

© 2020. S. Jurczakiewicz, S. Karczmarczyk.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (CC BY-NC-ND 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the Article is properly cited, the use is non-commercial, and no modifications or adaptations are made.



# TENSION-STRUT SYSTEMS IN CONSERVATION OF HISTORICAL BUILDINGS: EXAMPLES OF APPLICATIONS

S. JURCZAKIEWICZ<sup>1</sup>, S. KARZMARCZYK<sup>2</sup>

Tension-strut systems consist of thin cables and membranes capable of carrying only tensile forces and compressed struts cooperating with them. They make very effective use of strength properties of materials. They are lightweight and common in large span structures such as bridges and stadium roofs. However, they may also be advantageous in reinforcing and repairing historical buildings as they conform to conservation law in force. This paper presents a few examples of such applications of tension-strut system. Stabilization of historic brick and stone vaults with buttresses and iron bowstrings often turns out inadequate to resist thrust forces transmitted from the vault to the walls which cause cracks and deformations of the vault. Properly designed tension-strut structure can resist the thrust forces calculated in a theoretical way. Moreover, it can be hidden in the attic of building. Old timber roof structures are usually deformed and excessively deflected. Skilfully assembled tension-strut systems enable straightening and geometrical adjustment of a roof structure. Although similar threats and structural damages occur in most buildings which are a few hundred years old, individual design solutions are required in each case. Historical investigation and detailed measurement of geometry and deflections have to be made before choosing the appropriate method of reinforcing the old structure.

*Keywords:* tension-strut systems, vaults, rafter framings, conservation of buildings

<sup>1</sup> PhD., Eng., Cracow University of Technology, Faculty of Architecture, ul. Podchorążych 1, 30-084 Cracow, Poland, e-mail: [sjurczakiewicz@pk.edu.pl](mailto:sjurczakiewicz@pk.edu.pl)

<sup>2</sup> PhD., Eng., Cracow University of Technology, Faculty of Architecture, ul. Podchorążych 1, 30-084 Cracow, Poland, e-mail: [skarczmarczyk1@poczta.onet.pl](mailto:skarczmarczyk1@poczta.onet.pl)

## 1. INTRODUCTION

Tension-strut systems consist of thin cables and membranes capable of carrying only tensile forces and compressed struts cooperating with them. They make very effective use of strength properties of materials. They have been developed dynamically recently thanks to new materials of high tensile strength [5].

The oldest examples of such structures can be found in the prehistoric period. Some old forms of nomad tents and suspension bridges have been built until now. It's known that ancient Greeks and Romans covered theatres with rope and canvas roofs protecting spectators from the sun. Iron bars were placed in medieval vaults and domes in order to resist thrust forces.

Tension-strut systems enable to rise structures of considerable dimensions with a relatively small quantity of building materials. Therefore they are now widely used in large span structures such as bridges and stadium roofs. However, their important features such as lightness, ease of assembly in a limited space of an existing building and possibility of modifying the geometry by means of adjusting the length of cables make them possible to be used in reinforcing and repairing historical buildings. Furthermore, fixing tension-strut systems within existing buildings damages their old structure only slightly and can be easily removed in the future. These advantages make tension-strut structures conformable to conservation law in force [6].

This paper presents a few examples of tension-strut systems we have designed for structural reinforcement and protection of historical buildings.

## 2. VAULTS

Domes and vaults built of stone and bricks from the Roman times until the end of 19<sup>th</sup> century required stabilization of abutments and resistance against dangerous thrust forces transmitted to other building elements. Originally it was achieved by means of massive walls, masonry buttresses and iron bowstrings. Sometimes it happened that the bow-strings were removed in order to improve the exposure of paintings decorating the vault or they were destroyed by corrosion. Walls and buttresses were often inadequate to resist thrust forces from the vaults or their foundations were deformed by weakness of the ground caused e.g. by damage of sewage system. Such factors may now cause cracks and deformations of the vault. Carrying out the protection is necessary to succeed in preservation works on the brickwork of the vaults and the paintings [3]. Failure to repair inevitably leads to a disaster and destruction of the vault.

Cracow St. Barbara's church is a brick gothic building built in 14<sup>th</sup> century. In the second half of 17<sup>th</sup> century it was rebuilt in a baroque style (Fig. 1). Current barrel vault with lunettes dates back to this period. Its span is 10.50 m and thickness of the shell is of one brick – about 25 cm. The vault is reinforced with ribs approximately every 5.30 m. Longitudinal cracks on vault caused by insufficient rigidity of lateral supporting walls were observed during recent renovation of the church. The upper part of the southern wall leant out up to 6 cm, and the northern wall even 10 cm despite of the existing buttresses (Fig. 1). It was necessary to stop the vault cracks spreading before undertaking the renovation of the interior of the church. Assembling transversal steel bowstrings would have been the simplest solution but it was rejected by the conservatory authority. Instead, above the vault we designed a system of transversal beams with cables anchored in lateral walls (Fig. 2).

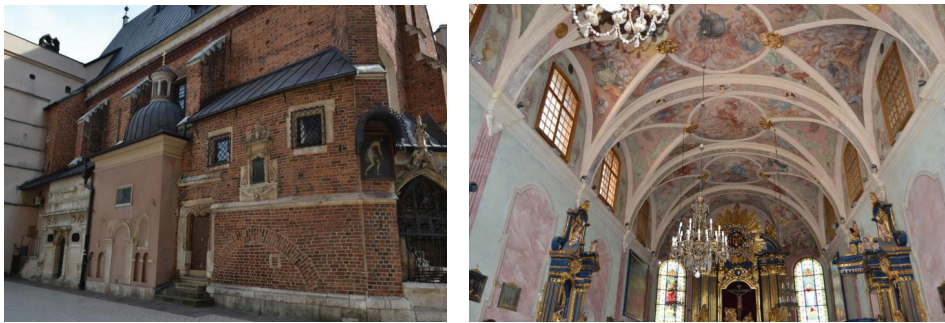


Fig. 1. Cracow St. Barbara's church. Northern wall and interior of the church.

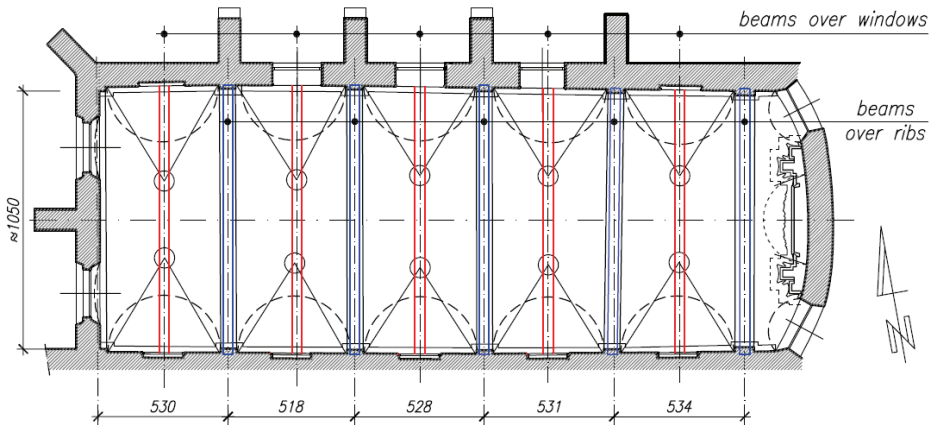


Fig. 2. St. Barbara's church. Plan of barrel vault with cable system stabilizing lateral walls.

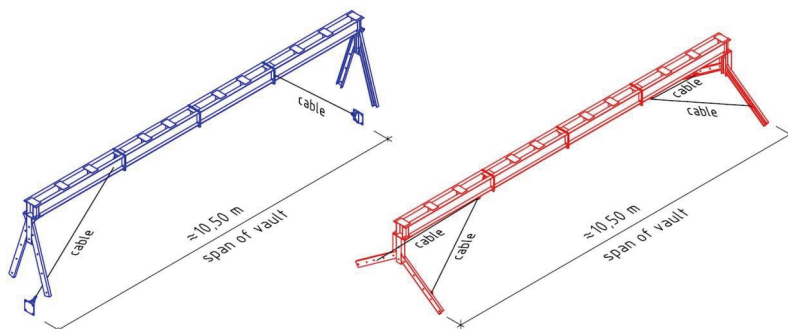


Fig. 3. St. Barbara's church. Beams with cables to be placed in axes of ribs and over the lunettes of vault.

Our structure was to be hidden in the space of the attic. The role of beams was to take the vertical components of thrust forces. One type of these sets were placed in the axes of ribs and another over the lunettes of the vault (Fig. 3). The system was supposed to resist thrust forces transmitted from the vault to the walls. Unfortunately, our structure was not built. Instead, additional reinforced concrete ribs were placed on the upper surface of the vault. This system is fixed to historical elements and therefore does not conform to the conservation rules.

An impressive brick vault from the second half of 19<sup>th</sup> century covers a large space for prayer of the synagogue in Dąbrowa Tarnowska, Poland (Fig. 4). Three ribs of 14.0- m- span support very thin vaults of double curvature resembling sails. Vaults are only half a brick thick and stiffened with ribs which are one brick deep when seen from the upper side. Vertical loads flow down through the pilasters situated between big windows. Horizontal thrust forces are compensated by steel bowstrings built in at the level of abutments.



Fig. 4. Synagogue in Dąbrowa Tarnowska. Southern elevation. Damage to the wall caused by rain water.

The Germans changed the synagogue into a warehouse during the World War II and it was used in this way until the seventies of 20<sup>th</sup> century. Then a design of adaptation for the community centre was made but very few of design works were completed. The condition of the building was constantly deteriorating, the biggest segment of the vault over the entrance collapsed and one of bowstrings broke off. For a long time the vault was moistened by rain water because of leakage in the roofing so corrosion damage of bowstrings inside the walls was very likely, too (Fig. 4).

We have proposed another tension-strut system hidden in the space of the attic and invisible inside the interior decorated with paintings (Fig. 5). Cables joining both lateral walls had to be anchored at the lowest possible level, near the abutments in order to reduce bending of the attic wall. It was also necessary to avoid collisions with the existing wooden roof structure. Considering all these conditions we placed triangular tension-strut sets on both sides of each roof truss. They consisted of two inclined bars leaning on top of the walls and connected under the ridge of the roof. Lower ends of these bars were connected to the steel strings. One of two supports on the wall was equipped with slide bearing. Compressed bars were made of steel roll formed shapes. Pairs of such systems were stabilized by cross braces. Oblique cables were fixed in upper nodes of triangular sets and their lower ends were anchored near vault abutments. These cables were meant to resist the thrust forces.

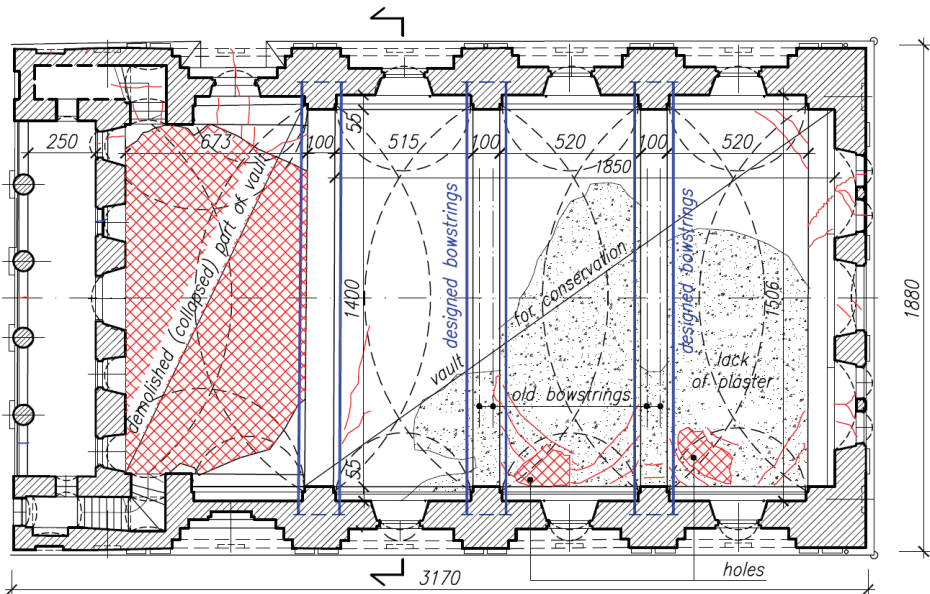


Fig.5. Plan of synagogue in Dąbrowa Tarnowska. Tension-strut system to resist the thrust forces.

Structural calculations started from defining the thrust forces transmitted from the ribs to the pillars of lateral walls. Circular geometry and lack of backfill on vault made it possible to get theoretical results well compatible with the real values. Triangular tension-strut system (Fig. 6) was designed for design values of thrust forces with a factor of safety 1,2. However, it was predicted that during assembling the steel structure, before removing provisional protective strings, the force in lower cables was only 0,75 of the value of the characteristic force. It was determined on the basis of elongation of a string. For one cable the calculated value of the force was 75,0 kN.

The length of the inclined cables was  $l = 4,30\text{m}$ . To achieve the required force it was necessary to apply cables of a diameter 20mm and elongate them by means of nuts, on the basis of Hooke's law:

$$\Delta l = \frac{75,0}{3,14 \times 10^{-4}} / 205 \times 10^6 \times 4,30 = 0,005 \text{ m} = 5,0 \text{ mm}$$

Thus the tension force in cables could be controlled with simple measuring instruments.

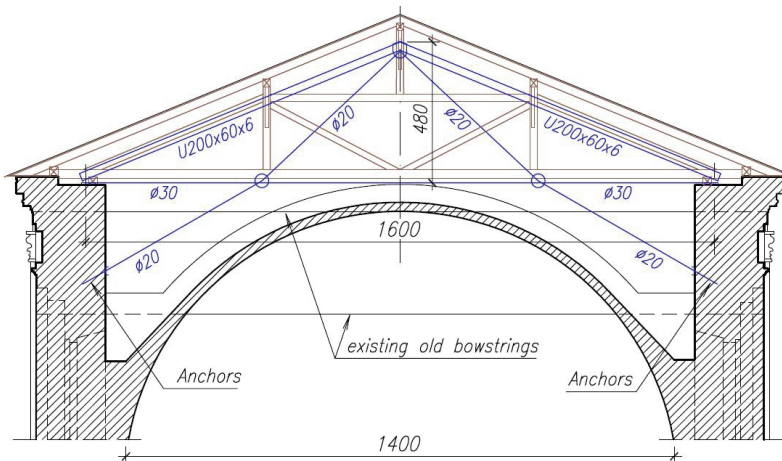


Fig. 6. Triangular tension-strut sets to be placed on both sides of each roof truss.

Finally, a different proposal was chosen and approved by the conservatory authority as the cheapest solution was desired. Instead of tension-strut structure hidden in the attic, additional bowstrings made of flat steel were assembled in the rib axes between the old ones.



The vault in the treasury of the archcathedral in Lublin, Poland was seriously damaged, threatened by a disaster. The treasury built as an annexe to semicircular presbytery was equipped with a double layer vault decorated by the court painter of king August III Sas. The outside wall leant out because of weak foundation and thrust forces from the vault. Large cracks appeared on the lower and upper vaults (Fig. 7). The foundation was reinforced during recent renovation but it was also necessary to remove dangerous horizontal forces from vaults pushing the outer wall and reinforce uncommon structure of the roof. A system of four inclined steel beams fixed with bolts to the roof rafters was designed in the attic (Fig. 9). The upper ends of beams were anchored in the presbytery wall and the lower ones on the top of the outer treasury wall. In this way the middle sector of deflected rafter framing was supported and both longitudinal walls fastened together. The cable systems transmitted thrust forces down to the level of the vault abutment and reduced the bending of the steel beams fixed to the rafters. The designed structure was assembled in the attic of the treasury and now fulfils its role as expected by the authors (Fig. 8).



Fig. 7. Treasury of archcathedral in Lublin. Upper and lower vault during conservation.



Fig. 8. Tension-strut system assembled in the attic of Lublin archcathedral treasury.

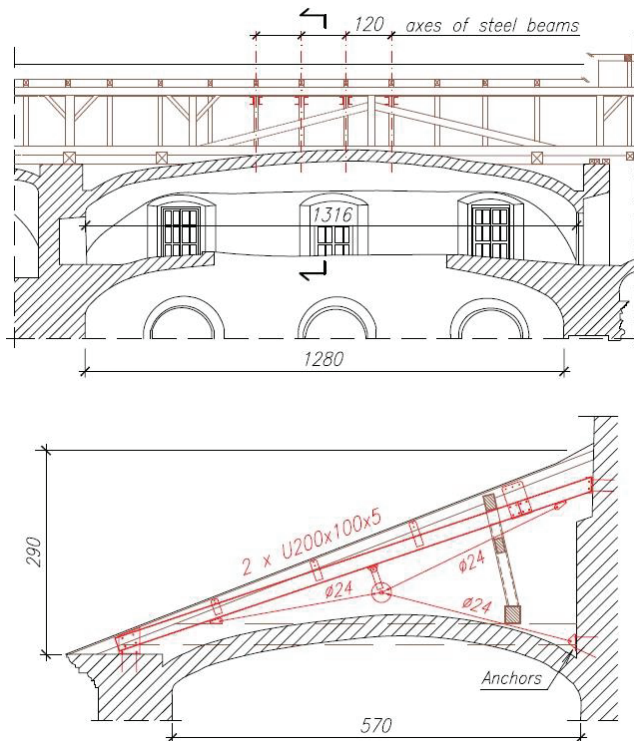


Fig. 9. Treasury of archcathedral in Lublin. Cable system resisting thrust forces from the vault.

In such a way, thanks to additional tension-strut systems the most important threat causing danger to vaults can be eliminated. However, repairing and strengthening the vault masonry structure is usually also required. Composite fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) is an innovative technology for effective strengthening of historical masonry structures [1]. Nowadays, analysis including discontinuous nature and nonlinear behavior of masonry is supported by computer technology. However, numerical modelling of such structures is always a challenging task [7].

### 3. RAFTER FRAMINGS

Timber roof structures are the least durable elements of historical buildings. They can not only be destroyed by fires but can be also damaged by biological corrosion in zones of roofing leakage. Few preserved historical rafter framings should be protected now. Only completely destroyed elements should be replaced with new ones.



We commonly observe deformations and excessive deflections of wooden elements. Increase of deflection under long lasting load is caused by creep and partial loss of strength. After tens and hundreds of years deflections become so considerable that wooden elements lean on floors or vaults causing threat to their structure. Skilfully assembled tension-strut systems enable straightening and geometrical adjustment of the roof structure [4]. The static system usually changes in that case.

In St Peter and Paul’s church in Cracow the roof span measured between supports is 14.45 m. Rafter framing consists of roof trusses with collar beams. One in two of them is equipped with a footing beam. Collar beams are supported on longitudinal capping beams of posts set on the footing beam. Bracings of roof trusses stabilize the structure crosswise. Footing beams were significantly deflected and leant on the key course of the vault causing dangerous loading with the roof.

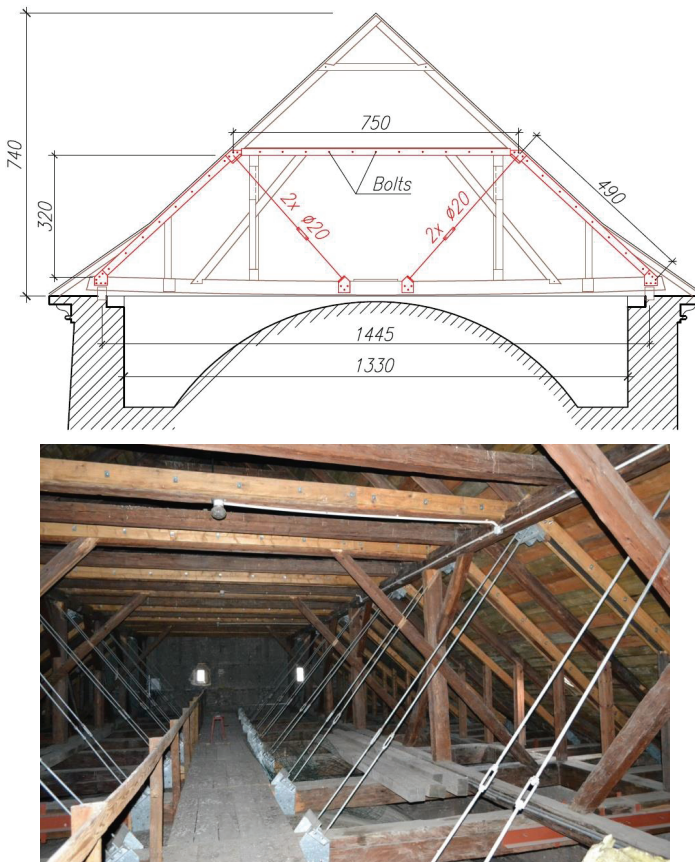


Fig. 10. St Peter and Paul’s church. Tension-strut system lifting the roof footing beams.

It was necessary to lift the middle sections of trusses. However, use of additional forces in existing wooden trusses caused risk of their destruction. Therefore, collar beams and lower sections of rafters were reinforced with suitable wooden beams. Rafters were joined with footing beams by means of additional steel elements. Then in the upper nodes of such new frames oblique bars or hangers were fixed and footing beams in the middle length were suspended. Shortening the hangers with screws caused lifting and straightening of the footing beams. Deflections of roof trusses may be still controlled. Length adjustment of cables and change of truss geometry are possible if necessary (Fig. 10).

A similar threat to the vaults from the roof structure occurred in a synagogue in Dąbrowa Tarnowska. Suspended timber roof trusses equipped with three hangers have the span of 15.0 m. After a long time they deflected significantly and loaded the brick ribs of the vault (Fig. 11). Our cable system was supposed to pull up the lateral hangers. In this way the bottom wooden bowstrings of trusses were to be lifted until they got straightened and a safe distance between the roof structure and the key course of the vault could be achieved. We designed pairs of steel bars joined with bolts only in the top nodes of the truss hangers. Their lower ends were welded to steel plates leaning on a footing beam near the truss supports. The steel plates were connected with a horizontal steel bowstring which could be shortened by a tightening screw. This action was supposed to force the plates to slide on the surface of a wooden beam and steel bars and lift the truss hangers (Fig. 12). Afterwards, the plates were to be fixed with screws to the footing beam and additional wooden bracings were to be assembled in the middle of the truss in order to stiffen the structure. Despite the simplicity and structural logic, the designed tension-strut system was rejected by the contractor of renovation works. The roof lifting was executed without our participation, probably using hydraulic jacks put on the old brick ribs which caused additional threat to the vault structure.



Fig. 11. Synagogue in Dąbrowa Tarnowska. Wooden truss bowstring loading the vault rib.

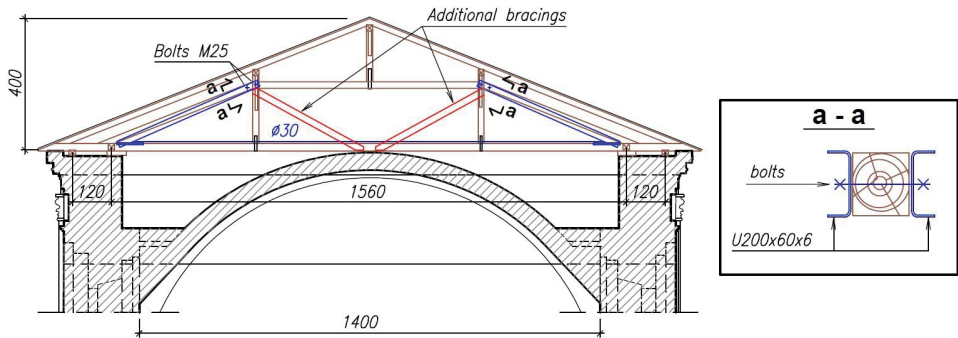


Fig. 12. Synagogue in Dąbrowa Tarnowska. Cable system lifting the roof.

In some historical buildings only the decorated elevation is under conservation protection. Consequently, the inner structure can be completely removed and replaced by modern, lightweight floors and partition walls. Usually the roof structure is then changed, too. In this case the interior of the building must be protected from rain during the period between demolition of the old roof and construction of the new one.

A similar situation happened in the case of reconstruction of a building of Cracow University of Economics. It was decided that the original thick brick walls and ceilings would be removed. The interior was designed in a completely different way with an additional floor and a new roof. The contractor asked for the solution of temporary protection of the interior (Fig. 13). Purlins of the existing roof structure were supported by posts standing on the floor of the attic. We proposed to change the static system of the roof trusses by adding steel cables connecting ends of rafters and supporting the posts. Thus after demolition of the upper floor the span of roof trusses was over 14 m and the posts of the old rafter framing became compressed members of new trusses (Fig. 14).



Fig. 13. Building of Cracow University of Economics. Roof structure before and after rebuilding.

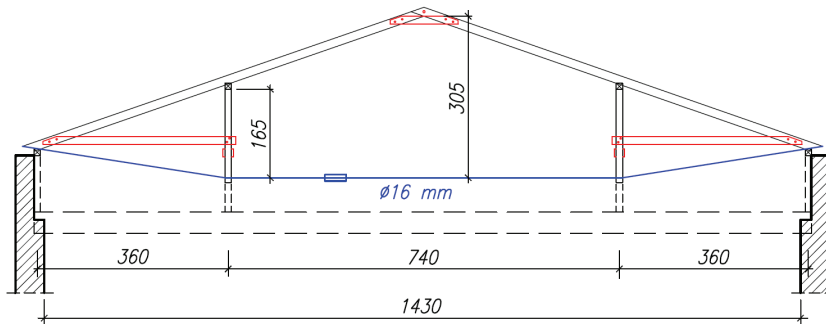


Fig. 14. New cable roof truss.

A temporary tension-strut roof was to be in use only during the summer months, so we did not consider the load of snow in calculations. It had an important influence on the lightness of the structure. But such a suspension roof could also be a permanent cover of a large hall in the attic if we considered the weight of thermal insulation and the load of snow in the design.

#### 4. CONCLUSION

The examples of tension-strut systems presented above applied in historical buildings confirm their compatibility with the conservation law in force and also their efficiency of practically executed designs. Although similar threats and structural damages occur in most buildings which are a few hundred years old, individual design solutions are required in each case. New tension-strut systems developed in 20th and 21st century, e.g. tensegrity and deployable pantografic lattice structures will certainly be applied in historical buildings soon [2]. Historical investigation and detailed measurement of geometry and deflections have to be made before choosing the appropriate method of reinforcing an old structure. Other factors affecting the stability of the building, mainly the foundation, the existing soil and water conditions are also necessary.

## REFERENCES

1. E. Bertolesi, G. Milani, B. Ghiassi, „Advanced finite element modeling of textile-reinforced mortar strengthened masonry”, Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures. From Theory to Application, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering 2019, pp. 713-743.
2. N. Friedman, A. Ibrahimbegovic, “Overview of highly flexible, deployable lattice structures used in architecture and civil engineering undergoing large displacements”, YBL Journal of Built Environment, Vol. 1, Issue 1 (2013), pp. 85-103.
3. S. Jurczakiewicz, S. Karczmarczyk, “Zabezpieczanie sklepień przed rozporom bez ściągow wprowadzonych do wnętrza”, Materiały Budowlane: technologie, rynek, wykonawstwo. – 9/2010 (457), pp. 52-56.
4. S. Jurczakiewicz, S. Karczmarczyk, “Współczesne możliwości ochrony i wzmacniania zabytkowych więźb dachowych”, Czasopismo Techniczne – 8-A/2010, pp. 241-250.
5. S. Jurczakiewicz, “Ewolucja form systemów prętowo-ciężnowych w architekturze współczesnej” Doctoral thesis, Cracow University of Technology, Poland, 2017.
6. A. Kadłuczka, “Ochrona dziedzictwa architektury i urbanistyki. Doktryny, teoria, praktyka.”, Cracow University of Technology, Poland, 2018.
7. M. R. Valluzzi, M. Salvalaggio, L. Sbrogiò, „Repair and conservation of masonry structures”, Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures. From Theory to Application, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering 2019, pp. 201-235.

## LIST OF FIGURES:

Fig. 1. Cracow St. Barbara’s church. Northern wall and interior of the church.

Ryc. 1. Kościół św. Barbary w Krakowie. Ściana północna i wnętrze kościoła.

Fig. 2. St. Barbara’s church. Plan of barrel vault with cable system stabilizing lateral walls.

Ryc. 2. Kościół św. Barbary. Rzut sklepienia kolebkowego z systemem ciężnowym stabilizującym ściany boczne.

Fig. 3. St. Barbara’s church. Beams with cables to be placed in axes of ribs and over the lunettes of vault.

Ryc. 3. Kościół św. Barbary. Belki z ciężnami do montażu w osiach żeber i nad lunetami sklepienia.

Fig. 4. Synagogue in Dąbrowa Tarnowska. Southern elevation. Damage to the wall caused by rain water.

Ryc. 4. Synagoga w Dąbrowie Tarnowskiej. Elewacja południowa. Uszkodzenia ściany spowodowane przez wodę opadową.

Fig. 5. Plan of synagogue in Dąbrowa Tarnowska. Tension-strut system to resist the thrust forces.

Ryc. 5. Rzut synagogi w Dąbrowie Tarnowskiej. System prętowo-ciężnowy równoważący siły rozporu.

Fig. 6. Triangular tension-strut sets to be placed on both sides of each roof truss.

Ryc. 6. Trójkątne układy prętowo-ciężnowe do montażu po bokach każdego więzara dachowego.

Fig. 7. Treasury of archcathedral in Lublin. Upper and lower vault during conservation.

Ryc. 7. Skarbiec archikatedralny w Lublinie. Górne i dolne sklepienie podczas konserwacji.

Fig. 8. Tension-strut system assembled in the attic of Lublin archcathedral treasury.

Ryc. 8. System prętowo-ciężnowy zamontowany na poddaszu skarbcza lubelskiej archikatedry.

Fig. 9. Treasury of archcathedral in Lublin. Cable system resisting thrust forces from the vault.

Ryc. 9. Skarbiec archikatedry w Lublinie. System ciężnowy równoważący siły rozporu ze sklepienia.

Fig. 10. St Peter and Paul's church. Tension-strut system lifting the roof footing beams.

Ryc. 10. Kościół Św. Piotra i Pawła. System prętowo-ciężnowy podnoszący tramy dachowe.

Fig. 11. Synagogue in Dąbrowa Tarnowska. Wooden truss bowstring loading vault ribs.

Ryc. 11. Synagoga w Dąbrowie Tarnowskiej. Drewniany ściągię wiązara obciążający żebro sklepienia.

Fig. 12. Synagogue in Dąbrowa Tarnowska. Cable system lifting the roof.

Ryc. 12. Synagoga w Dąbrowie Tarnowskiej. System ciężnowy podnoszący dach.

Fig. 13. Building of Cracow University of Economics. Roof structure before and after rebuilding.

Ryc. 13. Budynek Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie. Konstrukcja dachu przed i po przebudowie.

Fig. 14. New cable roof truss.

Ryc. 14. Nowy ciężnowy wiązara dachu.

#### SYSTEMY PRĘTOWO-CIĘGNOWE W KONSERWACJI BUDYNKÓW HISTORYCZNYCH - PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ

*Keywords:* systemy prętowo-ciężnowe, sklepienia, więźby dachowe, konserwacja budynków

#### STRESZCZENIE

Systemy prętowo-ciężnowe to nowoczesne konstrukcje złożone z wiotkich ciężgien i membran zdolnych do przenoszenia wyłącznie naprężeń rozciągających oraz współpracujących z nimi prętów ściśkanych. Są lekkie i bardzo efektywne pod względem wykorzystania wytrzymałościowych cech materiałów. Łatwość montażu w ograniczonej przestrzeni np. budynku istniejącego oraz możliwość zmiany geometrii przez regulację długości ciężgien sprawiają, że mogą one być przydatne w naprawach konstrukcji obiektów historycznych. Ich stosowanie jest zgodne z aktualną doktryną konserwatorską. Autorzy prezentują przykłady zastosowań tych systemów w obiektach historycznych.

Kamienne i ceglane kopuły i sklepienia wznoszone od czasów rzymskich do końca XIX wieku były stabilizowane za pomocą masywnych ścian i zewnętrznych przypór oraz żelaznych ściągow. Ściągi te bywały w późniejszym okresie usuwane, lub ulegały korozji. Ściany i przypory w wielu wypadkach były niewystarczające do przeciwstawienia siłom rozporu od sklepień, lub ich fundamenty ulegały deformacjom. Powoduje to obecnie pęknięcia i odkształcenia sklepień. Naprawa konstrukcji nośnej powinna poprzedzać konserwację wystroju wnętrza. Zaniechanie naprawy prowadzi nieuchronnie do katastrofy i zniszczenia sklepienia.

Krakowski kościół św. Barbary posiada barokowe sklepienie kolebkowe z lunetami. Jego rozpiętość wynosi 10,5 m. W okresie niedawnego remontu zauważono na nim podłużne pęknięcia świadczące o niedostatecznej sztywności podłużnych ścian kościoła. Należało powstrzymać rozwój uszkodzeń. Najprostsze rozwiązanie jakim byłyby poprzeczne ściągi w poziomie wezłowi nie zostało dopuszczone przez władze konserwatorskie. Zaprojektowaliśmy więc w obrębie poddasza system prętowo-ciężnowy złożony z poprzecznych belek ze ściągami spinającymi ściany północną i południową. Układ ten miał równoważyć obliczone teoretycznie siły rozporu przekazywane ze sklepienia na ściany budynku. Niestety nie doszło do realizacji naszego projektu. Zamiast tego wykonano na grzbiecie sklepienia żelbetowe żebra trwale złączone z płaszczem sklepienia. Jest to sprzeczne z zasadami konserwatorskimi.

W XIX-wiecznej synagodze w Dąbrowie Tarnowskiej istnieje lekkie sklepienie wsparte na gurtach o rozpiętości 14 m. Nieużytkowany od dawna budynek uległ poważnej destrukcji, a część sklepienia zawaliła się. Prawdopodobna też była korozja ściągow na odcinkach ukrytych w murze. Dla przeniesienia sił rozporu zaprojektowaliśmy w przestrzeni



poddasza, nad gurtami sklepienia, trójkątne układy prętowo-ciężnowe, których dolne skośne ciężna zakotwione przy wezłowiach sklepienia miały równoważyć siły rozporu. Wybrano jednak tańsze rozwiązanie z widocznymi wewnątrz dodatkowymi ściągami ze stalowego płaskownika w osiach gurtów. Takie też zabezpieczenie zrealizowano.

Poważnie uszkodzone, zagrożone katastrofą było podwójne sklepienie skarbcza Archikatedry w Lublinie. Zewnętrzna ściana budynku uległa wychyleniu na skutek osadzenia na słabonośnym gruncie i działania sił rozporu. Podłużny więzard dachowy zagrażał oparciem się na sklepieniu. Na obu sklepieniach pojawiły się liczne i szerokie pęknięcia.

Zaprojektowaliśmy system złożony z czterech pochyłych stalowych belek połączonych śrubami z istniejącymi krokiewkami dachowymi. Górne końce belek zostały zakotwione do muru prezbiterium, a dolne na koronie muru. Jednocześnie podparty więc został niebezpiecznie ugięty środkowy odcinek konstrukcji dachu oraz związane podłużne ściany budynku. Układy ciężnowe zapewniły przeniesienie w dół sił spinających obie ściany, w rejon podparcia sklepienia na ścianie prezbiterium oraz redukcję zginania stalowych belek związanych z krokiewkami. Konstrukcja ta została wykonana i po zamontowaniu na poddaszu skarbcza spełnia swoją rolę zgodnie z przewidywaniami autorów.

Drewniane konstrukcje dachów są najmniej trwałymi elementami budynków zabytkowych. Nieliczne zachowane historyczne konstrukcje dachów podlegają obecnie ochronie. Ich wymiana powinna się ograniczać tylko do całkowicie zniszczonych elementów. Powszechnie obserwowanymi zjawiskami są deformacje i nadmierne ugięcia drewnianych więzardów dachowych spowodowane pęczaniem i częściowo utratą wytrzymałości drewna. Po setkach lat użytkowania ugięcia bywają już tak znaczne, że dochodzi do oparcia dolnych elementów dachu na stropach i sklepieniach budynków zagrażając ich konstrukcji. W takiej sytuacji umiejętnie wprowadzone układy prętowo-ciężnowe umożliwiają wyprostowanie i regulację geometrii konstrukcji dachu. Jej schemat statyczny ulega przy tym zmianie.

W krakowskim kościele św. Piotra i Pawła rozpiętość konstrukcji dachu nad nawą mierzona między liniami oparcia na murłatach wynosi 14,5 m. Drewniane tramy uległy odkształceniu i oparły na kluczu sklepienia powodując jego obciążenie ciężarem dachu. Tramy zostały wyprostowane przez podniesienie ich środkowych odcinków ku górze za pomocą ciężarów ze śrubami rzymskimi. Wprowadzenie do istniejących więzardów dodatkowych sił wymagało jednak wzmocnienia jętek i dolnych odcinków krokwi przykładkami z drewna. Śruby rzymskie umożliwiają nadal regulację długości ciężarów i korektę geometrii więzardów.

W synagodze w Dąbrowie Tarnowskiej istniało podobne zagrożenie sklepień. Drewniane więzary wieszakowe, trzywieszakowe o rozpiętości 15 m z upływem czasu oparły się na kluczach ceglanych gurtów sklepienia nad salą modlitw. Zaprojektowane przez nas układy ciężnowe miały za zadanie pociągnąć boczne wieszaki więzardów ku górze powodując wyprostowanie dolnych ściągów zagrażających sklepieniu. Projekt został jednak odrzucony przez wykonawcę remontu. Podniesienie więzardów odbyło się bez naszego udziału, prawdopodobnie z wykorzystaniem dźwigników hydraulicznych ustawionych na kluczach gurtów sklepienia, co powodowało dodatkowe zagrożenie.

W niektórych obiektach historycznych ochronie konserwatorskiej podlegają tylko elewacje. Wewnętrzna struktura budynku może być całkowicie usunięta i zastąpiona nowoczesnymi, lekkimi ścianami i stropami. W takiej sytuacji, przez kilka miesięcy trwania robót budowlanych, wewnątrz budynku wymaga ochrony przed deszczem.

W budynku Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie zaprojektowaliśmy w takiej sytuacji tymczasowy dach wiszący uzupełniając istniejące więzary ciężnami z prętów. Wykorzystano przy tym większość elementów starej więzby. Przewidziano eksploatację dachu tylko przez jeden letni sezon budowlany, więc w projekcie nie uwzględniono obciążenia śniegiem. Po ewentualnym uwzględnieniu w projekcie izolacji termicznej połaci dachu i obciążenia śniegiem dach mógłby stanowić docelowe przekrycie bez podpór pośrednich całej powierzchni poddasza.

Przedstawione przykłady zastosowań systemów prętowo-ciężnowych w budynkach historycznych potwierdzają ich zgodność z obowiązującą doktryną konserwatorską, a w przypadku tych zrealizowanych konstrukcji również skuteczność naprawy. Chociaż w większości budynków, których historia liczy setki lat, występują podobne zagrożenia i uszkodzenia o charakterze konstrukcyjnym, to oczywiście w każdym z nich konieczne jest zastosowanie indywidualnego rozwiązania projektowego. Z pewnością w niedługim czasie do wzmacniania konstrukcji historycznych zastosowane zostaną też najnowsze systemy prętowo-ciężnowe np. tensegrity i składane konstrukcje nożycowe. Wykonanie każdego projektu muszą poprzedzić badania historyczne obiektu oraz szczegółowe pomiary geometrii i odkształceń elementów konstrukcyjnych. Niezbędna jest też ocena innych czynników mających wpływ na stateczność budynku, przede wszystkim sposobu posadowienia i warunków gruntowo-wodnych.

Received: 24.04.2020 Revised: 24.06.2020