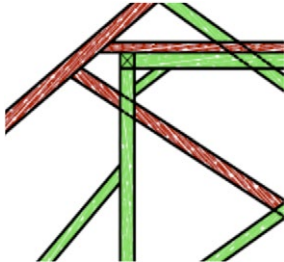

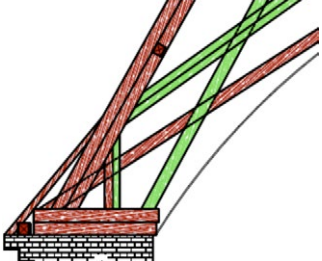

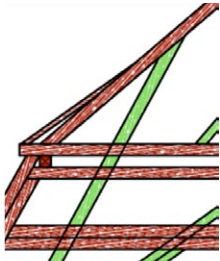

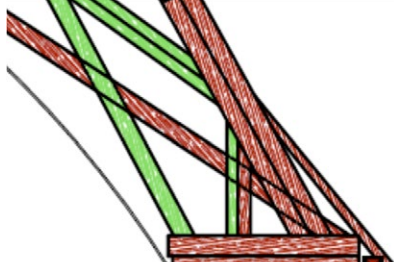

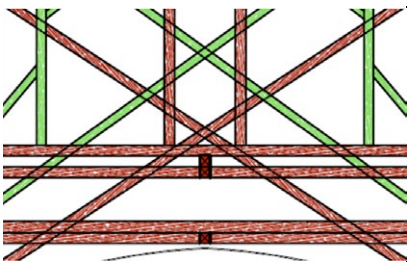

Przeprowadzono rozpoznanie połączeń ciesielskich w obrębie rozpatrywanej konstrukcji ciesielskiej, z uwzględnieniem zinwentaryzowanych przekrojów poprzecznych poszczególnych belek i sposobu ich połączenia. Równoległe z badaniami architektonicznymi drewnianej konstrukcji dachowej przeanalizowano połączenia ciesielskie w kontekście całej konstrukcji prętowej i określono, czy są one pierwotne, czy wtórne [Alykow 2021] (tab. 1).

Saint Andrew's Cross and braced with some additional struts between the top plate and the lower noggin. The base plate is in the form of a jack rafter which rests on the wall plate.

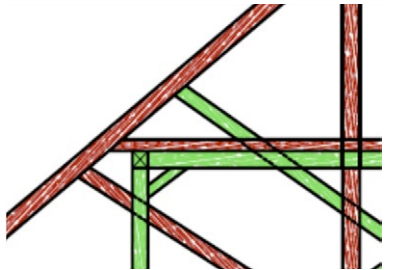

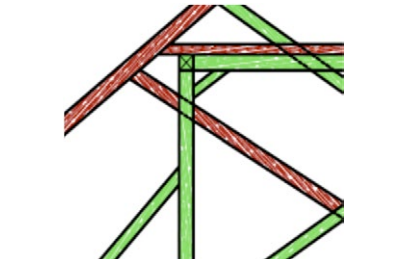

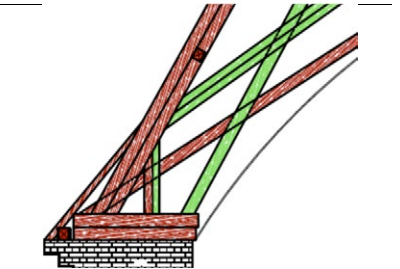

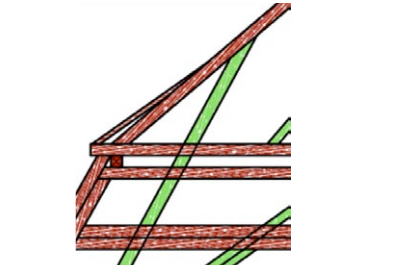



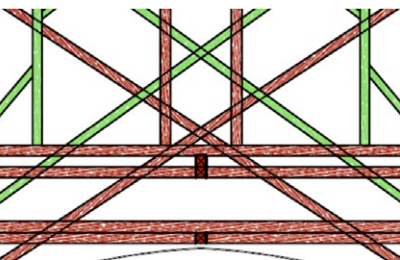

Some of the full trusses are additionally reinforced with wooden elements or have two posts or web ties. In the area of the haunches (the nave narrowing), the trusses are reduced and have a variable span the width of which is adjusted to the decreasing spacing between the walls. They are asymmetrical in the form of half a nave truss and are positioned at an angle with the main axis. Within the tower and the roof ridge, the trusses are perpendicular to the main axis, with the top part evenly adjusted to the slope of the hip roof.

As a result of the analysis of the roof truss structure as well as the deformation of its individual elements and the woodworking joints, a historic stratification of the building phases was made with the results presented in a graphic form. The figures show the full trusses (Fig. 3) and longitudinal bracing systems (Fig. 4). The original elements are marked in brown and the reinforcement elements, introduced ca. a hundred years later, in the second half of the nineteenth century, are marked in green [Alykow, Napiórkowska-Alykow 2015].

An analysis of the carpentry connections within the carpentry structure under consideration was carried out, taking into account the inventoried cross sections of the individual beams and how they were connected. At the same time with the architectural survey of the timber roof structure, the carpentry connections were analyzed in the context of the entire bar structure and it was determined whether they were original or secondary [Alykow 2021] (Tab. 1).

Typ złącza	Przykładowa lokalizacja	Przykładowe zdjęcie	Chronologia połączenia
nakładkowe w jaskółczy ogon			pierwotne/ wtórne
czopy proste			wtórne
czopy ukośne			pierwotne/ wtórne
wrąb pełny			wtórne
klamry			wtórne
zacięcie przelotowe			pierwotne/ wtórne

Tab. 1. Zestawienie rozpoznanych połączeń ciesielskich.

Type of joint	Example of location	Sample photo	Chronology of joints
dovetailed lap joint			original/ secondary
simple mortise and tenon			secondary
sloped mortise and tenon			original/ secondary
single abutting joint			secondary
blacksmith brace			secondary
sloped notched and halved joint			original/ secondary

Tab. 1. Identified carpentry joints.

Budowla	kościół Zbawiciela w Cieplicach
Okres budowy	1774–1777
Typ dachu	mansardowy
Typ konstrukcji	więźba wolna, jednowieszakowa, jętkowa, zredukowana podłużnie z co trzecim wiązarem pełnym
Sklepienie	pseudokoleba drewniana z tynkiem
Opis systemu konstrukcji	Wiązar pełny złożony z krokwi pościowych i krokwi mansardowych z przypustnicami, wieszaka, belki wiązarowej, rygli, usztywniony parami równoległych zastrzałów w obrębie mansardy oraz dodatkową parą zastrzałów. Brak mieczy stopowych podłużnych i poprzecznych. Więźba usztywniona podłużnie parami długich zastrzałów w formie krzyża św. Andrzeja i wzmocniona dodatkowymi zastrzałami pomiędzy podwaliną a dolnym rygłem. Stopa w formie belki kulawkowej wspartej na namurnicy. Część wiązarów pełnych jest dodatkowo wzmocniona elementami drewnianymi albo ma dwa wieszary lub stolce leżące. W obrębie skosów (zwężenia nawy) wiązary zredukowane o zmiennej rozpiętości, dostosowane do zmniejszającego się rozstawu murów, asymetryczne w formie połowy wiązara nawy, umiejscowione pod kątem do głównej osi symetrii. W obrębie wieży i szczytu wiązary prostopadłe do głównej osi symetrii z górną częścią równomiernie dostosowaną do nachylenia połaci dachu kopertowego.
Uszkodzenia	naturalne zużycie materiału
Konserwacja	1848
Połączenia ciesielskie	nakładkowe w jaskółczy ogon, czopy proste, czopy ukośne, wrąb pełny, klamry, zacięcie przelotowe
Krokwie (wys./szer.) [cm]	17/20
Płatwie (wys./szer.) [cm]	17/20, 19/20, 18/20, 18/21 (płatew kalenicowa)
Namurnica (wys./szer.) [cm]	20/20
Podwalina (wys./szer.) [cm]	17/22
Rygle (wys./szer.) [cm]	17/20, 18/20 (poprzeczne), 16/16, 17/22, 18/20, 18/21
Stolce (wys./szer.) [cm]	18/22
Stolce leżące (wys./szer.) [cm]	17/20
Wieszaki (wys./szer.) [cm]	20/18
Jętki (wys./szer.) [cm]	18/13, 20/23
Belki wiązarowe (wys./szer.) [cm]	17/22
Zastrzały (wys./szer.) [cm]	16/12, 16/18, 15/16, 17/20
Miecze (wys./szer.) [cm]	12/12, 15/15
Rozstaw osiowy krokwi [m]	1,15
Rozpiętość więźby [m]	23,58
Nachylenie połaci dachu	40°, 61° (mansarda)
Wysokość więźby [m]	13,60
Stopień zużycia drewna na 1 m ² połaci dachu	0.14 m ³
Rodzaj budulca	drewno lite świerkowe/sosnowe

Tab. 2. Typologia analizowanej konstrukcji ciesielskiej.

Typologię analizowanego obiektu na podstawie elementów konstrukcji zestawiono w tabeli 2 [Ałykow 2021].

Przeprowadzono badanie stanu zachowania konstrukcji ciesielskiej z użyciem rezystografu. Na podstawie wyników badań stwierdzono miejscowe osłabienie struktury drewna na głębokość do 1 cm, co *de facto* prowadzi do zmniejszenia czynnego wytrzymałościowo przekroju elementów drewnianych.

Analiza statyczno-wytrzymałościowa

Przeprowadzono analizę statyczno-wytrzymałościową układów prętowych rozpatrywanej konstrukcji ciesiel-

The typology of the building based on the structural elements [Ałykow 2021] (Tab. 2).

A test of the timber roof structure condition using the NDT (resistograph) method was conducted. The obtained results showed that the timber structure was weakened up to 1cm deep in some areas, which meant that the cross-section strength of the timber elements was reduced.

Static strength analysis

A static strength analysis of the truss elements in the timber roof structure was performed [Rapp 2015], tak-

Building	Our Savior's Church in Cieplice
Building period	1774–1777
Roof type	Mansard truss
Structure type	A single post truss with a collar beam, longitudinally reduced, with every third full truss
Ceiling	barrel-vaulted ceiling with plaster
Structure description	A full truss consists of roof rafters and mansard rafters with false rafters, a hang post, a tie beam, noggins, braced by pairs of parallel struts within the mansard area, and an additional pair of struts. There were no longitudinal or transverse webs used. The truss structure is braced with pairs of long struts in the shape of Saint Andrew's Cross and braced with some additional struts between the top plate and the lower noggin. The base plate is in the form of a jack rafter which rests on the wall plate. Some of the full trusses are additionally reinforced with wooden elements or have two posts or web ties. In the area of the haunches (the nave narrowing), the trusses are reduced and have a variable span the width of which is adjusted to the decreasing spacing between the walls. They are asymmetrical in the form of half a nave truss and are positioned at an angle with the main axis. Within the tower and the roof ridge, the trusses are perpendicular to the main axis, with the top part evenly adjusted to the slope of the hip roof.
Damages	Natural material fatigue
Conservation	1848
Types of joint	dovetailed lap joint, sloped mortise and tenon, single abutting joint, carpentry brace, sloped notched and halved joint
Rafter (height/width) [cm]	17/20
Purlin (height/width) [cm]	17/20, 19/20, 18/20, 18/21 (ridge beam)
Wall plate (height/width) [cm]	20/20
Bottom plate (height/width) [cm]	17/22
Noggin (height/width) [cm]	17/20, 18/20 (transversal), 16/16, 17/22, 18/20, 18/21
Queen post (height/width) [cm]	18/22
Sloped queen post (height/width) [cm]	17/20
Hang post (height/width) [cm]	20/18
Collar Beam (height/width) [cm]	18/13, 20/23
Tie Beam (height/width) [cm]	17/22
Strut (height/width) [cm]	16/12, 16/18, 15/16, 17/20
Brace (height/width) [cm]	12/12, 15/15
Rafter spacing (axial) [m]	1.15
Roof truss span [m]	23.58
Roof slope	40°, 61° (Mansard)
Roof truss height [m]	13.60
Wood consumption rate per 1 m ² roof slope	0.14 m ³
Building material	Solid spruce/pine wood

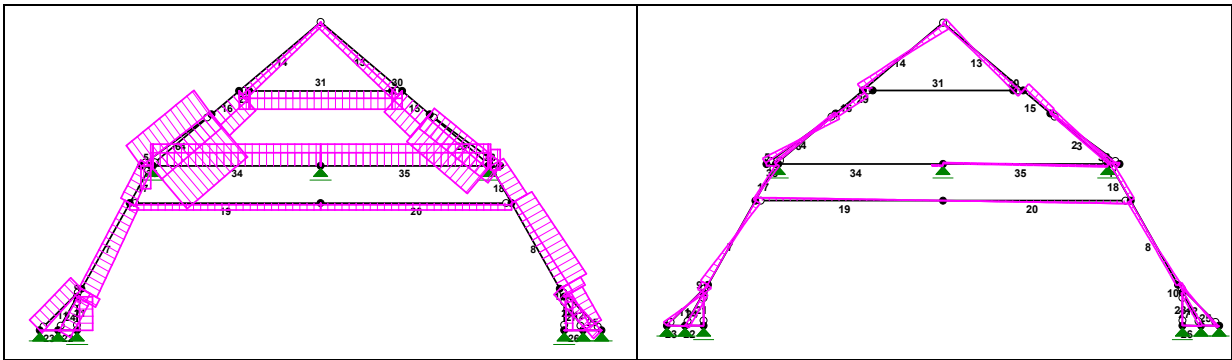
Tab. 2. Typology of the analyzed carpenter construction.

skiej [Rapp 2015], z uwzględnieniem zinventaryzowanych przekrojów poprzecznych poszczególnych belek oraz sposobu ich połączenia [Karolak, Jasieńko 2021; Karolak et al. 2020; Rapp, Fiszer 2015].

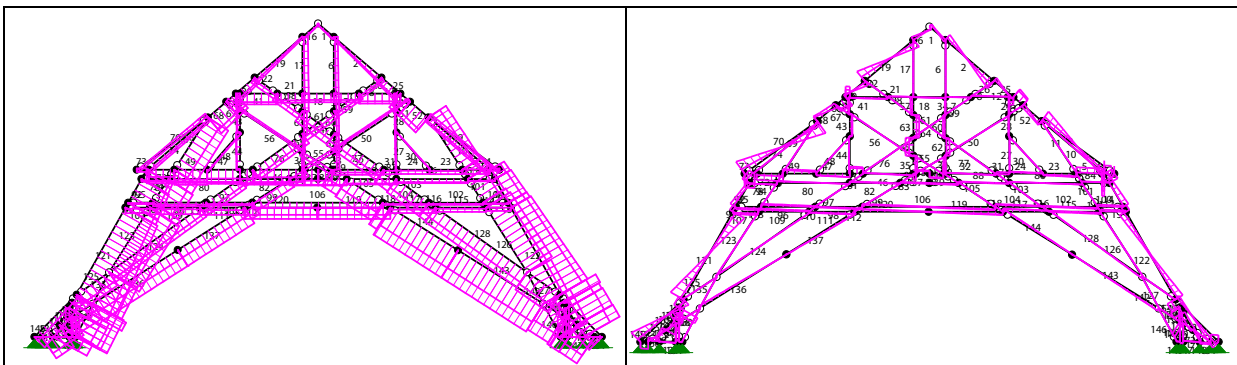
Obciążenia zewnętrzne przyjęto zgodnie z aktualnymi normami z zakresu obciążeń technologicznych i klimatycznych odpowiednich dla poszczególnych lokalizacji. Przy analizowaniu więźby dachowej, w odróżnieniu od rozpatrywania pojedynczego wiażara wyizolowanego z układu konstrukcyjnego, uwzględniono wpływ redystrybucji obciążeń w stanie zastanym, będącym efektem późniejszych ingerencji. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe przeprowadzono przy użyciu programu do

ing into account the already inventoried cross sections of the individual beams and their connectors [Karolak, Jasieńko 2021; Karolak et al. 2020; Rapp, Fiszer 2015].

The external loads were used according to the current standards for technological and climatic loads specific to the particular location. Unlike the case where a single truss would have been isolated from the entire structural framework, the analysis of the timber roof truss allowed for the effects of the load redistribution in the “as-found” state, which was the result of the earlier interventions. The static strength calculations were done using RM-WIN truss structural analysis software. The location-specific climatic loads used for calcula-



Ryc. 5. Obwiednie sił osiowych – stan zastany, obwiednie sił tnących – stan zastany.
 Fig. 5. Axial force envelopes – as found, shear force envelopes – as found.



Ryc. 6. Obwiednie sił osiowych – stan zastany, obwiednie sił tnących – stan zastany.
 Fig. 6. Axial force envelopes – as found, shear force envelopes – as found.

analiz układów prętowych RM-WIN. Przyjęto obciążenia klimatyczne wynikające z umiejscowienia kościoła w jego rzeczywistej lokalizacji.

Przeprowadzenie wyżej omówionej analizy statyczno-wytrzymałościowej konstrukcji ciesielskiej umożliwiło określenie wartości sił wewnętrznych w jej poszczególnych elementach, co stanowiło punkt wyjścia do analiz porównawczych.

Stan istniejący

Ponieważ płatwie stanowiące usztywnienie układu konstrukcyjnego więźby dachowej w kierunku podłużnym umożliwiają redystrybucję obciążeń z wiązarów niepełnych na wiązary pełne, w pierwszej kolejności dokonano analizy wiązarów niepełnych (ryc. 5).

W następnym etapie przeanalizowano wiązar pełny z uwzględnieniem dodatkowych sił przekazywanych od wiązarów niepełnych.

W efekcie przeprowadzonej analizy statyczno-wytrzymałościowej określono obwiednie sił wewnętrznych w analizowanej konstrukcji (ryc. 6).

Dokonano analizy pracy konstrukcji w stanie zastanym, z uwzględnieniem ingerencji z XIX w., na podstawie przeprowadzonych badań architektonicznych. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

tions were applied according to the actual location of the church.

The static strength analysis of the timber roof truss allowed us to determine the internal forces in the individual elements, which provided a starting point for carrying out the comparative analyses

Existing state

Due to the fact that the purlins, which provide the longitudinal stability of the timber roof truss, enable the redistribution of the load from the secondary trusses to the full trusses, the analysis of the secondary trusses was done as a first step (Fig. 5).

The next stage involved the analysis of the full trusses, accounting for the additional forces transferred to the secondary trusses.

The static strength analysis allowed us to determine the envelopes of the internal forces in the analyzed structure, as shown in the figures below (Fig. 6).

The analysis involved the structural behavior in the “as found” state, accounting for the interventions made in the nineteenth century, as well as the architectural research, and the results are shown in the table below (Tab. 3).

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Krokwie dachowa	1.04	2.57	0.41	0.98
			-13.07	
Krokwie mansardowa	2.33	4.52	0.00	3.11
			-35.66	
Jełka	1.19	12.06	0.19	0.86
			-9.48	
Zastrzał	1.02	6.42	2.32	1.88
			-20.48	
Rygiel	0.31	-0.44	0.00	0.38
			-3.96	
Belka wiązarowa	0.87	0.73	0.00	0.92
			-7.12	

Tab. 3. Zestawienie sił wewnętrznych – stan zastany.

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Roof Rafter	1.04	2.57	0.41	0.98
			-13.07	
Mansard Rafter	2.33	4.52	0.00	3.11
			-35.66	
Collar Beam	1.19	12.06	0.19	0.86
			-9.48	
Strut	1.02	6.42	2.32	1.88
			-20.48	
Noggin	0.31	-0.44	0.00	0.38
			-3.96	
Tie Beam	0.87	0.73	0.00	0.92
			-7.12	

Tab. 3. Summary of internal forces – as found.

Wpływ przekształceń i konserwacji na pracę statyczną więźby

Aby wskazać, w jaki sposób wzmocnienia zrealizowane w połowie XIX w., poprzez wbudowanie dodatkowych elementów konstrukcyjnych [Ivashko et al. 2022], zmieniły charakter pracy całej konstrukcji ciesielskiej i jaki efekt przyniosły te zmiany, przeanalizowano pracę konstrukcji w zakresie wiązarów pełnych, bez uwzględnienia elementów, które dodano jako wzmocnienie w XIX w.

Przy analizie elementów konstrukcyjnych drewnianej więźby dachowej w obrębie wiązarów pełnych uwzględniono pośredni wpływ wzmocnień na pracę niewzmocnianych elementów [Bajno et al. 2021] ze względu na potencjalną redystrybucję obciążeń w zależności od sposobu usztywnienia podłużnego więźby dachowej.

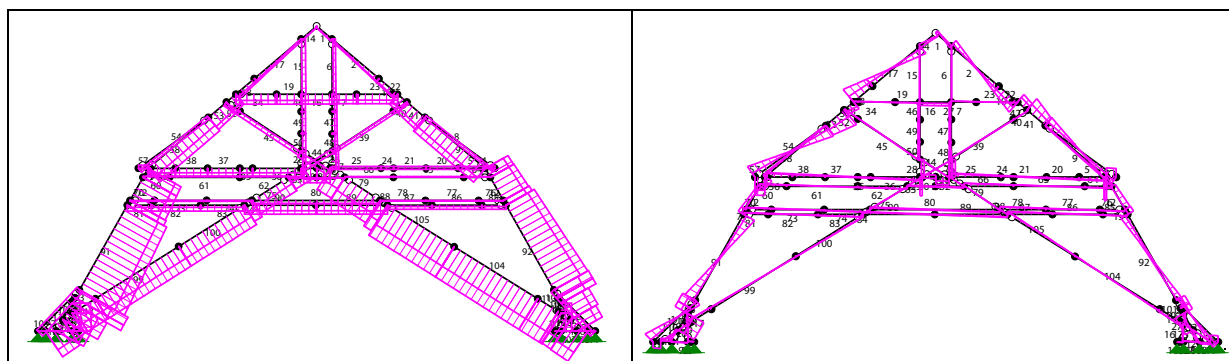
W efekcie przeprowadzonej analizy statyczno-wytrzymałościowej określono obwiednie sił wewnętrznych w analizowanej konstrukcji (ryc. 7).

Effects of deformation and conservation on the truss static behavior

In order to show how the reinforcement measures applied in the mid-nineteenth century, involving building in some additional structural elements [Ivashko et al. 2022], altered the characteristics of the entire timber roof truss behavior, and what were the results of such alterations, the structural behavior of the full trusses, excluding the reinforcement elements added in the nineteenth century, was analyzed.

When analyzing the structural elements of the timber roof truss located around the full trusses, and because of the potential redistribution of loads depending on how the longitudinal stability of the roof truss was used, we accounted for the reinforcement's indirect impact on the non-reinforced elements' behavior [Bajno et al. 2021].

The static strength analysis allowed us to determine the envelopes of the internal forces in the analyzed structure, as shown in the figures below (Fig. 7).



Ryc. 7. Obwiednie sił osiowych – stan pierwotny, obwiednie sił tnących – stan pierwotny.

Fig. 7. Axial force envelopes – original state, shear force envelopes – original state.

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Krokiew dachowa	2.97	4.56	0.41	2.93
			-15.86	
Krokiew mansardowa	3.30	4.44	0.00	4.35
			-48.89	
Jętka	3.75	14.44	1.66	1.69
			-27.01	
Zastrzał	1.44	0.70	0.62	2.75
			-31.68	
Rygiel	0.83	0.73	0.00	0.75
			0.91	
Belka wiązarowa	0.99	0.74	0.00	1.01
			-7.93	

Tab. 4. Zestawienie sił wewnętrznych – stan pierwotny.

Dokonano analizy pracy konstrukcji w stanie pierwotnym, bez uwzględnienia ingerencji z XIX w., na podstawie przeprowadzonych badań architektonicznych.

Przy analizowaniu więźby dachowej, w odróżnieniu od rozpatrywania pojedynczego wiązara wyizolowanego z układu konstrukcyjnego, uwzględniono wpływ redystrybucji obciążeń w stanie pierwotnym (tab. 4).

Wpływ deformacji na wyężenie konstrukcji

Biorąc pod uwagę fakt, że wzmocnienie konstrukcji zrealizowane w połowie XIX w. spowodowane było zapewne widocznymi deformacjami więźby dachowej [Bajno et al. 2019] i – najprawdopodobniej – widocznymi spękaniami sufitu pokrywającego kolebę drewnianą, istotne jest określenie, w jaki sposób deformacje te wpływają na wyężenie elementów konstrukcji ciesielskiej analizowanej więźby dachowej.

W celu porównania wpływu deformacji geometrycznych na globalny rozkład naprężeń w analizowanej konstrukcji zestawiono wyniki dla układu prętów prostych z imperfekcjami geometrycznymi spowodowanymi procesami reologicznymi zachodzącymi w poszczególnych elementach poddanych długotrwałemu wyężeniu.

Przeprowadzono analizę statyczno-wytrzymałościową układów prętowych rozpatrywanych konstrukcji ciesielskich, z uwzględnieniem zinwentaryzowanych przekrojów poprzecznych poszczególnych belek i sposobu ich połączenia oraz imperfekcji geometrycznych wynikających z procesów reologicznych zachodzących w drewnianych elementach prętowych poddanych działaniu długotrwałych obciążeń.

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Roof Rafter	2.97	4.56	0.41	2.93
			-15.86	
Mansard Rafter	3.30	4.44	0.00	4.35
			-48.89	
Collar Beam	3.75	14.44	1.66	1.69
			-27.01	
Strut	1.44	0.70	0.62	2.75
			-31.68	
Noggin	0.83	0.73	0.00	0.75
			0.91	
Tie Beam	0.99	0.74	0.00	1.01
			-7.93	

Tab. 4. Summary of internal forces – original state.

Based on the architectural research, it was possible to carry out the analysis of the structure in its original state, without accounting for the interventions made in the nineteenth century.

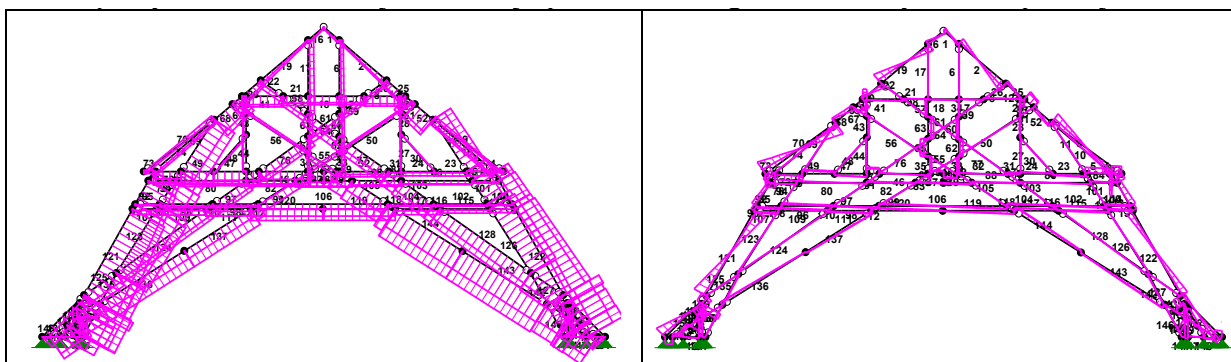
Unlike the case where a single truss would have been isolated from the entire structural framework, the analysis of the timber roof truss allowed for the effects of the load redistribution in the original state (Tab. 4).

Effects of deformation on the strength of the structure

Given the fact that the structure reinforcement used in the mid-nineteenth century was likely caused by some visible deformations of the timber roof truss [Bajno et al. 2019] and, presumably, by some visible cracks in the ceiling below the wooden barrel vault, it was important to determine how these deformations affected the strength of the elements in the analyzed timber roof truss.

In order to compare the effects of the geometrical deformations on the entire stress distribution in the analyzed structure, a summary of the results was done for the straight truss elements with their geometrical imperfections caused by the rheological processes that occurred in the individual elements subjected to a long-term stress.

A static strength analysis of the truss elements in the timber roof structure was performed, taking into account the already inventoried cross sections of the individual beams and their connectors, as well as the geometrical imperfections resulting from the rheological processes in the wooden truss elements with long-term exposure to loads.



Ryc. 8. Obwiednie sił osiowych – stan zastany z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych, obwiednie sił tnących – stan zastany z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych.

Fig. 8. Axial force envelopes – as found, accounting for geometrical imperfections; shear force envelopes – as found, accounting for geometrical imperfections.

Aby wskazać, w jaki sposób imperfekcje geometryczne zmieniły charakter pracy całej konstrukcji ciesielskiej i jaki efekt przyniosły te zmiany, przeanalizowano pracę konstrukcji w zakresie wiązarów pełnych, z uwzględnieniem elementów, które dodano jako wzmocnienie w XIX w.

W efekcie przeprowadzonej analizy statyczno-wytrzymałościowej określono obwiednie sił wewnętrznych w analizowanej konstrukcji (ryc. 8).

Dokonano analizy pracy konstrukcji w stanie zastanym, z uwzględnieniem ingerencji z XIX w. na podstawie przeprowadzonych badań architektonicznych oraz z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych wynikających z odkształcenia elementów drewnianych poddanych obciążeniu w długim okresie (od momentu wbudowania w obiekt w XVIII w.). W tabeli 5 zestawiono wyniki przeprowadzonych obliczeń.

In order to show how the geometrical imperfections altered the characteristics of the entire timber roof truss behavior and what were the results of such alterations, the structural behavior of the full trusses was analyzed, including the reinforcement elements added in the nineteenth century.

The static strength analysis allowed us to determine the envelopes of the internal forces in the analyzed structure, as shown in the Figures below (Fig. 8).

The analysis involved the behavior of the structure in an “as-found” state, accounting for the nineteenth-century interventions, as well as the architectural research and the geometrical imperfections resulting from the strain of the timber elements with long-term exposure to loads (from the time they were built into the structure in the eighteenth century). The results of the calculations are shown below (Tab. 5).

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Krokiew dachowa	1.04	2.57	0.41	0.98
			-13.04	
Krokiew mansardowa	2.40	4.62	0.00	3.16
			-35.58	
Jętką	1.24	12.12	0.26	0.89
			-9.46	
Zastrzał	2.43	6.53	2.30	3.51
			-20.44	
Rygiel	0.32	0.45	0.00	0.39
			-3.95	
Belka wiązarowa	0.90	0.75	0.00	0.95
			-7.17	

Tab. 5. Zestawienie sił wewnętrznych – stan zastany z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych.

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Roof rafter	1.04	2.57	0.41	0.98
			-13.04	
Mansard rafter	2.40	4.62	0.00	3.16
			-35.58	
Collar beam	1.24	12.12	0.26	0.89
			-9.46	
Strut	2.43	6.53	2.30	3.51
			-20.44	
Noggin	0.32	0.45	0.00	0.39
			-3.95	
Tie beam	0.90	0.75	0.00	0.95
			-7.17	

Tab. 5. Internal forces summary – as found, accounting for geometrical imperfections.

Wpływ deformacji na wytrzymałość konstrukcji

Ponadto dokonano analizy więźb w stanie zastanym, z uwzględnieniem ewentualnego osłabienia przekrojów krokwi [Bednarz 2023] w wyniku powierzchniowej korozji biologicznej oraz wygnicia fragmentu krokwi od strony pokrycia dachowego (uszkodzenie często spotykane przy permanentnie nieszczelnych pokryciach dachowych). Ze względu na nieprzewidywalność zakresu uszkodzeń przyjęto, że osłabienie w wyniku powierzchniowej korozji biologicznej spowoduje degradację warstwy drewna o miąższości 2 cm z każdej strony, natomiast osłabienie krokwi od jej wierzchu sięgnie połowy jej wysokości, tak że przekrój z prostokątnego osiągnie formę litery U.

Przy analizowaniu wzmocnionej więźby dachowej, w odróżnieniu od rozpatrywania pojedynczego wiazara wyizolowanego z układu konstrukcyjnego, uwzględniono wpływ redystrybucji obciążeń w stanie pierwotnym.

W tabeli 6 zestawiono wyniki przeprowadzonych obliczeń.

Wnioski częściowe

Na podstawie otrzymanych wartości sił wewnętrznych dla konstrukcji więźby dachowej w stanie pierwotnym (traktując je jako wyjściowe), zestawiając je z wynikami w stanie zastanym (po wzmocnieniu w XIX w.), sformułowano poniższe wnioski.

W przypadku kościoła w Cieplicach można zaobserwować następujące zmiany rozkładu sił wewnętrznych: dla momentów zginających zmniejszenie wartości we wszystkich elementach od 88,34% do 34,50%. Dla sił tnących: w krokwi dachowej, ryglu, jętce i belce wiazarowej zmniejszenie od 98,00% do 56,39%; w przypadku krokwi mansardowej zwiększenie do 101,74%;

Effects of deformation on the strength of the structure

An additional analysis involved the trusses in the “as-found” state, accounting for the potential weakening of the rafters’ cross-section [Bednarz 2023] caused by biological corrosion occurring on their surface and the presence of rot in the section of the rafters from the side of the roof covering—that is the damage which can often be seen as a result of the permanently leaky roof covering. Because of the unpredictability of the scope of the damage, it was assumed that the weakening caused by the biological corrosion that occurred on the surface would cause degradation of the timber layer (2 cm in volume on each side), and the weakening of the rafters from their top would reach half of their height, so that their cross-sectional area would form the letter U.

Unlike the case where a single truss would have been isolated from the entire structural framework, the analysis of the reinforced timber roof truss allowed for the effects of the load redistribution in the original state.

The results of the calculations are shown below (Tab. 6).

Partial conclusions

Based on the obtained values of the internal forces for the timber roof trusses in their original state (treating them as the initial values) compared with the results in the “as-found” state (after the nineteenth-century reinforcement), the following findings were made.

With reference to the church in Cieplice, the following alterations in the internal force distribution can be observed. With regard to the bending moments, in all of the elements, the value is reduced from 88.34% to 34.50%. With regard to the shear forces: in the roof rafter, nog-

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Krokiew dachowa	0.87	2.32	1.40	1.40
			-10.46	
Krokiew mansardowa	2.12	5.27	0.00	4.32
			-31.49	
Jętka	1.10	11.42	0.00	0.79
			-10.85	
Zastrzał	1.02	8.13	2.26	1.93
			-22.15	
Rygiel	0,41	0.46	0.00	0.44
			-4.24	
Belka wiazarowa	0.97	0.92	0.55	1.02
			-7.83	

Tab. 6. Zestawienie sił wewnętrznych – stan zastany z uwzględnieniem ewentualnej korozji biologicznej krokwi.

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Krokiew dachowa	0.87	2.32	1.40	1.40
			-10.46	
Krokiew mansardowa	2.12	5.27	0.00	4.32
			-31.49	
Jętka	1.10	11.42	0.00	0.79
			-10.85	
Zastrzał	1.02	8.13	2.26	1.93
			-22.15	
Rygiel	0,41	0.46	0.00	0.44
			-4.24	
Belka wiazarowa	0.97	0.92	0.55	1.02
			-7.83	

Tab. 6. Internal forces summary – as found, accounting for potential biological corrosion of raft.

dla zastrzałów zwiększenie aż do 939,96%. Dla sił osiowych: w krokwi dachowej, krokwi mansardowej, jętcie, ryglu i belce wiązarowej zmniejszenie od 99,42% do 74,75% i zwiększenie w zastrzale od 373,03% do 2131,94%. Dla naprężeń zmniejszenie wartości we wszystkich elementach od 90,54% do 33,35%.

Wpływ sposobu podparcia przyjętego do analizy statyczno-wytrzymałościowej na rozkład i wartości sił wewnętrznych w konstrukcji

Aby wskazać, jak sposób podparcia układu konstrukcyjnego przyjęty do analizy statyczno-wytrzymałościowej wpływa na otrzymane wyniki, przeanalizowano układ w stanie pierwotnym (przed wzmocnieniem) i w stanie zastanym, bez uwzględnienia imperfekcji oraz osłabienia przekrojów elementów w wyniku korozji biologicznej.

Różnicą w stosunku do analiz przeprowadzonych wcześniej jest sposób podparcia konstrukcji ciesielskiej, gdzie przyjęto jedną z podpór jako przegubowo-przesuwną.

Przeprowadzono analizę statyczno-wytrzymałościową układów prętowych rozpatrywanej konstrukcji ciesielskiej, z uwzględnieniem zinwentaryzowanych przekrojów poprzecznych poszczególnych belek oraz sposobu ich połączenia.

Obciążenia zewnętrzne przyjęto zgodnie z obowiązującymi normami z zakresu obciążeń technologicznych i klimatycznych odpowiednich dla poszczególnych lokalizacji.

Przy analizowaniu więźby dachowej, w odróżnieniu od rozpatrywania pojedynczego wiązara wyizolowanego z układu konstrukcyjnego, uwzględniono wpływ redystrybucji obciążeń w stanie zastanym, będącym efektem późniejszych ingerencji.

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe przeprowadzono przy użyciu programu do analiz układów prętowych. Przyjęto obciążenia klimatyczne wynikające z umiejscowienia kościoła w jego rzeczywistej lokalizacji.

Przeprowadzenie wyżej omówionej analizy statyczno-wytrzymałościowej konstrukcji ciesielskiej umożliwiło określenie wartości sił wewnętrznych w jej poszczególnych elementach, co stanowiło punkt wyjścia do analiz porównawczych.

Stan istniejący

Podobnie jak we wcześniejszych analizach, ze względu na to, że płatwie stanowiące usztywnienie układu konstrukcyjnego więźby dachowej w kierunku podłużnym umożliwiają redystrybucję obciążeń z wiązarów niepełnych na wiązary pełne, w pierwszej kolejności dokonano analizy wiązarów niepełnych.

W następnym etapie przeanalizowano wiązary pełne, z uwzględnieniem dodatkowych sił przekazywanych od wiązarów niepełnych.

W efekcie przeprowadzonej analizy statyczno-wytrzymałościowej określono obwiednie sił wewnętrznych w analizowanej konstrukcji (ryc. 9).

gin, collar beam and tie beam, the value is reduced from 98.00% to 56.39%; in the mansard rafter, the value is increased to 101.74%; in the struts, the value is increased all the way up to 939.96%. With regard to the axial forces: in the roof rafter, mansard rafter, collar beam, noggin and tie beam, the value is reduced from 99.42% to 74.75%, and in the strut, the value is increased from 373.03% to 2,131.94%. With regard to the stress, in all elements, the value is reduced from 90.54% to 33.35%.

Effects of the form of support, assumed for the static analysis, on the distribution and values of the structure's internal forces

In order to show how the form of support of the structural framework, which was used in the static strength analysis, affects the obtained results, the structure was analyzed in its original state (before reinforcement) as well as in the "as-found" state, without accounting for the imperfections or the weakening of the cross section of its elements resulting from biological corrosion.

This analysis differs from those above in the form of support of the timber roof truss, where one of the supporting elements considered was a pin and roller support.

A static strength analysis of the truss elements in the timber roof structure was performed, taking into account the already inventoried cross sections of the individual beams and the way they were connected.

The external loads were used according to the current standards for technological and climatic loads specific to the particular location.

Unlike the case where a single truss would have been isolated from the entire structural framework, the analysis of the timber roof truss allowed for the effects of the load redistribution in the "as-found" state, which was the result of the earlier interventions.

The static strength calculations were done using truss structural analysis software. The location-specific climatic loads used for calculations were used according to the actual location of the church.

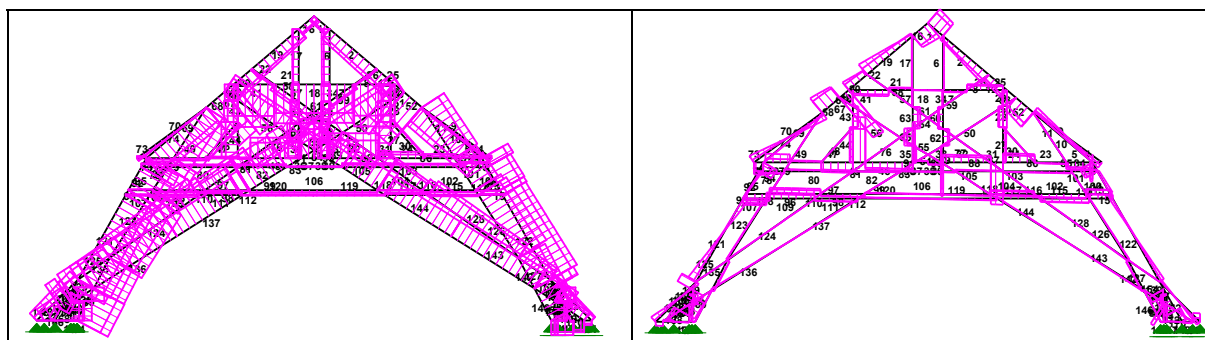
The static strength analysis of the timber roof truss allowed us to determine the internal forces in the individual elements, which provided a starting point for carrying out the comparative analyses.

Existing state

Similarly to the earlier analyses, given that the purlins, which provide the longitudinal stability of the timber roof truss, enable the redistribution of the load from the secondary trusses to the full trusses, the analysis of the secondary trusses was done as a first step.

The next stage involved the analysis of the full trusses, accounting for the additional forces transferred to the secondary trusses.

The static strength analysis allowed us to determine the envelopes of the internal forces in the analyzed structure, as shown in the figures below (Fig. 9).



Ryc. 9. Obwiednie sił osiowych – stan zastany, obwiednie sił tnących – stan zastany.

Fig. 9. Axial force envelopes – as found; shear force envelopes – as found.

Dokonano analizy pracy konstrukcji w stanie zastanym, z uwzględnieniem ingerencji z XIX w., na podstawie przeprowadzonych badań architektonicznych. Wyniki przedstawiono w tabeli 7.

The analysis involved the structural behavior in the “as found” state, accounting for the interventions made in the nineteenth century, as well as the architectural research, and the results are shown in the table below (Tab. 7).

Wpływ przekształceń i konserwacji na pracę statyczną więźby

Effects of deformation and conservation on the truss static behavior

Podobnie jak wcześniej, aby wskazać, w jaki sposób wzmocnienia zrealizowane w połowie XIX w., poprzez wbudowanie dodatkowych elementów konstrukcyjnych, zmieniły charakter pracy całej konstrukcji ciesielskiej i jaki efekt przyniosły te zmiany, przeanalizowano pracę konstrukcji w zakresie wiązarów pełnych, bez uwzględnienia elementów, które dodano jako wzmocnienie w XIX w.

As it was done before, in order to show how the reinforcement measures applied in the mid-nineteenth century, involving building in some additional structural elements, altered the characteristics of the entire timber roof truss behavior, and what were the results of such alterations, the structural behavior of the full trusses, excluding the reinforcement elements added in the nineteenth century, was analyzed.

Przy analizie elementów konstrukcyjnych drewnianej więźby dachowej w obrębie wiązarów pełnych uwzględniono pośredni wpływ wzmocnień na pracę niewzmocnianych elementów, ze względu na potencjalną redystrybucję obciążeń w zależności od sposobu usztywnienia podłużnego więźby dachowej.

When analyzing the structural elements of the timber roof truss located around the full trusses, because of the potential redistribution of loads depending on how the longitudinal stability of the roof truss was used, we accounted for the reinforcement’s indirect impact on the non-reinforced elements’ behavior.

Ponieważ zrealizowane w XIX w. ingerencje w oryginalną więźbę dachową nie dotyczyły wiązarów nie-

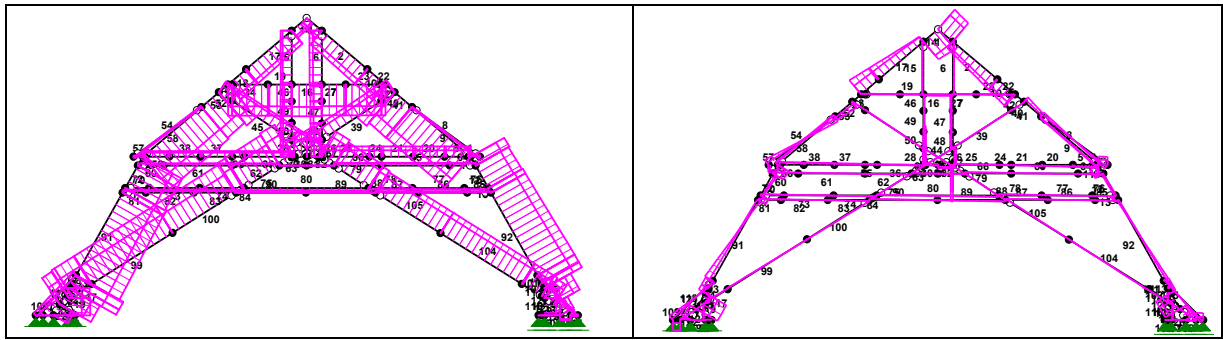
Because the nineteenth-century interventions in the original roof truss did not include the secondary

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Krokiew dachowa	5.74	22.04	0.00	3.52
			-33.89	
Krokiew mansardowa	6.89	10.56	0.00	3.37
			-49.68	
Jętka	1.15	2.48	0.00	4.75
			-61.10	
Zastrzał	1.02	1.15	0.00	2.22
			-53.24	
Rygiel	1.76	4.07	35.67	1.83
			0.00	
Belka wiązarowa	1.48	2.35	0.00	1.07
			-3.57	

Tab. 7. Zestawienie sił wewnętrznych – stan zastany.

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Roof Rafter	5.74	22.04	0.00	3.52
			-33.89	
Mansard Rafter	6.89	10.56	0.00	3.37
			-49.68	
Collar Beam	1.15	2.48	0.00	4.75
			-61.10	
Strut	1.02	1.15	0.00	2.22
			-53.24	
Noggin	1.76	4.07	35.67	1.83
			0.00	
Tie Beam	1.48	2.35	0.00	1.07
			-3.57	

Tab. 7. Summary of internal forces – as found.



Ryc. 10. Obwiednie sił osiowych – stan pierwotny, obwiednie sił tnących – stan pierwotny.

Fig. 10. Axial force envelopes – original state, shear force envelopes – original state.

pełnych, nie podjęto ich analizy, uznając ją za zbędną w rozpatrywanym kontekście.

W efekcie przeprowadzonej analizy statyczno-wytrzymałościowej określono obwiednie sił wewnętrznych w analizowanej konstrukcji (ryc. 10).

Dokonano analizy pracy konstrukcji w stanie pierwotnym, bez uwzględnienia ingerencji z XIX w., na podstawie przeprowadzonych badań architektonicznych.

Przy analizowaniu więźby dachowej, w odróżnieniu od rozpatrywania pojedynczego wiązara wyizolowanego z układu konstrukcyjnego, uwzględniono wpływ redystrybucji obciążeń w stanie pierwotnym (tab. 8).

Wnioski częściowe

Na podstawie otrzymanych wartości sił wewnętrznych dla konstrukcji więźby dachowej w stanie pierwotnym (traktując je jako wyjściowe), zestawiając je z wynikami w stanie zastanym (po wzmocnieniu w XIX w.), sformułowano poniższe wnioski.

W przypadku kościoła w Cieplicach można zaobserwować następujące zmiany rozkładu sił wewnętrznych: dla momentów zginających: w krokwi dachowej, zastrzale i ryglu zmniejszenie wartości od 79,69%

trusses, their analysis was not conducted, as it was considered redundant in the given context.

The static strength analysis allowed us to determine the envelopes of the internal forces in the analyzed structure, as shown in the figures below (Fig. 10).

Based on the architectural research, it was possible to carry out the analysis of the structure in its original state, without accounting for the interventions made in the nineteenth century.

Unlike the case where a single truss would have been isolated from the entire structural framework, the analysis of the timber roof truss allowed for the effects of the load redistribution in the original state (Tab. 8).

Partial conclusions

Based on the obtained values of the internal forces for timber roof trusses in their original state (treating them as the initial values) compared with the results in the “as-found” state (after the nineteenth-century reinforcement), the following findings were made.

With reference to the church in Cieplice, the following alterations in the internal force distribution can be observed. With regard to the bending moments: in the roof rafter, strut and noggin, the value is reduced from

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Krokiew dachowa	11.48	25.56	0.00	5.23
			-71.67	
Krokiew mansardowa	4.06	3.82	0.00	4.04
			-85.44	
Jętka	0.95	0.87	0.00	3.15
			-51.38	
Zastrzał	1.28	0.47	58.59	3.32
			0.00	
Rygiel	3.34	1.49	0.00	1.66
			18.16	
Belka wiązarowa	0.95	0.67	0.00	0.84
			-4.62	

Tab. 8. Zestawienie sił wewnętrznych – stan pierwotny.

Element	M kNm	Q kN	N (+/-) kN	σ MPa
Roof Rafter	11.48	25.56	0.00	5.23
			-71.67	
Mansard Rafter	4.06	3.82	0.00	4.04
			-85.44	
Collar Beam	0.95	0.87	0.00	3.15
			-51.38	
Strut	1.28	0.47	58.59	3.32
			0.00	
Noggin	3.34	1.49	0.00	1.66
			18.16	
Tie Beam	0.95	0.67	0.00	0.84
			-4.62	

Tab. 8. Summary of external forces – original state.

do 50,00%; w przypadku krokwi mansardowej, jętki i belki wiązarowej zwiększenie wartości od 121,05% do 169,70%. Dla sił tnących: w krokwi dachowej zmniejszenie o 86,23%; w krokwi mansardowej, ryglu, jętce i belce wiązarowej zwiększenie od 244,68% do 350,75%. Dla sił osiowych: w krokwi dachowej, krokwi mansardowej, zastrzale i belce wiązarowej zmniejszenie od 47,29% do 90,87% oraz zwiększenie w jętce i ryglu od 118,92% do 196,42%. Dla naprężeń zmniejszenie wartości w krokwi dachowej, krokwi mansardowej i zastrzale od 66,87% do 83,42%; zwiększenie w jętce, ryglu oraz belce wiązarowej od 110,24% do 150,79%.

Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych wartości sił wewnętrznych dla konstrukcji więźby dachowej w stanie pierwotnym (traktując je jako wyjściowe), zestawiając je z wynikami w stanie zastanym (po wzmocnieniu w XIX w.), sformułowano poniższe wnioski.

Oczywiście, w zależności od przyjętego sposobu podparcia całego układu konstrukcyjnego można zaobserwować istotne zmiany rozkładu sił wewnętrznych. Dla momentów zginających różnice w otrzymanych wartościach wynoszą od 96,64% do 567,74%; dla sił tnących od 17,91% do 925,00%; dla sił osiowych od 50,14% do 900,76%; dla naprężeń od 108,09% do 552,33%.

Efektownym właściwym przyjęcia sposobu podparcia całego układu jest w rozpatrywanym przypadku reakcja pozioma przekazywana na koronę muru o wartości 29,22 kN bądź przesunięcie poziome o wartości 1,4 cm.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że przyjęty sposób podparcia całego układu konstrukcyjnego ma wpływ na kierunek zmian wartości sił wewnętrznych wzmocnianego układu konstrukcyjnego dla analizowanych schematów statycznych o różnych sposobach podparcia. Prawidłowe określenie sposobu podparcia, choć mogłoby się wydawać proste, w przypadku konstrukcji ciesielskich poddawanych kilkusetletniemu wyteżeniu i przekształceniom układu konstrukcyjnego nie musi być rzeczą oczywistą.

Brak uwzględnienia w analizie statyczno-wytrzymałościowej zabytkowej więźby dachowej wpływu przekształceń konstrukcji, deformacji, a przede wszystkim sposobu podparcia całego układu konstrukcyjnego prowadzi do znaczących różnic w otrzymanych wynikach. Może to mieć bezpośredni wpływ na podjęcie błędnych decyzji dotyczących zakresu i formy ingerencji w zabytkową konstrukcję ciesielską i na wybór technologii jej wzmocnienia.

* Współautorem artykułu jest **Piotr Rapp**, dr hab. inż., prof. em., Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, orcid.org/0000-0001-5385-8594.

79.69% to 50.00%; in the mansard rafter, collar beam and tie beam, the value is increased from 121.05% to 169.70%. With regard to the shear forces: in the roof rafter, the value is reduced by 86.23%; in the mansard rafter, noggin, collar beam and tie beam, the value is increased from 244.68% to 350.75%. With regard to the axial forces: in the roof rafter, mansard rafter, strut and tie beam, the value is reduced from 47.29% to 90.87%, and in the collar beam and noggin, the value is increased from 118.92% to 196.42%. With regard to the stress: in the roof rafter, mansard rafter and strut, the value is reduced from 66.87% to 83.42%; and in the collar beam, noggin and tie beam, the value is increased from 110.24% to 150.79%.

Final conclusions

Based on the obtained values of the internal forces for timber roof trusses in their original state (treating them as the initial values) compared with the results in the “as-found” state (after the nineteenth-century reinforcement), the following findings were made.

Clearly, depending on the assumed form of support of the entire structural framework, some significant changes in the distribution of the internal forces could be observed. With regard to the bending moments, the difference in the obtained values range from 96.64% to 567.74%; for the shear forces, from 17.91% to 925.00%; for the axial forces, from 50.14% to 900.76%; for the stress, from 108.09% to 552.33%.

The effect of the proper support of the entire structure in the case under study is the horizontal reaction transferred to the upper section of the wall with a value of 29.22 kN, or a horizontal shift of 1.4 cm.

However, particular attention should be paid to the fact that the assumed form of support of the entire structural framework affects the direction of changes of the internal force values in the reinforced structure for the analyzed static schemes with various ways of support. The correct determination of the form of support, though seemingly plain and simple in the case of the timber roof structures subjected to centuries-long stress, may actually not be so obvious.

As presented above, when it comes to the static strength analysis of the historic timber roof truss, the lack of consideration of the effects of the structural alterations, its deformation, and, first and foremost, the form of support of the entire structural framework, lead to significant variations in the obtained results.

This may consequently contribute to making the wrong decisions concerning the scope and form of the intervention in the historic timber roof truss and also negatively affect a proper selection of the reinforcement technique.

* This paper has been co-authored by D.Sc. Ph.D. Eng. **Piotr Rapp**, Professor Emeritus, Poznań University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Transport, orcid.org/0000-0001-5385-8594.

Bibliografia / References

Opracowania / Secondary sources

- Alykow Krzysztof, Napiórkowska-Alykow Magdalena, *First the roof than the walls. Influence of the political situation on the building technology*, [w:] *Structural Health Assessment of Timber Structures*, red. Jerzy Jasieńko, Tomasz Nowak, Wrocław 2015.
- Alykow Krzysztof, Napiórkowska-Alykow Magdalena, *The expansion of mansard roofs across Europe in 18th century*, [w:] *Structural Health Assessment of Timber Structures*, red. Görün Arun, Istanbul 2017.
- Bajno Dariusz, Bednarz Łukasz J., Grzybowska Agnieszka, Tews Rafał, *Analysis and monitoring methodology of the wooden structure – historic military architecture*, [w:] *Structural analysis of historical constructions: an interdisciplinary approach*, red. Rafael Aguilar, Cham 2019.
- Bajno Dariusz, Grzybowska Agnieszka, Bednarz Łukasz J., *Old and modern wooden buildings in the context of sustainable development*, [w:] „Energies” 2021, t. 14, nr 18.
- Bednarz Łukasz J., *Monitoring diagnostyczny obiektów historycznych*, Wrocław 2023.
- Dannenberg Lars-Arne, Donath Matthias, *Luthers Erbe. Ein Wegweiser zu Stätten der Reformation in der Oberlausitz, Nordböhmen und Niederschlesien*, Niederjahna 2014.
- Gronostajska Barbara E., Tarczewski Romuald, Jabłońska Joanna, *Architecture, City, People, and Structure*, „Buildings” 2022, t. 12, nr 3.
- Ivashko Yulia, Peng Chang, Yang Ding, Krupa Michał, Bednarz Łukasz J., *Genesis and functional features of chinese pavilions and chinese experience in the restoration of wooden structures*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2022, nr 69.
- Karolak Anna, Jasieńko Jerzy, *Experimental investigation of scarf joint of ‘lightning sign’ in bending*, [w:] *12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, red. Pere Roca, Luca Pelà, Climent Molins, Barcelona 2021.
- Karolak Anna, Jasieńko Jerzy, Nowak Tomasz, Raszczyk Krzysztof A., *Experimental investigations of timber beams with stop-splayed scarf carpentry joints*, [w:] „Materials” 2020, t. 13, nr 6.
- Rapp Piotr, *Methodology and examples of revalorization of wooden structures in historic buildings*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2015, nr 43.
- Rapp Piotr, Fiszer Sławomir, *Scarf Joints in Timber Beams*, [w:] *Structural Health Assessment of Timber Structures*, red. Jerzy Jasieńko, Tomasz Nowak, Wrocław 2015.
- Rapp Piotr, Ganowicz Ryszard, *Historyczne więźby dachowe polskich kościołów*, Poznań 2000.

Dokumentacja / Documentation

- Alykow Krzysztof, „Analiza formy i pracy statycznej konstrukcji drewnianych więźb dachowych wybranych kościołów ewangelickich Dolnego Śląska”, praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2021.

Streszczenie

Celem artykułu jest pokazanie, jaki wpływ na wyniki otrzymane w analizie statyczno-wytrzymałościowej pracy barokowej konstrukcji ciesielskiej ma fakt właściwego uwzględnienia jej przekształceń, odkształceń i sposobu podparcia. Brak właściwej analizy w zakresie poprawnego rozpoznania układu konstrukcyjnego, przyjęcia właściwego modelu obliczeniowego, uwzględnienia deformacji elementów konstrukcji prętowej i sposobu jej podparcia powoduje powstanie znacznego niedoszacowania nośności istniejącej konstrukcji. Przyjęta w artykule do analiz więźba dachowa kościoła Zbawiciela w Jeleniej Górze-Cieplicach, ze względu na swoją konstrukcję ciesielską, zarówno pod względem gabarytów, zastosowanych schematów statycznych, jak i ich przekształceń, jest przykładem dobrze ukazującym analizowane zagadnienia oraz uwypuklającym, jak duży wpływ mają przyjęte do obliczeń założenia co do sposobu podparcia schematu statycznego na osiągnięte wyniki obliczeń numerycznych. Jest to istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa w analizie pracy konstrukcji i ma wpływ na decyzje podejmowane w zakresie jej wzmocnienia.

Abstract

The objective of this article is to present how the appropriate consideration of the structural alterations, deformation and the type of support have affected the results obtained through a static strength analysis of the structural behavior of a Baroque timber roof truss. The lack of proper analysis, including an accurate diagnosis of the structure, the application of the appropriate calculation model, the consideration of the deformation of the truss elements, as well as the type of the structural support, results in a significant underestimation of the bearing strength capacity of the existing structure. The roof truss of the Our Savior's Church in Jelenia Góra-Cieplice, selected for analysis in the article, due to its carpentry structure, both in terms of dimensions, the static schemes used and their transformations, is an example that clearly shows the analyzed issues and highlights how much influence the adopted ones have. For calculations, assumptions as to the method of supporting the static diagram on the achieved results of numerical calculations. From the safety point of view, it is an important factor in the structural behavior analysis which affects the decisions-making process regarding the reinforcement of its structural elements.