

mgr inż. Jan Biernacki<sup>1)</sup>\*)

ORCID: 0000-0002-3573-4763

prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-9825-6343

# Tests of strengthened and unstrengthened masonry arches subjected to horizontal forces on supports

## *Badania wzmocnionych i niewzmocnionych murowanych łuków poddanych działaniom sił poziomych na podpory*

DOI: 10.15199/33.2025.08.02

**Abstract:** The article discusses the influence of horizontal compressive and tensile forces on arched masonry structures, especially in the context of terrain deformations caused by mining activities. The results of laboratory tests on models of masonry rib reinforced with FRCM technology and prefabricated reinforced concrete reinforcement are presented. The analyses showed a significant increase in the load-bearing capacity of the reinforced elements and a delay in the moment of damage occurrence. The results indicate the effectiveness of modern reinforcement methods in protecting historic structures.

**Keywords:** masonry structures; structural reinforcement; ground deformations; FRCM, masonry arches; horizontal forces; protection of monuments.

**Streszczenie:** W artykule omówiono wpływ poziomych sił ściskających i rozciągających na murowane konstrukcje łukowe, przede wszystkim w kontekście deformacji terenu wywołanych działalnością górniczą. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na modelach fragmentów żeber wzmocnionych w technologii FRCM oraz prefabrykowanym wzmocnieniem żelbetowym. Analizy wykazały istotne zwiększenie nośności wzmocnionych elementów oraz opóźnienie momentu powstania uszkodzeń. Wyniki wskazują na skuteczność nowoczesnych metod wzmocniania w ochronie konstrukcji zabytkowych.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje murowe; wzmocnianie konstrukcji; deformacje podłoża; FRCM; łuki murowane; siły poziome; ochrona zabytków.

Both in Poland and worldwide, numerous cases of terrain surface deformations are observed, resulting from various natural and anthropogenic phenomena. The causes of these deformations may include, among others, seismic activity, impacts of mining operations, or slope landslides. In areas affected by such phenomena, various types of building structures are often located, which may be seriously endangered by their effects. Historic structures, in particular, are highly vulnerable to the forces accompanying deformations.

The behavior of curved masonry structures subjected to vertical loading is often analyzed using different models (including shell and beam models). However, analyses of the effects of support displacements generating compressive or tensile forces are undertaken much less frequently. Numerous publications [1, 2, 3, 11, 12, 15] describe methods of strengthening masonry structures in the context of their susceptibility to different types of loading. Nevertheless, there are relatively few research studies addressing the strengthening of arch structures subjected to horizontal loads [14].

This article presents the results of experimental investigations carried out at the Silesian University of Technology, the aim of which was to determine the effectiveness of using com-

arówno w Polsce, jak i na świecie obserwuje się przypadki deformacji powierzchni terenu, będące wynikiem różnych zjawisk naturalnych i antropogenicznych. Przyczynami tych deformacji mogą być m.in. aktywność sejsmiczna, wpływy od eksploatacji górniczej czy osuwiska skarp. Na obszarach dotkniętych tego typu zjawiskami często znajdują się różnego rodzaju obiekty budowlane, które mogą być zagrożone ich skutkami. Szczególnie wrażliwe na działanie sił towarzyszących deformacjom są zabytkowe konstrukcje.

Zagadnienie zachowania się zakrzywionych konstrukcji murowych poddanych pionowemu obciążeniu bywa analizowane przy użyciu różnych modeli (m.in. powłokowych oraz prętowych), natomiast znacznie rzadziej podejmowane są analizy wpływu przemieszczeń podpór generujących siły ściskające lub rozciągające. W wielu publikacjach [1÷6] opisano metody wzmocniania konstrukcji murowych w kontekście ich podatności na różne typy obciążeń. Niemniej jednak mało jest prac badawczych dotyczących wzmocniania konstrukcji łukowych poddanych obciążeniom poziomym [7]. W artykule zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych prowadzonych na Politechnice Śląskiej, których celem było określenie skuteczności zastosowania materiałów kompozytowych oraz żelbetu w procesie wzmocniania murowanych sklepień i łuków poddanych działaniu poziomej siły ściskającej oraz rozciągającej.

<sup>1)</sup> Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

<sup>\*)</sup> Correspondence address: Jan.Biernacki@polsl.pl

posite materials and reinforced concrete in the strengthening process of masonry vaults and arches subjected to horizontal compressive and tensile forces.

### Origin of Horizontal Forces in the Structure

In the case of structures located in areas affected by subsoil deformations, there exists a significant risk of horizontal loads acting on the load-bearing elements of buildings. These loads may result from uneven displacements of supports, a phenomenon frequently observed in areas influenced by underground mining operations. Mining impacts may take the form of continuous or discontinuous deformations. In the case of continuous deformation, ground curvature usually occurs, generating in the building structure first tensile and subsequently compressive forces. The individual stages of mining impact on a building structure are presented below (Figure 1).

The described phenomena pose a serious threat to buildings, particularly historical objects such as churches, in which large-span masonry vaults serve as the primary ceiling structures. Vaults and arches are subjected to compression. The problem arises when these structures are forced to resist tensile forces. In such cases, cracking of the masonry typically occurs.

Horizontal compressive forces acting on vaults may also lead to significant damage. Particularly dangerous are cases in which tensile and compressive forces occur simultaneously, as this constitutes a major hazard for buildings under heritage protection [9]. The behavior of building structures under mining exploitation influences has been comprehensively discussed in [7], which also addressed issues of modeling and predicting the effects of subsoil deformation.

### Tests on Masonry Rib Segments

**Description of Test Models.** A total of twelve test models of masonry rib segments were prepared. Six of them were subjected to compressive forces, while the remaining were exposed to horizontal tensile forces. All models were manufactured using the same technological procedure and materials – ceramic bricks of class 20 and masonry mortar of class M5. In the support zones, steel reinforcement bars of 350 mm length and 8 mm diameter were applied. This reinforcement aimed to eliminate the occurrence of cracks in the support zone and detachment of the masonry structure from the steel fitting. The structural system was adopted as simply supported. The models were mounted in steel fittings through which the reinforcement bars were led (Figure 2). The cross-sectional dimensions along section A-A of the model were 380 × 250 mm.

In the first test series, six arches were analyzed. Two of them, unreinforced, served as reference models; two were strength-

### Geneza występowania sił poziomych w konstrukcji

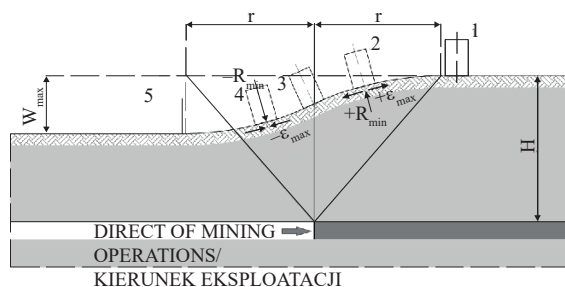
W przypadku konstrukcji zlokalizowanych na obszarach objętych deformacjami podłoża istnieje istotne ryzyko wystąpienia poziomych obciążeń działających na elementy nośne budowli. Obciążenia te mogą być rezultatem nierównomiernych przemieszczeń podpór, co jest zjawiskiem często obserwowanym na terenach objętych wpływami podziemnej eksploatacji górniczej. Mogą to być deformacje ciągłe oraz nieciągłe. W przypadku deformacji ciągłej zwykle występuje krzywizna terenu generująca w obiekcie budowlanym najpierw siły rozciągające, a później ściskające (rysunek 1).

Opisane zjawiska stwarzają duże zagrożenie szczególnie w przypadku obiektów zabytkowych, takich jak kościoły, w których sklepienia murowane o znacznej rozpiętości pełnią funkcję głównych elementów przekrycia stropowego. W sklepieniach i łukach występuje ściskanie. Problem pojawia się, gdy

konstrukcje te zmuszone są przejmować siły rozciągające. Wówczas zwykle dochodzi do zarysowania muru.

Siły ściskające o charakterze poziomym, działające na sklepienia, również mogą prowadzić do znacznych uszkodzeń. Szczególnie niebezpieczne są przypadki, w których jednocześnie występują siły rozciągające i ściskające, co stanowi duże zagrożenie w przypadku budynków objętych ochroną konserwatorską [8]. Zachowanie konstrukcji budowlanych w warunkach wpływów eksploatacji górniczej zostało

szczegółowo omówione w pracy [9], w której podjęto również problematykę modelowania oraz prognozowania skutków deformacji podłoża.



Markings/Oznaczenia: 1 – structure prior to deformation/ konstrukcja przed wystąpieniem deformacji; 2 – occurrence of tensile forces/wystąpienie sił rozciągających; 3 – stabilization/ustabilizowanie; 4 – occurrence of compressive forces/wystąpienie sił ściskających; 5 – structure after deformation/ konstrukcja po wystąpieniu deformacji

**Fig. 1. Diagram of a mining subsidence trough**  
Rys. 1. Schemat niecki osiadania

### Badania fragmentów murowanych żebier

**Opis badanych modeli.** Wykonano badania dwunastu modeli fragmentów murowanych żebier. Sześć z nich poddano działaniu siły ściskającej, natomiast pozostałe zostały obciążone poziomą siłą rozciągającą. Wszystkie modele wykonano wg identycznej procedury technologicznej, z zastosowaniem tych samych materiałów – cegieł ceramicznych klasy 20 oraz zaprawy murarskiej klasy M5. W strefach przypodporowych zastosowano zbrojenie stalowe o długości 350 mm i średnicy 8 mm. Zbrojenie to miało na celu eliminację wystąpienia rysy w strefie przypodporowej oraz odspojenia konstrukcji murowanej od stalowego okucia. Układ konstrukcyjny przyjęto jako wolnopodparty. Modele osadzono w stalowych okuciach, przez które poprowadzono elementy zbrojenia (rysunek 2). Wymiary przekroju A-A modelu wynoszą 380×250 mm.

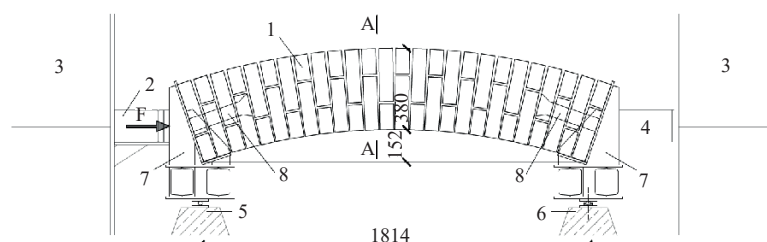
W pierwszym cyklu badawczym analizie poddano sześć łuków. Dwa z nich, niewzmocnione, stanowiły modele odniesienia, a dwa kolejne wzmocniono z zastosowaniem technologii FRCM (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix). Ostatnie dwa

ened using the FRCM (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix) technology; and the final two were reinforced with partially prefabricated reinforced concrete elements placed in the upper part of the arch, which, after additional reinforcement and monolithic integration, formed a strengthening rib. In the case of FRCM technology, a standard application procedure was used: the arch surface was coated with the first layer of cementitious matrix, a composite mesh of PBO fibers was embedded, and the surface was then covered with a second layer of mortar (Figure 3). The procedure was carried out in accordance with the manufacturer's recommendations. To evaluate the bond of the composite layer to the substrate, a pull-off test was performed. In this model, the cross-sectional dimensions along section B-B were approximately  $390 \times 260$  mm, similar to the previous model.

The second type of strengthening was based on prefabricated concrete elements, which were arranged at equal intervals along the arch. Four 10 mm diameter (AIII-N) reinforcement bars were then passed through openings in the prefabricates. The entire system was integrated using concrete mix poured into the spaces between prefabricates. Prefabricated elements were designed with four openings, enabling easy placement of reinforcement. Bonding of the reinforced concrete rib to the masonry element was

achieved by inserting steel bars anchored with epoxy resin at a depth of 150 mm into the spaces between prefabricates (Figure 4). The resin application was carried out according to the manufacturer's instructions. Approximate cross-sectional dimensions along section A-A were  $530 \times 250$  mm.

**Experimental Procedure.** The tests were carried out at the Laboratory of the Faculty of Civil Engineering, Silesian University of Technology. A hydraulic actuator with a maximum capacity of 900 kN was used to load all models. The actuator was mounted to a steel frame anchored to the laboratory strong floor. The arch models were clamped between the steel columns of the frame using the hydraulic actuator and a square-section steel tube. Both the actuator and the tube were precisely aligned with the axis of the steel fittings forming the ends of the arches (Figures 2–4). The load was applied continuously and uniformly.

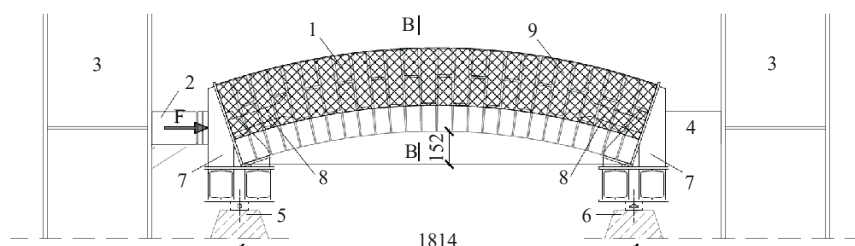


**Fig. 2. Test setup diagram without reinforcement (TOR):** 1 – Test specimen; 2 – Hydraulic actuator; 3 – Steel frame; 4 – Square steel tube; 5 – Hinged-sliding support; 6 – Hinged-fixed support; 7 – Steel fitting; 8 – Support zone reinforcement

*Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego bez wzmocnienia (LNS):* 1 – model badawczy; 2 – siłownik hydrauliczny; 3 – rama stalowa; 4 – rura kwadratowa; 5 – podpora przegubowo przesuwna; 6 – podpora przegubowo nieprzesuwna; 7 – okucie stalowe; 8 – zbrojenie przypodporowe

zastosowano standardową procedurę aplikacji – na powierzchnię łuku naniesiono pierwszą warstwę matrycy cementowej, zatopiono w niej kompozytową siatkę z włókien PBO, a następnie pokryto całość drugą warstwą zaprawy (rysunek 3). Proces realizowano zgodnie z zaleceniami producenta systemu. W celu oceny przyczepności warstwy kompozytowej do podłoża przeprowadzono badanie typu pull-off. W tym modelu wymiary przekroju B-B były zbliżone do modelu omówionego powyżej i wynosiły ok.  $390 \times 260$  mm.

Drugi typ wzmocnienia to prefabrykowane betonowe elementy, które rozmieszczono w równych odstępach wzdłuż łuku, a następnie przez otwory w prefabrykacie przepuszczono 4 pręty średnicy 10 mm (AIII-N). Całość połączono mieszanką betonową umieszczoną w przestrzeniach między prefabrykami. Elementy prefabrykowane zostały zaprojektowane z czterema otworami, co umożliwiło bezproblemowe poprowadzenie zbrojenia. Zespoleńie żebra żelbetowego z elementem murowanym



**Fig. 3. Test setup diagram with FRCM reinforcement (TWR):** 1 – Test specimen; 2 – Hydraulic actuator; 3 – Steel frame; 4 – Square steel tube; 5 – Hinged-sliding support; 6 – Hinged-fixed support; 7 – Steel fitting; 8 – Support zone reinforcement; 9 – FRCM reinforcement

*Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego ze wzmocnieniem (LWS-3, LWS-4) za pomocą FRCM:* 1 – model badawczy; 2 – siłownik hydrauliczny; 3 – rama stalowa; 4 – rura kwadratowa; 5 – podpora przegubowo przesuwna; 6 – podpora przegubowo nieprzesuwna; 7 – okucie stalowe; 8 – zbrojenie przypodporowe; 9 – wzmocnienie FRCM

uzyskano przez osadzenie w przestrzeniach między prefabrykami stalowych prętów wklejanych na żywicy epoksydowej na głębokość 150 mm (rysunek 4). Procedura aplikacji żywicy została przeprowadzona zgodnie z instrukcją producenta. Przybliżone wymiary przekroju A-A można określić jako  $530 \times 250$  mm.

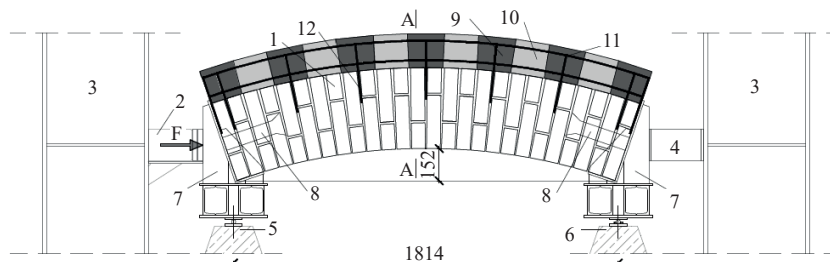
**Realizacja badań.** Badania przeprowadzono w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Do obciążania wszystkich modeli zastosowano siłownik hydrauliczny o maksymalnej sile 900 kN, który zamontowano do stalowej ramy, przytwierdzonej do stropu laboratorium, tzw. płyty wielkich sił. Modele łuków zostały zakleszczone pomiędzy stalowymi słupami ramy za pomocą siłownika hydraulicznego oraz stalowej rury o przekroju kwadratowym. Zarówno siłownik, jak i rurę umieszczono precyzyjnie w osi okuc stalowych stanowiących zakończenia łuków (rysunki 2÷4).

wzmocniono, wykorzystując częściowo prefabrykowane żelbetowe elementy umieszczone w górnej części łuku, które po dozbrojeniu i zmonolityzowaniu utworzyły żebro wzmacniające. W przypadku technologii FRCM

During the tests, displacements at selected points of the models were measured, and the applied load was recorded. Deformation monitoring was conducted using LVDT displacement sensors (Linear Variable Differential Transformer) and a digital image correlation system (Aramis). The test series began with reference models—unreinforced arches subjected to compression, denoted as UCA – Unreinforced Compressed Arch. Subsequently, reinforced arch models were tested, referred to as RCA – Reinforced Compressed Arch.

Photo 1÷3 present photographs of damage observed during the laboratory tests. Photo 1 illustrates the failure of one reference model, resulting from the compressive strength of masonry being exceeded in the lower part of the cross-section, which led to arch collapse. Photo 2 shows the failure of an arch reinforced with an additional RC rib. The damage initiated with bond loss between the reinforcing steel bar and the epoxy resin of the anchoring system. Consequently, sudden masonry crushing occurred in the compressed zone. A similar failure mechanism was observed in the model reinforced with FRCM technology (Photo 3). In this case, tensile forces in the upper part of the cross-section were carried by PBO composite fibers. Once their tensile capacity was exceeded and the fibers ruptured, crushing of the masonry in the compressed zone followed.

In all cases, early appearance of cracks was observed. Longitudinal cracks in the lower arch zones and transverse cracks in tensile regions were recorded. In the models reinforced with RC ribs (RCA-1 and RCA-2), due to increased effective cross-sectional height and neutral axis shift, longitudinal cracks occurred at higher levels compared to reference models and FRCM-reinforced arches (RCA-3 and RCA-4).



**Fig. 4. Test setup diagram with reinforcement (TWR):** 1 – Test specimen; 2 – Hydraulic actuator; 3 – Steel frame; 4 – Square steel tube; 5 – Hinged–sliding support; 6 – Hinged–fixed support; 7 – Steel fitting; 8 – Support zone reinforcement; 9 – Monolithic reinforcement segment; 10 – Prefabricated reinforcement segment; 11 – Reinforcement bars; 12 – Chemical anchor

*Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego ze wzmocnieniem (LWS-1, LWS-2):* 1 – model badawczy; 2 – siłownik hydrauliczny; 3 – rama stalowa; 4 – rura kwadratowa; 5 – podpora przegubowo przesuwna; 6 – podpora przegubowo nieprzesuwna; 7 – okucie stalowe; 8 – zbrojenie przypodporowe; 9 – monolityczny fragment wzmocnienia; 10 – prefabrykowany fragment wzmocnienia; 11 – zbrojenie; 12 – kotwa chemiczna

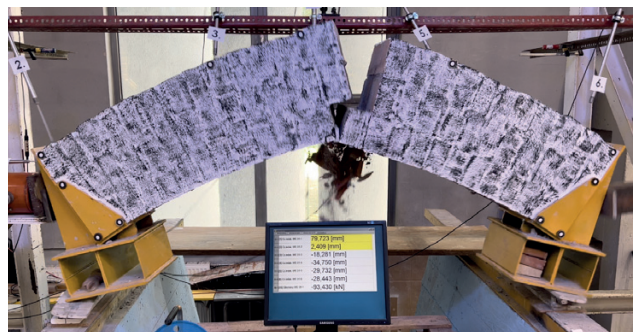
Obciążenie przykładało w sposób ciągły i równomierny.

Podczas testów prowadzono szczegółowy pomiar przemieszczeń w wybranych punktach modelu oraz rejestrowano wartość przyłożonej siły. Monitorowanie deformacji przeprowadzono przy użyciu czujników

przemieszczeń typu LVDT (Linear Variable Differential Transformer) oraz systemu cyfrowej korelacji obrazów (ARAMIS). Serię testową rozpoczęto od modeli odniesienia – łuków niewzmocnionych poddanych ścisaniu, oznaczonych jako LNS (Łuk Niewzmocniony Ścisany). Następnie przystąpiono do badań modeli łuków wzmocnionych. Serię tych badań nazwano odpowiednio LWS (Łuk Wzmocniony Ścisany).

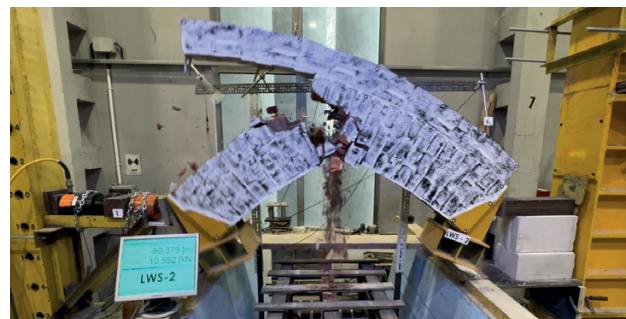
Na fotografiach 1÷3 pokazano zniszczenia zaobserwowane podczas badań laboratoryjnych. Fotografia 1 przedstawia zniszczenie jednego z modeli referencyjnych, polegające na przekroczeniu wytrzymałości elementu murowego na ścisanie w dolnej części przekroju, co doprowadziło do zniszczenia łuku. Na fotografii 2 pokazano zniszczenie łuku wzmocnionego dodatkowym żebrzem żelbetowym. Uszkodzenie rozpoczęło się od utraty przyczepności pomiędzy stalowym prętem zbrojeniowym a żywicą epoksydową, która była częścią systemu kotwiącego. W wyniku tego zjawiska nastąpiło gwałtowne zniszczenie cegły w strefie ściskanej. Analogiczny mechanizm zniszczenia zaobserwowano w modelu wzmocnionym przy użyciu technologii FRCM (fotografia 3). W tym przypadku siły rozciągające w górnej części przekroju zostały przejęte przez włókna kompozytowe PBO. Po przekroczeniu wytrzymałości i ich zerwaniu, doszło do zniszczenia materiału w strefie ściskanej.

We wszystkich badanych przypadkach zauważono wczesne pojawienie się spękań i rys. Obserwowano pęknięcia podłużne w dolnej części łuków oraz rysy poprzeczne w strefach roz-



**Photo 1. Collapse moment of the unreinforced compress arch (UCA)**

*Fot. 1. Zniszczenie łuku ściskanego bez wzmocnienia (LNS)*



**Photo 2. Collapse moment of the RC-rib-reinforced compress arch (RCA)**

*Fot. 2. Zniszczenie łuku ściskanego wzmocnianego żelbetowym żebrzem (LWS)*

In the second test series, the same reinforcement types as in the first series were analyzed, but under forces of opposite direction. In this variant, the models were subjected to tension. The measurements focused on identifying the failure mode of masonry rib segments and the behavior of reinforcing materials. Photo 4÷6 show the failure mechanisms of models subjected to tensile loading. In both series, results were compared to reference models to evaluate the effectiveness of reinforcement.

## Results of Experimental Investigations

Table 1 presents the results obtained in laboratory tests. It includes values of cracking forces corresponding to crack widths of at least 0.5 mm and ultimate failure forces. Average values of maximum failure loads were provided, together

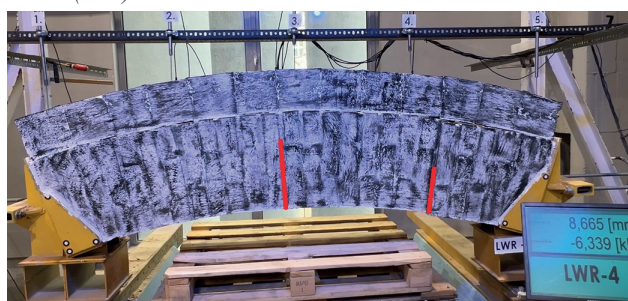
ciąganych. W modelach wzmocnionych żelbetowym żebrzem (LWS-1 i LWS-2), w związku ze zwiększeniem efektywnej wysokości przekroju poprzecznego i przesunięciem osi obojętnej, pęknięcia podłużne pojawiły się na większej wysokości niż w modelach referencyjnych oraz w modelach wzmocnionych systemem FRCM (LWS-3 i LWS-4).

W drugiej serii badań analizowano takie same typy wzmocnień jak w serii pierwszej, ale przy udziale siły o przeciwnym zwrocie. W tym wariacie modele były rozciągane. Wynikiem pomiarów było sprawdzenie sposobu zniszczenia murowanych fragmentów żeber oraz zachowania się materiałów wzmacniających. Na fotografiach 4÷6 pokazano sposób zniszczenia modeli na skutek działania siły rozciągającej. W obu seriach porównano otrzymane wyniki z modelami referencyjnymi i określono skuteczność analizowanych wzmocnień.



**Photo 3. Collapse moment of the FRCM-reinforced compress arch (RCA)**

*Fot. 3. Zniszczenie łuku ściskanego wzmocnianego w technologii FRCM (LWS)*



**Photo 5. Collapse moment of the RC-rib-reinforced tensioned arch (RTA)**

*Fot. 5. Zniszczenie łuku rozciąganego wzmocnianego żelbetowym żebrzem (LWR)*

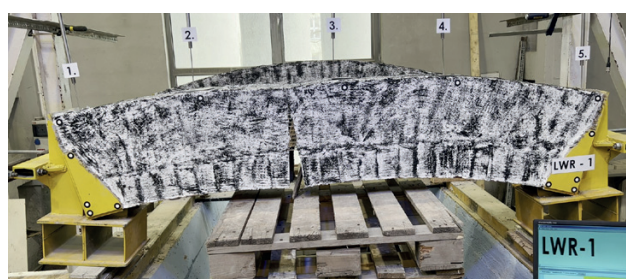
with standard deviation and coefficient of variation for each model. For most models, the initial crack of 0.5 mm width was recorded near the crown. Only in tensile tests was this rule not consistent. The tests were continued until the ultimate limit state (ULS) was reached. The failure criterion could, however, be considered fulfilled earlier at the serviceability limit state (SLS), due to excessive crack width and deflection. Issues concerning crack formation mechanisms and masonry repair methods are discussed in [3, 6, 13, 16].

All reinforcement techniques, both in Series 1 and Series 2, demonstrated increased load-bearing capacity of the masonry rib. The results also indicate that increasing the rib cross-section with an RC element provides more than a twofold improvement



**Photo 4. Collapse moment of the unreinforced tensioned arch (UTA)**

*Fot. 4. Zniszczenie łuku rozciąganego bez wzmocnienia (LNR)*



**Photo 6. Collapse moment of the FRCM-reinforced tensioned arch (RTA)**

*Fot. 6. Zniszczenie łuku rozciąganego wzmocnianego w technologii FRCM (LWR)*

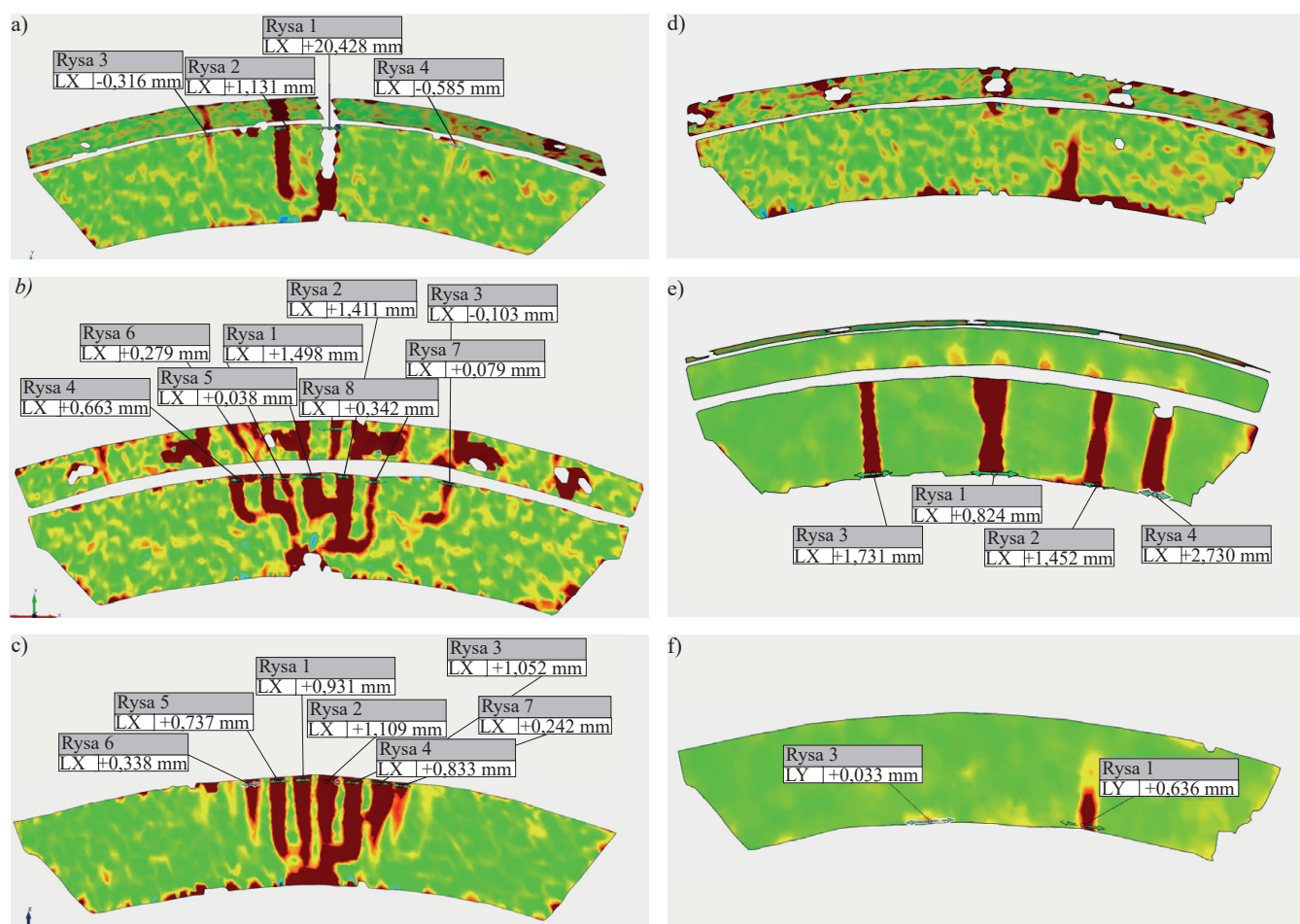
## Wyniki badań

W tabeli pokazano wyniki uzyskane w badaniach laboratoryjnych. Zamieszczono w niej wartości sił rysujących o rozwarości minimum 0,5 mm oraz sił niszczących. Podano też uśrednione wartości maksymalnych sił niszczących oraz obliczono odchylenie standardowe i współczynnik zmienności. W przypadku większości modeli początkową rysę o szerokości 0,5 mm odnotowano w rejonie zwornika. Jedynie w badaniach rozciągających reguła ta została zaburzona. Badania kontynuowano aż do osiągnięcia stanu granicznego nośności (SGN). Kryterium zniszczenia mogło zostać uznane za spełnione już przy przekroczeniu stanu granicznego użytkowości (SGU), ze względu na nadmierne rozwarcie rysy oraz ugięcie.

## Research results

Wyniki badań

| Series/<br>Seria | Test name/<br>Nazwa badania                                                            | Abbreviation/<br>Skrót | Cracking force/<br>Siła przy<br>zarysowaniu<br>[kN] | Failure force/<br>Siła przy zniszczeniu [kN] | Mean failure<br>force/<br>Średnia wartość<br>siły przy zniszczeniu [kN] | Standard deviation/<br>Odchylenie<br>standardowe<br>[kN] | Coefficient of<br>variation/<br>Współczynnik<br>zmienności [%] |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| SERIES 1/SERIA 1 | Unreinforced Compressed Arch/<br>Łuk Niewzmocniony Ściskany                            | UCA-1/LNS-1            | 45,7                                                | 98,1                                         | 106,3                                                                   | 8,2                                                      | 7,7                                                            |
|                  |                                                                                        | UCA-2/LNS-2            | 32,8                                                | 114,5                                        |                                                                         |                                                          |                                                                |
|                  | Rib Reinforced<br>Compressed Arch/<br>Łuk Wzmocniony Ściskany (żebro<br>żelbetowe)     | RCA-1/LWS-1            | 205,5                                               | 227,2                                        | 229,0                                                                   | 1,9                                                      | 0,8                                                            |
|                  |                                                                                        | RCA-2/LWS-2            | 199,7                                               | 230,9                                        |                                                                         |                                                          |                                                                |
|                  | FRCM Reinforced Compressed<br>Arch/<br>Łuk Wzmocniony Ściskany (FRCM)                  | RCA-3/LWS-3            | 115,0                                               | 140,4                                        | 134,4                                                                   | 6,0                                                      | 4,4                                                            |
|                  |                                                                                        | RCA-4/LWS-4            | 101,3                                               | 128,5                                        |                                                                         |                                                          |                                                                |
| SERIES 2/SERIA 2 | Unreinforced Tensioned Arch/<br>Łuk Niewzmocniony Rozciągany                           | UTA-1/LNR-1            | 1,2                                                 | 1,2                                          | 1,2                                                                     | 0,1                                                      | 6,3                                                            |
|                  |                                                                                        | UTA-2/LNR-2            | 1,1                                                 | 1,1                                          |                                                                         |                                                          |                                                                |
|                  | Rib Reinforcement<br>Tensioned Arch/<br>Łuk Wzmocniony Rozciągany<br>(żebro żelbetowe) | RTA-3/LWR-3            | 3,3                                                 | 7,3                                          | 7,7                                                                     | 0,3                                                      | 4,1                                                            |
|                  |                                                                                        | RTA-4/LWR-4            | 5,0                                                 | 8,0                                          |                                                                         |                                                          |                                                                |
|                  | FRCM Reinforced Tensioned Arch/<br>Łuk Wzmocniony Rozciągany<br>(FRCM)                 | RTA-1/LWR-1            | 2,1                                                 | 5,4                                          | 4,8                                                                     | 0,6                                                      | 11,5                                                           |
|                  |                                                                                        | RTA-2/LWR-2            | 1,5                                                 | 4,3                                          |                                                                         |                                                          |                                                                |



**Fig. 5. Graphical representation of the results obtained from the ARAMIS digital image correlation system: a) Unreinforced Compressed Arch; b) RC – rib Reinforced Compressed Arch; c) FRCM – Reinforced Compressed Arch; d) Unreinforced Tensioned Arch; e) RC – rib Reinforced Tensioned Arch; f) FRCM – Reinforced Tensioned Arch**

*Rys. 5. Graficzne przedstawienie wyników otrzymanych z systemu cyfrowej korelacji obrazu ARAMIS: a) Łuk Niewzmocniony – Ściskany (LNS); b) Łuk Wzmocniony Żelbetem – Ściskany (LWS); c) Łuk Wzmocniony FRCM – Ściskany (LWS); d) Łuk Niewzmocniony – Rozciągany (LNS); e) Łuk Wzmocniony Żelbetem – Rozciągany (LWR); f) Łuk Wzmocniony FRCM – Rozciągany (LWR)*

in strength and crack resistance. Composite reinforcement also proved effective, though not to the same extent as increasing the arch cross-section.

Figure 5 presents optical measurement results recorded just prior to specimen collapse. These schematic outputs from the ARAMIS digital image correlation system illustrate the distribution of cracks immediately before failure. Further analysis will refine these results by linking crack widths with specific load values.

## Conclusions

Strengthening masonry arch structures is a challenging task, particularly when they are subjected to instability of the support zones. The conducted experiments allowed for a comparison of the behavior of unreinforced and reinforced masonry arches under tensile and compressive forces. It was demonstrated that both the FRCM technology and partially prefabricated reinforced concrete ribs are effective methods of strengthening masonry rib segments.

The application of reinforced concrete allows for a greater increase in load-bearing capacity (115% under compression and 524% under tension), whereas FRCM technology, although producing a smaller increase (26% under compression and 300% under tension), offers greater flexibility and easier application.

*Figures and photos: authors*

*Acknowledgements. The authors wish to thank Visbud-Projekt Sp. z o.o. and Bolix for supplying materials for the experimental investigations.*

Received: 17.03.2025  
Revised: 05.05.2025  
Published: 21.08.2025

## Literature

- [1] Bednarz Ł. Praca statyczna zabytkowych, zakrzywionych konstrukcji ceglanych, poddanych zabiegom naprawy i wzmocnienia. Praca doktorska (2008). Politechnika Wrocławska
- [2] Bednarz Ł., Górski A., Jasieński J. & Rusiński E. Simulations and Analyses of Arched Brick Structures. Automation in Construction. 2011; 20 (7): 741–754.
- [3] Bednarz Ł. Metody wzmocnienia zabytkowych, zakrzywionych konstrukcji ceglanych. Wiadomości Konserwatorskie. 2003; 14: 34–42.
- [4] Grzesiak S., Schultz-Cornelius M., Pahn M. (2023). Experimental and analytical evaluation of externally bonded BFRP and CFRP strips on the load-bearing behaviour of reinforced concrete structures using distributed fibre optic sensing. Construction and Building Materials, Article 132452, 1–14.
- [5] Gołębiewski M. (2022). Badania eksperymentalne i analiza numeryczna sklepień ceglanych. Wzmocnienia sklepień z wykorzystaniem struktury ten-segrity. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 54–57
- [6] Nowak R., Orłowicz R., Bezałow W. Badanie ceglanych sklepień koszo-wych. Przegląd Budowlany 2019; 3: 19–21.

Mechanizmy powstawania rys oraz metody naprawy konstrukcji murowych zostały omówione w pracach [3, 10–13]. Wszystkie sposoby wzmocnienia, zarówno w serii 1, jak i serii 2, wykazały zwiększenie nośności murowanego żebra. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono również, że przy zwiększeniu przekroju żebra, przez dodanie elementu żelbetowego, następuje ponaddwukrotny wzrost nośności oraz ryso-odporności. Wzmocnienie kompozytowe również okazało się skutecznym sposobem wzmocnienia, ale nie w takim stopniu, jak zwiększenie przekroju łuku.

Na rysunku 5 pokazano wyniki pomiarów optycznych, tuż przed zniszczeniem modeli, wykonanych za pomocą cyfrowej korelacji obrazu ARAMIS. Są one na tym etapie schematyczne i ukazują jedynie charakter rozmieszczenia rys bezpośrednio przed zniszczeniem. W kolejnym etapie uzyskane wyniki zostaną uszczegółowione wraz z informacją na temat konkretnych wartości sił, występujących przy zadanej szerokości powstałych rys.

## Podsumowanie

Wzmocnianie murowanych konstrukcji łukowych jest zadaniem trudnym, szczególnie gdy poddawane są one wpływom związanym z niestabilnością stref podparcia. Przeprowadzone badania umożliwiły porównanie zachowania murowanych łuków niewzmocnionych i wzmocnionych poddanych siłom rozciągającym oraz ściskającym. Wykazano, że zarówno technologia FRCM, jak i częściowo prefabrykowane żebra żelbetowe są skutecznymi metodami wzmocniania murowanych fragmentów żebier. Zastosowanie żelbetu pozwala osiągnąć większy przyrost nośności (115% przy ściskaniu i 524% przy rozciąganiu), ale technologia FRCM przy mniejszym wzroście nośności (26% przy ściskaniu i 300% przy rozciąganiu) oferuje większą elastyczność i łatwość aplikacji.

*Rysunki i fotografie: autorzy*

*Autorzy dziękują firmie Visbud-Projekt Sp. z o.o. oraz firmie Bolix za przekazanie materiałów do badań.*

Artykuł wpłynął do redakcji: 17.03.2025 r.  
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 05.05.2025 r.  
Opublikowano: 21.08.2025 r.

- [7] Milani G. & Bucchini, A. Kinematic FE Homogenized Limit Analysis Model for Masonry Curved Structures Strengthened by near Surface Mounted FRP Bars. Composite Structures 2010; 93 (1): 239–258.
- [8] Drobiec Ł. Przyczyny awarii i katastrof obiektów zabytkowych. XXX Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane (2022), 33–52.
- [9] Cińcio A., Fedorowicz L., Fedorowicz J., Mrozek D. (2018). Zasady budowy modeli numerycznych w obliczeniach wpływu eksploatacji górniczej na budowlę. III Konferencja Obiekty Budowlane na Terenach Górniczych. 1–24.
- [10] Ciesielski R. O pomiarze, opisie i interpretacji rys w konstrukcjach murowych – wskazówki instrukcyjne. Przegląd Budowlany 1987; 11: 481–485.
- [11] Grzymalski F., Musiał M., Ombres L., Marcinczak D., Trapko T., Pazdan M. Potencjał wzmocnień kompozytowych PBO-FRCM w zabytkowych konstrukcjach z betonu, Wiadomości Konserwatorskie 2022; 71: 137–150.
- [12] Orłowicz R., Małyżko L. Wady i usterki ścian ceramicznych, Przegląd Budowlany 2002; 2: 30–33
- [13] Drobiec Ł. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji murowych. Izolacje 2025; 2: 68–73