

mgr inż. arch. Milena Wiercińska<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0003-3354-9780

mgr inż. Michał Dzun<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0003-2478-5538

# Architectural form and structural efficiency of arched glued-laminated timber structures

## *Forma architektoniczna a efektywność konstrukcji łukowych z drewna klejonego*

DOI: 10.15199/33.2025.05.07

**Abstract.** Contemporary architecture integrates traditional materials with modern technologies, and glued-laminated timber is playing an increasingly significant role in large-scale structures. This study compares the stress distribution in three arches of identical span, designed using two different methods. The first method involves determining the geometric axis of the arch through a graphical approach based on the force triangle. The second method assumes the arch axis as a circular segment. The results indicate that arches designed using the force triangle method exhibit a more uniform stress distribution. This finding highlights the potential of this method for further research on material optimization in relation to cross-sectional variability.

**Keywords:** glued-laminated timber; arches; shape optimization.

**Streszczenie.** Współczesna architektura łączy tradycyjne materiały z nowoczesnymi technologiami, a drewno klejone odgrywa coraz większą rolę w dużych konstrukcjach. W artykule porównano rozkład naprężeń w trzech łukach o tej samej rozpiętości, ukształtowanych wg dwóch metod projektowania. Pierwsza z nich to wykreślanie osi geometrycznej łuku z użyciem graficznej metody wykorzystującej trójkąt sił, natomiast druga polega na przyjęciu osi łuku jako wycinka okręgu. Wyniki wskazują, że łuki wykreślone metodą trójkąta sił mają bardziej równomierny rozkład naprężeń, co oznacza potencjał metody do dalszych badań nad optymalizacją materiałową w związku ze zmiennością przekrojów.

**Słowa kluczowe:** drewno klejone; łuki; optymalizacja formy.

In the 21st century, timber architecture has acquired an entirely new character thanks to technological advancements. Today, many Pritzker Prize laureates, such as Glenn Murcutt, Peter Zumthor, and Shigeru Ban, incorporate wood into their projects [1]. One of the most outstanding examples of the application of glued laminated timber (glulam) in architecture is the Winter Gardens in Sheffield – a covered gallery 75 meters long, built using a skeletal structure of wooden arches. Polish larch of GL28 grade was used for construction, which contributed to a 95% reduction in carbon footprint compared to alternative materials such as steel or concrete [2]. Winter Gardens functions as a public space, connecting various city districts and serving as an attractive location for visitors [3]. The Spanish Bodegas Protos winery in Peñafiel is another example of innovative architecture employing glulam. The structure consists of modular arches with an 18-meter span, spaced nine meters apart, and a roof of five connected parabolic vaults, imparting lightness and transparency to the form [4, 5]. Completed in 2008, the building was designed by Rogers Stirk Harbour + Partners [6]. Another example of wooden arch architecture is the Crystal Bridges Museum of American Art in Bentonville, opened in 2011 [7] – one of the most significant works using glulam. Designed by Moshe Safdie, the project emphasized the use of local materials and environmental protection. As part of the museum's expansion, the maximum number of existing trees were preserved, and timber from cleared trees was reused

W XXI wieku architektura drewniana, dzięki rozwojowi technologii, zyskała zupełnie nowe oblicze. Współcześnie wielu laureatów Nagrody Pritzke- ra, takich jak Glenn Murcutt, Peter Zumthor i Shigeru Ban, implementuje drewno w swoich projektach [1]. Jednym z wybitnych przykładów zastosowania drewna klejonego w architekturze jest Winter Gardens w Sheffield – kryta galeria o długości 75 m, zbudowana na bazie konstrukcji szkieletowej z drewnianych łuków. Do budowy użyto polskiego modrzewia klasy GL28, co przyczyniło się do redukcji śladu węglowego o 95% w porównaniu z alternatywnymi materiałami, takimi jak stal czy beton [2]. Winter Gardens funkcjonuje jako przestrzeń publiczna, łącząc różne dzielnice miasta i stanowiąc atrakcyjne miejsce dla odwiedzających [3]. Hiszpański budynek winiarni Bodegas Protos w Peñafiel to kolejny przykład innowacyjnej architektury wykorzystującej drewno klejone warstwowo (Glulam). Konstrukcja składa się z modułowych łuków o rozpiętości 18 m, rozmieszczonych w dziewięciometrowych odstępach, a dach z pięciu połączonych sklepień parabolicznych, co nadaje formie lekkość i transparentność [4, 5]. Budynek, ukończony w 2008 r., został zaprojektowany przez Rogers Stirk Harbour + Partners [6]. Inny przykład architektury drewnianych łuków to Crystal Bridges Museum of American Art w Bentonville otwarte w 2011 r. [7] – jedno z najważniejszych dzieł wykorzystujących drewno klejone warstwowo (Glulam). Projekt autorstwa Moshe Safdiego uwzględnia wykorzystanie lokalnych materiałów, a także dbałość o ochronę środowiska. W ramach rozbudowy muzeum zachowano jak najwięcej istniejących drzew, a drewno z wycinki zostało ponownie wykorzystane do budowy ławek galerii, ram do obrazów oraz

<sup>1)</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Architektury

<sup>2)</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

<sup>\*</sup>) Correspondence address: m.wiercinska@pb.edu.pl

to build gallery benches, picture frames, and provided to local artists [8]. The building is characterized by its distinctive hanging roofs reminiscent of armadillos (“armadillo roofs”) [9] and a bridge-like structure referencing the museum's name [10].

Glulam is a key component of modern architecture, combining ecological, economic, and aesthetic aspects. Its growing popularity stems from both innovative construction methods and the need for sustainable development in the 21st-century construction sector. Modern technologies enable the optimization of wood strength through precise fiber orientation [11]. The production of flat panels is highly efficient, whereas curved elements are associated with significantly higher costs [11]. Therefore, it is worthwhile to further investigate the potential for material savings in arch forms.

### Glued Laminated Timber

Glued laminated timber plays a significant role in the context of sustainable construction due to increasing ecological awareness [11]. It serves as a natural carbon dioxide reservoir – 1 cubic meter of this material can store 1 to 1.5 tons of CO<sub>2</sub>. Moreover, it is biodegradable, energy-efficient, and recyclable [12]. The technology of glued laminated timber was introduced in Europe at the end of the 19th century [13] and has since been used in the construction of beams, girders, trusses, and bridges [13]. A significant milestone in its development occurred in Switzerland in 1908 as a method to modernize traditional wooden construction techniques [14]. In the 1990s, the production of large-scale wooden prefabricates began, contributing to sectoral growth [1]. Glulam prefabricates allow for twice as fast construction assembly compared to their steel counterparts [15]. Glulam has many advantages over sawn timber and other structural materials, enabling the creation of structural elements significantly larger than the trees from which they originate [16]. It is possible to produce elements spanning over 91 meters [13].

Glulam comes in two variants: homogeneous (marked „h”) and combined (marked „c”) [17]. Its application allows for the reduction of defects in solid wood [17] and enables efficient and economical construction processes [17]. Contrary to common opinion, unprotected glulam elements meet R30 fire resistance standards, and with appropriate dimensions, they can achieve fire resistance of over 60 minutes [18]. Technological advances have allowed the elimination of many wood defects, contributing to its widespread use in construction [1]. Current challenges include the search for natural glue components, the use of alternative wood species such as beech, and the development of composite cross-sections combining wood with steel or concrete [14]. Another important topic for study is the shaping of forms with variable cross-sections, which depend on the stress distribution in structures and are the subject of this article.

Research on glulam indicates its suitability for forming curved shapes, offering an alternative to steel and reinforced concrete, including in arch forms [19], thus broadening architectural design possibilities. Digitization compels

przekazane lokalnym artystom [8]. Budynek cechuje się charakterystycznymi wiszącymi dachami przypominającymi pan-cerniki („armadillo roofs”) [9] oraz konstrukcją mostową, nawiązującą do nazwy muzeum [10].

Drewno klejone stanowi kluczowy element nowoczesnej architektury, łącząc aspekty ekologiczne, ekonomiczne i estetyczne. Jego zwiększająca się popularność wynika zarówno z innowacyjnych metod konstrukcyjnych, jak i potrzeby zrównoważonego rozwoju w sektorze budowlanym XXI wieku. Nowoczesne technologie umożliwiają optymalizację wytrzymałości drewna przez precyzyjne ukierunkowanie włókien [11]. Produkcja płaskich paneli jest bardzo efektywna, natomiast elementy zakrzywione wiążą się ze znacznie wyższymi kosztami [11]. Z tego względu, warto rozwijać badania nad potencjałem oszczędności materiału w formach łukowych.

### Charakterystyka drewna klejonego

Drewno klejone odgrywa istotną rolę w kontekście zrównoważonego budownictwa ze względu na coraz większą świadomość ekologiczną [11]. Pełni funkcję naturalnego magazynu dwutlenku węgla – 1 m<sup>3</sup> tego materiału jest w stanie zmagazynować 1 – 1,5 tony CO<sub>2</sub>. Ponadto jest biodegradowalne, energooszczędne i nadające się do recyklingu [12]. Technologia drewna klejonego została wprowadzona w Europie pod koniec XIX wieku [13] i od tego czasu znajduje zastosowanie w budowie belek, dźwigarów, elementów kratownicowych oraz mostów [13]. Szczególny punkt w rozwoju technologii miał miejsce w Szwajcarii od 1908 r. jako sposób na modernizację tradycyjnych metod budowy konstrukcji drewnianych [14]. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku rozpoczęto produkcję wielkogabarytowych prefabrykatów drewnianych, co wpłynęło na rozwój sektora [1]. Prefabrykaty z drewna klejonego umożliwiają montaż konstrukcji dwukrotnie szybciej niż ich stalowe odpowiedniki [15]. Drewno klejone ma wiele zalet w porównaniu z tarcicą i innymi materiałami konstrukcyjnymi, pozwalając na tworzenie elementów konstrukcyjnych, które są znacznie większe niż drzewa, z których pochodzą [16]. Możliwe jest wytwarzanie elementów o rozpiętości przekraczającej 91 m [13].

Drewno klejone występuje w dwóch wariantach: jednorodnym (oznaczonym jako „h”) oraz kombinowanym (oznaczonym jako „c”) [17]. Jego zastosowanie pozwala na redukcję wad drewna litego [17] i umożliwia efektywne oraz ekonomiczne procesy budowlane [17]. Wbrew powszechnym opiniom, niezabezpieczone elementy z drewna klejonego warstwowo spełniają normy przeciwpożarowe R30, a przy odpowiednich wymiarach mogą osiągać odporność ogniową powyżej 60 min [18]. Rozwój technologii umożliwił eliminację wielu wad drewna, przyczyniając się do jego powszechnego wykorzystania w budownictwie [1]. Współczesne wyzwania obejmują poszukiwanie naturalnych składników klejów, wykorzystanie alternatywnych gatunków drewna, takich jak buk, oraz rozwój przekrojów kompozytowych łączących drewno ze stalą lub betonem [14]. Innym zagadnieniem, które należy zbadać, jest kształtowanie form o zmiennym przekroju poprzecznym, co uzależnione jest od rozkładu naprężeń w konstrukcjach i stanowi temat badań artykułu.

architects and engineers to modify optimization methods and adapt new technologies that support the development of wood-based materials and the enhancement of production processes [20]. The development of the modern world not only provides architects with new sources of creative inspiration but also equips structural engineers with increasingly advanced tools for structural analysis. Therefore, it is crucial to develop architectural awareness in design. One of the key steps toward this goal is the systematization of knowledge linking fundamental graphic form-generation methods by architects with advanced computational structural analyses.

This study aims to explore the most efficient arch axis shape, depending on its rise, in a manner that facilitates preliminary form selection by architects. For this purpose, simplified boundary conditions were applied to the preliminary analysis of the designed structure's form, in the form of uniformly distributed loads and pinned arch supports. This approach addresses the need to study the influence of architectural form on structural performance during the conceptual design phase. The goal is to identify a structural axis shape during preliminary design that enables the adoption of a more efficient structural form.

Timber holds great potential for research into variable cross-sectional forms, allowing for the creation of efficient structures with minimized cross-sections where structural demands are lowest. The author's previous studies on variable cross-section forms have shown that only elevated arches allow for clearly discernible cross-sectional diversity from an architectural perception perspective [21]. In the case of shallow arches, these differences may be imperceptible to the naked eye. Nonetheless, even minimal material savings are significant in the context of reducing carbon footprint. In the spirit of sustainable development, material efficiency should be pursued even in the most efficient structural forms. Therefore, this paper presents interdisciplinary research on arch structures using the Finite Element Method (FEM). This method allows for precise stress distribution analysis in pre-developed geometric models and comparison of arch behavior in two cases: structures with identical spans and rises, shaped either according to a force triangle (resembling a catenary curve) or designed as segments of a circle. An additional innovative aspect and extension of the author's previous research is the inclusion of not only geometric parameters but also real material properties. The selection of glulam as the structural material was motivated by its favorable mechanical properties, ecological potential, and renewable nature. The analyzed elements were assigned specific dimensions, enabling a comprehensive assessment of their properties and structural behavior.

## Research Methodology

The case study adopted arches with spans of 10, 20, and 30 meters, serving as the main roof structure. Each was considered in six geometric variants. The first three variants (P1, P2, P3) were developed using the graphic method of arch axis construction under uniform load, commonly used by architects in early-stage design. This method was applied to symmetrical arches with support inclinations of 30°, 45°, and

Wyniki badań nad drewnem klejonym warstwowo wskazują na jego cechy sprzyjające tworzeniu form zakrzywionych, które stają się alternatywą stali i żelbetu, również w przypadku form łukowych [19], co rozszerza wachlarz możliwości w projektowaniu architektonicznym. Cyfryzacja zmusza architektów i inżynierów do modyfikacji metod optymalizacji projektowania oraz adaptacji nowych technologii, które wspierają rozwój materiałów drewnopochodnych i ulepszanie procesów ich wytwarzania [20]. Rozwój współczesnego świata nie tylko zapewnia architektom nowe źródła inspiracji w pracy twórczej, ale też sprawia, że konstruktorzy mają coraz bardziej zaawansowane narzędzia do analizy konstrukcji. Z tego względu niezwykle ważne jest rozwijanie przez twórców architektonicznej świadomości w projektowaniu. Jednym z podstawowych kroków ku temu jest usystematyzowanie wiedzy łączącej wpływ podstawowych metod graficznego wykreślenia form przez architektów oraz zaawansowanych komputerowych analiz konstrukcji.

Badanie ma charakter poszukiwania przebiegu najbardziej efektywnej osi łuku, w zależności od jego wyniosłości, w sposób ułatwiający architektowi wybór formy na etapie projektowania wstępnego. W wyniku tego, do analizy wstępnej formy projektowanej konstrukcji zastosowano pewne uproszczenia warunków brzegowych w postaci obciążenia równomiernie rozłożonego czy przegubowego podparcia łuku. Wynika to z potrzeby zbadania wpływu formy architektonicznej na pracę konstrukcji na etapie początkowej koncepcji tworzonej przez architekta. Celem jest poszukiwanie geometrycznego kształtu osi konstrukcyjnej podczas projektowania wstępnego, która pozwala przyjąć bardziej efektywną formę konstrukcji.

Drewno ma ogromny potencjał do badań nad kształtowaniem form o zmiennym przekroju poprzecznym, który pozwala na kształtowanie konstrukcji efektywnych o minimalnych przekrojach w miejscach najmniejszej pracy konstrukcji. Dotychczasowe badania autorki podczas analizy form o zmiennym przekroju poprzecznym dowiodły, że jedynie łuk wyniosły pozwala na uzyskanie wyraźnej różnorodności przekrojów z perspektywy postrzegania formy architektonicznej [21]. W przypadku łuków o małej wyniosłości, różnice mogą pozostawać niezauważalne gołym okiem. Mimo tego, nawet minimalne oszczędności materiałowe są istotne w kontekście redukcji śladu węglowego. W duchu realizacji założeń zasad zrównoważonego rozwoju warto więc szukać oszczędności materiałowej w nawet najbardziej efektywnych konstrukcjach. W związku z tym, w prezentowanej w artykule pracy podjęto interdyscyplinarne badania nad konstrukcjami łukowymi z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych. Metoda ta umożliwia precyzyjną analizę rozkładu naprężeń w uprzednio opracowanych modelach geometrycznych oraz porównanie zachowania łuków w dwóch przypadkach: konstrukcji o identycznej rozpiętości i wyniosłości, wyznaczonych zarówno na podstawie trójkąta sił (kształt zbliżony do krzywej łańcuchowej), jak i zaprojektowanych jako fragmenty okręgu. Dodatkowym aspektem innowacyjnym i rozszerzeniem wcześniejszych badań autorki, jest uwzględnienie nie tylko parametrów geometrycznych, lecz także rzeczywistych właściwości materiałowych. Wybór

60°, resulting in flat, intermediate, and elevated arch axis shapes, respectively. In the second stage, the obtained heights were used to generate arches designed without the graphic design method, using circular segments (K1, K2, K3). The axis geometry of the six analyzed arches is presented in Figure 1.

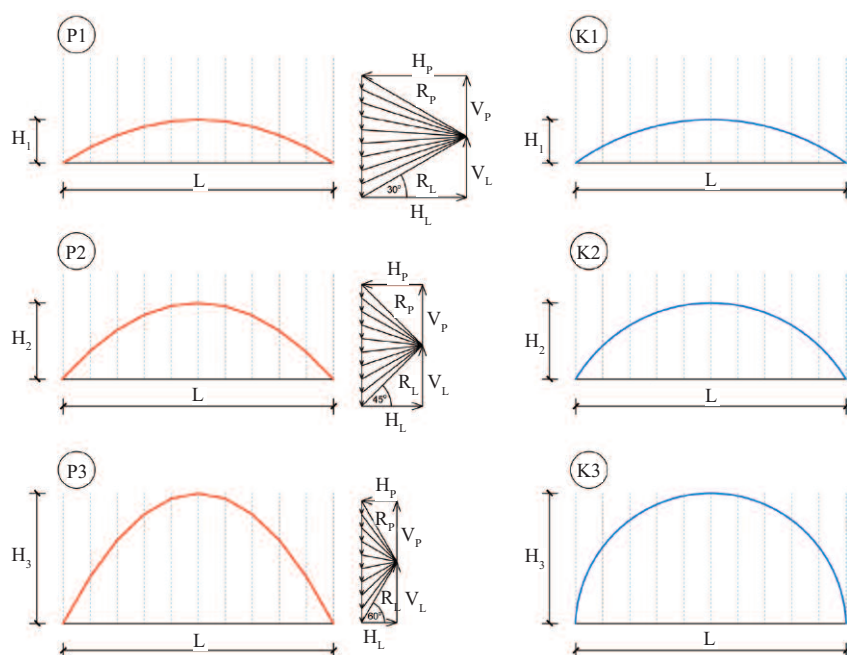
The arches underwent experimental analysis using computer simulations. A linear static FEM analysis performed in Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2025 produced simplified reduced stress maps for each analyzed structure. This approach allows for visualization of stress distribution and identification of characteristic structural behavior. The arches were modeled as supported on two non-displaceable hinged supports. For comparative analysis, the base version of a 20-meter span arch was assumed to have a 160 × 400 mm cross-section for all variants, in line with recommendations [22]. Arches with 10-meter spans were assigned a 120 × 200 mm section, while those with 30-meter spans had a 200 × 600 mm section and were subjected to uniformly distributed loads corresponding to lightweight roofing with thermal insulation and snow load. A 6-meter arch spacing was assumed, which is typical. Models P1 to P3 have geometries close to a catenary curve, while K1 to K3 follow a circular arc. Rise values for respective arches are consistent across trials labeled 1 to 3.

drewna klejonego jako materiału konstrukcyjnego został poddyktowany jego korzystnymi właściwościami mechanicznymi, potencjałem ekologicznym oraz odnawialnym charakterem. Analizowanym elementom nadano konkretne wymiary, co pozwoliło na kompleksową ocenę ich właściwości i zachowania konstrukcyjnego.

## Metoda badań

Jako studium przypadku przyjęto łuki o rozpiętości 10, 20 i 30 m, stanowiące główny element konstrukcyjny dachu. Każdy z nich został rozważony w sześciu wersjach geometrii. Pierwsze trzy wersje (P1, P2, P3) powstały z użyciem graficznej metody wykreślenia geometrii osi łuku, obciążonego ciężarem ciągłym, stosowanej w projektowaniu wstępnym przez architektów. Metoda ta została zastosowana w przypadku łuków symetrycznych o kątach nachylenia przy podporach 30, 45 oraz 60°. Otrzymano w ten sposób odpowiednio kształt osi łuku połego, pośredniego i wyniosłego, których wysokość wynika z zastosowanej metody wykreślenia geometrii.

W drugim etapie otrzymaną wysokość przyjęto w celu wykreślenia łuków zaprojektowanych bez użycia metody graficznego projektowania wstępnego, stosując wycinek okręgu (K1, K2, K3). Geometrię przebiegu osi sześciu badanych łuków prezentuje rysunek 1.



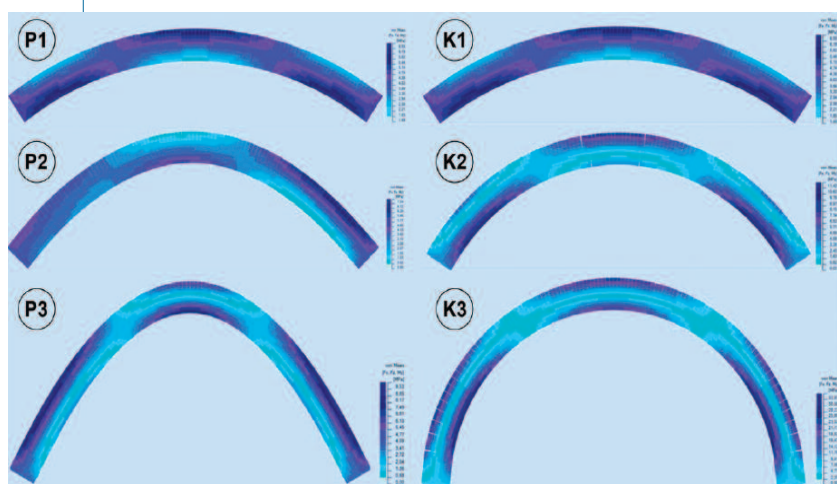
**Fig. 1. Investigated arches:** P – graphically constructed using a force triangle; K – designed based on a circular segment; 1 – shallow versions; 2 – intermediate versions; 3 – elevated versions, where:  $R_L$  – left reaction;  $H_L$  – horizontal component of the left reaction;  $V_L$  – vertical component of the left reaction;  $R_P$  – right reaction;  $H_P$  – horizontal component of the right reaction;  $V_P$  – vertical component of the right reaction;  $L$  – span of the arch;  $H_1$  – height of the shallowest arch;  $H_2$  – height of the intermediate arch;  $H_3$  – height of the tallest arch

Rys. 1. Badane łuki: P – wykreślone graficznie z użyciem trójkąta sił; K – zaprojektowane na wycinku okręgu; 1 – wersje płogie; 2 – wersje pośrednie; 3 – wersje wyniosłe, gdzie:  $R_L$  – reakcja lewa;  $H_L$  – składowa pozioma reakcji lewej;  $V_L$  – składowa pionowa reakcji lewej;  $R_P$  – reakcja prawa;  $H_P$  – składowa pozioma reakcji prawej;  $V_P$  – składowa pionowa reakcji prawej;  $L$  – rozpiętość łuku;  $H_1$  – wysokość najniższego łuku;  $H_2$  – wysokość średniego łuku;  $H_3$  – wysokość najwyższego łuku

Łuki poddano analizom eksperymentalnym przy użyciu symulacji komputerowej. Wskutek przeprowadzonej statycznej analizy liniowej MES wykonanej w programie Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2025 otrzymano uproszczoną mapę naprężeń zredukowanych w przypadku każdej badanej konstrukcji. Takie rozwiązanie pozwala na zobrazowanie rozkładu naprężeń i określenie charakterystycznych cech pracy konstrukcji. Łuki zaprojektowano jako wsparte na dwóch nieprzesuwnych podporach przegubowych. Na potrzeby analizy porównawczej bazowej wersji łuku o rozpiętości 20 m, założono przekrój poprzeczny wszystkich badanych przekrojów o wymiarach 160 × 400 mm, co jest zgodne z zaleceniami [22]. Zgodnie z tymi zaleceniami założono łuki o rozpiętości 10 m z przekroju 120 × 200 mm, a łuki o rozpiętości 30 m jako wykonane z przekroju 200 × 600 mm i poddano je obciążeniu równomiernie rozłożonemu o wartościach odpowiadających obciążeniom pochodzącym od pokrycia lekkiego wraz z izolacją termiczną oraz śniegu. Założono rozstaw łuków 6 m, co jest rozwiązaniem typowym. Modele P1 ÷ P3 cechują się geometrią zbliżoną do krzywej łańcuchowej, a modele K1 ÷ K3 są łukami zakreślonymi na planie okręgu. Wyniosłości poszczególnych łuków odpowiadają sobie dla poszczególnych prób oznaczonych cyframi 1 – 3.

## Results Discussion

Due to the volume of detailed results for each model (six geometry options per 10, 20, and 30 m spans) and the consistency of obtained data, the analysis focuses on a representative intermediate option: a 20 m span arch. From the color maps of the base 20 m arch (Figure 2), it is evident that geometry significantly impacts the magnitude and type of internal forces in the structure. For clarity, the diagram scales were enlarged. In trials with flat arches (P1 and K1), the maximum stress zones and their distribution are very similar due to minor geometric differences. A pronounced difference appears in the comparison of intermediate and elevated arches (P2 vs. K2 and P3 vs. K3).



**Fig. 2. Graphs of reduced stresses in the analyzed arches with a span of 20 m**  
Rys. 2. Wykresy naprężeń zredukowanych w analizowanych łukach o rozpiętości 20 m

As arch rise increases, more distinct zones of maximum stress appear, with less uniform distribution compared to shallow arches. For the base 20 m arch, arches drawn using the force triangle method (P1 to P3) demonstrate more efficient performance. This is evident in stress maps, especially trial P3, which shows a more uniform stress distribution than K3, the equivalent circular-segment arch. Maximum stress values were 9.53 MPa and 32.93 MPa, nearly a threefold difference in favor of P3. Similar trends were observed for 10 m and 30 m spans.

Arches primarily work in compression; bending forces increase the risk of buckling. Thus, it's important to discuss bending-related performance. Structural behavior was assessed using reduced stress maps resulting from axial forces, masses, and bending moments. Shallow arches have more uniform axial force distributions and much lower bending moments than elevated counterparts. The shape of the arch also plays a vital role. Arches constructed with the graphic method (P1 to P3) exhibit more uniform internal force distributions – compression, shear, and bending – than those designed as circular arcs (K1 to K3). Stress magnitudes and paths directly influence the stress maps.

In elevated arches, stress due to bending occurs closer to outer edges of the section. Upon deeper analysis, using

## Omówienie wyników

Ze względu na obszerność szczegółowych rezultatów każdego wykonanego modelu (po 6 opcji geometrii łuku przy rozpiętości 10, 20 i 30 m) oraz dobrą zbieżność otrzymanych wyników, zdecydowano się na przedstawienie analiz reprezentacyjnej opcji pośredniej łuku o rozpiętości 20 m. Z mapy kolorów bazowego łuku o rozpiętości 20 m (rysunek 2) wynika, że geometria kształtowanego łuku ma ogromny wpływ na wartości oraz rodzaje sił występujących w konstrukcji. Na potrzeby czytelności wykresów, powiększono skalę prezentowanych elementów. W przypadku próby przeprowadzonej na połączonych łukach (P1 i K1), maksymalne strefy naprężeń oraz ich rozkład są bardzo do siebie zbliżone. Wynika to z niewielkich różnic w geometrii. Zdecydowaną różnicę można zauważyć w przypadku porównania dwóch kolejnych modeli. Są to próby łuków pośrednich P2 i K2 oraz P3 i K3 w przypadku łuków wyniosłych. Wraz ze wzrostem wyniosłości łuku na mapach naprężeń występują wyraźniejsze strefy maksymalnych wartości. Rozkład naprężeń jest również rozłożony w mniej równomierny sposób, niż miało to miejsce w łukach połączonych.

Analizując pracę bazowego modelu łuku o rozpiętości 20 m, stwierdzono, że łuki wykreślone metodą graficzną na etapie projektowania wstępnego przez architektów, z użyciem trójkąta sił (P1 ÷ P3), pracują w bardziej efektywny sposób. Za dobry przykład mogą posłużyć mapy naprężeń próby P3, w której naprężenia w łuku mają bardziej równomierny rozkład niż w przypadku próby K3, czyli łuku o geometrii na planie wycinka okręgu. Maksymalne wartości naprężeń wynoszą odpowiednio 9,53 MPa i aż 32,93 MPa, co świadczy o niemal trzykrotnej przewadze łuku wykreślonego z użyciem trójkąta sił (P3). Analogiczne rezultaty i zależności osiągnięto również w analizach rozpiętości łuków 10 i 30 m.

Łuki z założenia pracują głównie na ściskanie, a pojawianie się sił zginających zwiększa ryzyko wyboczenia konstrukcji. Z tego względu warto jest również wspomnieć o aspektach związanych ze zginaniem konstrukcji. Charakterystyka pracy konstrukcji opisana została na podstawie zredukowanych map naprężeń, które są skutkiem oddziaływań sił osiowych, tnących, czy momentów zginających. Łuki połogie charakteryzują się o wiele bardziej równomiernymi rozkładami sił osiowych oraz znacznie mniejszymi wartościami momentów zginających niż ich wyniosłe odpowiedniki. Kształt projektowanego łuku odgrywa również bardzo dużą rolę. Łuki wykreślone metodą graficzną (P1 ÷ P3) mają bardziej równomierny rozkład sił wewnętrznych będących skutkiem ściskania, ścinania czy zginania, niż ma to miejsce w łuku na planie wycinka okręgu (K1 ÷ K3). Zależność wartości oraz przebieg tych sił mają bezpośredni wpływ na prezentowane mapy naprężeń.

W przypadku łuków wyniosłych naprężenia wynikające przede wszystkim ze zginania są ułożone bliżej zewnętrznych krawędzi przekrojów. Po przeprowadzeniu głębszych analiz, trafnym zarówno ekonomicznie, jak i konstrukcyjnie rozwiązaniem może być zastosowanie drewna niejednorodnego. W takim przypadku drewno klejone jest złożone na wysokości z lameli o zróżnicowanej wytrzymałości. Elementy bardziej wytrzymałe są usytuowane bliżej krawędzi zewnętrznych przekrojów, a lamelle mniej zaangażowane w pracę przy zginaniu, czyli znajdujące się bliżej osi obojętnej przekroju, są wykonane z tańszych

heterogeneous timber is a sound solution both economically and structurally. In this case, glulam consists of layers of varying strength. Stronger laminations are placed near outer edges, while weaker ones are near the neutral axis. This configuration, known as „c” (combined, e.g., GL28c), offers good strength properties at a lower cost and better availability than homogeneous variants marked „h” (e.g., GL28h).

Designing with innovative structural forms requires close collaboration between architect and structural engineer. The structure must be treated holistically to ensure both architectural consistency and structural coherence. The stress analyses presented here are valuable tools in the search and comparison of supporting form types. However, design and optimization cannot rely solely on stress value comparisons. Ultimately, proposed solutions must be validated through full load-bearing calculations, adhering to applicable standards and engineering principles. It's also crucial to account for the interrelationship of structural components. For instance, designing low-rise arches can lead to excessive thrust forces, necessitating massive abutments. While steel tie rods can reduce this, they pose challenges for functional layout and long-term maintenance. Given a fixed rise, group P arches tend to show lower stress values than group K, suggesting further study into cross-section minimization and material efficiency.

## Conclusions

This article focused on the topic of early-stage architectural design, deliberately excluding detailed structural calculations beyond the article's scope. Based on the analyses, it can be confidently stated that the simplified graphic method (P1 to P3) is an effective approach to approximating the structural form of an arch. It allows for the identification of favorable internal force layouts and efficient use of the designed structure's strength characteristics. The stress analysis enables preliminary validation of proposed solutions and provides guidance for further research on form modifications and optimization pathways.

Practical design recommendations from this study of glulam arches include:

- **awareness of structural efficiency when selecting arch geometry:** angles of 30°, 45°, and 60° significantly affect stress distribution. The larger the angle, the more pronounced the efficiency difference, especially for group P forms. Architects should consider forms based on the force triangle for higher arch rises.
- **shaping the arch form:** the visual difference between groups P and K increases with support angle. Group P forms should be favored, especially for steep arches. As both form and efficiency improve with rise, group K arches – if used – require compensation strategies for lower efficiency.
- **architect-engineer collaboration:** structural and aesthetic needs must be integrated from the early design phase. Close cooperation supports form optimization, structural performance, and visual appeal. Strengthening early-stage

lameli o mniejszej wytrzymałości. Drewno takie opisane jest symbolem „c” (c-combined, np. GL28c) i charakteryzuje się dobrymi parametrami wytrzymałościowymi oraz lepszą ceną i dostępnością niż drewno belki jednorodnej oznaczonych symbolem „h” (h-homogenous, np. GL28h).

Podczas poszukiwania i wyboru ciekawych form konstrukcyjnych, niezwykle istotna jest współpraca pomiędzy projektantem a konstruktorem. Projektowany obiekt warto traktować dwutorowo. Konstruując poszczególne elementy, należy odpowiednio zadbać, aby można było połączyć je w dobrze dobraną całość. Dotyczy to zarówno spójności architektonicznej, jak i podejścia konstrukcyjnego. Prezentowane analizy naprężeń w analizowanych łukach są dobrym rozwiązaniem w przypadku poszukiwania oraz porównywania form elementów nośnych obiektów. Projektowanie oraz optymalizacja konstrukcji nie może jednak przebiegać wyłącznie na podstawie porównania wartości naprężeń z wartościami granicznymi. Prawdliwość ostatecznie przyjętych rozwiązań musi być potwierdzona wykonaniem pełnych obliczeń nośności, zgodnych z obowiązującymi normami i zasadami wiedzy technicznej. Należy również zwrócić uwagę na wzajemne powiązanie pomiędzy poszczególnymi elementami konstrukcyjnymi obiektu. Przykładem może być projektowanie konstrukcji łukowych o zbyt małej wyniosłości, przyczyniającej się do powstania bardzo dużych wartości sił rozporu. Przekłada się to na konieczność wykonania bardzo masywnych konstrukcji wsporczych łuku. W celu redukcji rozporu możliwe jest zastosowanie ściąągów stalowych, ale rozwiązanie to może być problematyczne zarówno ze względu na układ funkcjonalny obiektu, jak i odpowiednią konserwację i utrzymanie siły naprężenia ściąągu. Przy określonej z góry wyniosłości łuków, warto jednak wziąć pod uwagę fakt, że łuki z grupy P cechują się mniejszymi naprężeniami w przekroju w porównaniu z łukami z grupy K, a więc mają potencjał do dalszych badań nad zmniejszeniem przekroju poprzecznego oraz analizą oszczędności materiału.

## Wnioski

W artykule skoncentrowano się na zagadnieniach projektowania wstępnego przez architektów, celowo pomijając szczegółowe obliczenia konstrukcyjne, które wykraczają poza zakres omawianej problematyki. W rezultacie przeprowadzonych analiz można z całą pewnością stwierdzić, że uproszczona metoda graficzna (P1 ÷ P3) jest dobrym rozwiązaniem pod względem wyznaczania przybliżonej formy konstrukcyjnej łuku. Pozwala ona na narysowanie układu cechującego się dobrym rozkładem sił wewnętrznych w konstrukcji oraz idącym w ślad za nim wykorzystaniem cech wytrzymałościowych projektowanego obiektu. Wykonana analiza naprężeń w konstrukcji pozwala na wstępne oszacowanie trafności proponowanych rozwiązań i wskazuje drogę do dalszych analiz dotyczących zarówno modyfikacji kształtu całej konstrukcji, jak i możliwe kierunki jej optymalizacji.

Praktyczne wskazówki projektowe wynikające z analizy naprężeń w konstrukcjach łukowych z drewna klejonego są następujące:

- **świadomość efektywności konstrukcji przy wyborze geometrii łuku przez architekta** – wykazano, że kąty 30°, 45° i 60° mają różny wpływ na rozkład naprężeń, a im więk-

design knowledge among architects helps avoid conflicts between visual intentions and structural feasibility.

The adopted assumptions enabled a detailed comparison of selected structural variants, although they limit the possibility of directly transferring the results to a broader engineering and architectural context. In further research, the authors plan to include a wider range of parameters, such as different span-to-rise ratios, alternative loading schemes (e.g., asymmetric, dynamic), varied cross-sections of elements, or the influence of design constraints (e.g., assembly requirements, prefabrication). This will allow for better representation of actual structural behavior and the formulation of more universal design guidelines.

In recent decades, there has been a dynamic development of timber structures, yet the scientific literature on wooden structural systems remains limited [23]. Timber demonstrates high efficiency in multi-storey construction, although in the case of tall buildings it often requires additional reinforcement [23]. Contemporary research emphasizes the need to define the allowable bending strength for commercial applications [13]. This may provide the basis for further research, both in the context of optimizing the form of glulam beams subjected to bending, and in the design of tall buildings.

Glued laminated timber, as a construction material, has the ability to sequester carbon dioxide, thereby contributing to the reduction of greenhouse gases in the atmosphere [24]. Additionally, it offers further opportunities for sustainable design. One potential direction for further research could be the analysis of the impact of stresses on shaping variable cross-sectional forms. Currently, studies are being conducted on glulam forms with variable cross-sections, e.g., concerning the optimization of shapes of glulam (GLT) beams and experimental research [25]. To date, studies have focused on reducing cross-sectional areas in glulam arches through reinforcement, substitution with materials of higher strength and modulus of elasticity, and prestressing [26]. A new research direction may involve the development of forms with variable cross-sections along the entire arch axis. Previous work by the co-author on the graphic search for arch forms by architects demonstrates that shaping a variable cross-sectional height, while maintaining proportions derived from the force triangle, allows for preliminary material savings of 7.76%, 15.57%, and 23.68% for angles of 30°, 45°, and 60°, respectively, compared to arches designed as forms with constant cross-sections. The authors' further research plan includes an investigation of arches with variable cross-sectional forms, with material savings in mind. The search for forms that enable lower raw material consumption or more precise utilization is related to the principles of sustainable development, such as efficient resource management, waste minimization, and CO<sub>2</sub> emission reduction. The aims of this research are the optimization of material use in construction and the increase of structural durability while simultaneously reducing environmental impact. The research aligns with EU directives on sustainable construction (e.g., the Circular

sky kąt, tym większa różnica w efektywności, w przypadku wyboru grupy P. W praktyce zaleca się, aby architekci na etapie projektowania wstępnego brali pod uwagę kształt łuku wynikający z trójkąta sił, im większa jest wyniosłość łuku;

• **kształtowanie formy łuku** – okazuje się, że różnica w odbiorze wizualnym pomiędzy grupą P oraz K jest tym większa, im większy kąt przy podporze. Zaleca się, aby architekci uwzględniali formy z grupy P, szczególnie w przypadku łuków o dużym kącie przy podporze. Różnica kształtu, podobnie jak efektywność, wzrasta wraz z wyniosłością łuku. W przypadku uzasadnionego wyboru formy na wycinku okręgu (grupa K), należy tym bardziej brać pod uwagę mniejszą efektywność i poszukiwać wspólnie z konstruktorem innych sposobów zwiększenia efektywności konstrukcji;

• **współpraca architekta i inżyniera** – konieczna jest integracja wymagań wytrzymałościowych i estetycznych na wczesnym etapie projektowania. Architekci i inżynierowie powinni wspólnie analizować formę konstrukcji, aby zoptymalizować zarówno jej wygląd, jak i parametry wytrzymałościowe. Bardzo istotne jest rozwijanie wiedzy dotyczącej projektowania wstępnego przez architektów, co przyczynia się do uniknięcia konfliktu na linii wizja projektu versus efektywność konstrukcyjna i możliwości wykonawcze.

Przyjęte założenia pozwoliły na szczegółowe porównanie wybranych wariantów konstrukcyjnych, ale ograniczają możliwość bezpośredniego przeniesienia wyników na szerszy kontekst inżynierski i architektoniczny. W dalszych badaniach planujemy uwzględnić większy zakres parametrów, takich jak różne współczynniki rozpiętości do wznoszenia, alternatywne schematy obciążeń (np. asymetryczne, dynamiczne), zróżnicowane przekroje elementów czy wpływ ograniczeń projektowych (np. wymagania montażowe, prefabrykacja). Pozwoli to na lepsze odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy konstrukcji oraz sformułowanie bardziej uniwersalnych wytycznych projektowych.

W ostatnich dekadach zaobserwowano dynamiczny rozwój konstrukcji drewnianych, ale literatura naukowa na temat systemów konstrukcyjnych z drewna pozostaje ograniczona [23]. Drewno wykazuje dużą efektywność w budownictwie wielokondygnacyjnym, choć w przypadku budynków wysokich wymaga często zastosowania dodatkowych wzmocnień [23]. Współczesne badania podkreślają konieczność określenia dopuszczalnej wytrzymałości na zginanie w przypadku zastosowań komercyjnych [13]. Może to stanowić przyczynek do dalszych naszych badań, zarówno w kontekście optymalizacji form belek z drewna klejonego, pracujących na zginanie, jak również konstrukcji budynków wysokich.

Drewno klejone, jako materiał budowlany, ma zdolność sekwestracji dwutlenku węgla, przyczyniając się do redukcji gazów cieplarnianych w atmosferze [24]. Ponadto daje dodatkowe możliwości projektowania zrównoważonego. Jednym z potencjalnych kierunków dalszych badań może być analiza wpływu naprężeń na kształtowanie zmiennej formy przekroju poprzecznego. Współcześnie prowadzone są już badania nad formami z drewna klejonego o zmiennym przekroju poprzecznym, np. dotyczące optymalizacji kształtu belek z drewna klejonego warstwowo (GLT) oraz badań eksperymentalnych [25]. Dotychczas badano możliwości zmniejszenia przekrojów po-

Economy Action Plan) and global UN goals, in particular Goal 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) and Goal 12 (Responsible Consumption and Production).

*Badania zostały przeprowadzone w ramach prac własnych: WZ/WA-IA/5/2023 i WI/WB-IIL/3/2025 Politechniki Białostockiej*

*Received: 16.12.2024*

*Revised: 14.02.2025*

*Published: 22.05.2025*

przeznaczonych w łukach z drewna klejonego przez wzmacnianie, zastępowanie materiałami o większej wytrzymałości i module sprężystości oraz przez sprężanie [26]. Nowy kierunek badań może stanowić forma o zmiennym przekroju poprzecznym na całej osi łuku. Dotychczasowa praca współautorki nad graficznym poszukiwaniem formy łuków przez architektów dowodzi, że kształtowanie zmiennej wysokości przekroju poprzecznego, z zachowaniem proporcji wynikających z trójkąta sił, pozwala na wstępną oszczędność materiału w przypadku kątów 30, 45 i 60° odpowiednio o 7,76%, 15,57 i 23,68%, w porównaniu z łukami zaprojektowanymi jako formy o stałym przekroju poprzecznym. Dalszy plan naszych prac przewiduje przeprowadzenie badania łuków o zmiennej formie przekroju, w myśl oszczędności materiałowej. Kierunki poszukiwania form, pozwalających na mniejsze zużywanie surowców bądź dokładniejsze ich zagospodarowanie, wiążą się bowiem z zasadami zrównoważonego rozwoju, takimi jak efektywne gospodarowanie zasobami, minimalizacja odpadów i redukcja emisji CO<sub>2</sub>. Celami tych badań są optymalizacja zużycia materiałów w budownictwie oraz zwiększenie trwałości konstrukcji przy jednoczesnym ograniczeniu ich śladu środowiskowego. Badania wpisują się w dyrektywę UE dotyczące zrównoważonego budownictwa (np. Circular Economy Action Plan) oraz globalne cele ONZ, a szczególnie Cel 9 (Innowacyjność, przemysł, infrastruktura) i Cel 12 (Odpowiedzialna konsumpcja i produkcja).

*Badania zostały przeprowadzone w ramach prac własnych: WZ/WA-IA/5/2023 i WI/WB-IIL/3/2025 Politechniki Białostockiej*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 16.12.2024 r.*

*Otrzymano poprawiony po recenzjach: 14.02.2025 r.*

*Opublikowano: 22.05.2025 r.*

## Literature

- [1] Szewczyk J. Drewno we współczesnej architekturze Część 1. Wstęp do architektury drewnianej. Builder. 2019; 265 (8): 28 – 32.
- [2] Hennessy R, Harris R. The Winter Gardens, Sheffield, UK. World Conf Timber Eng. 2004.
- [3] <https://www.prsarchitects.com/projects/arts-civic/sheffield-winter-garden>.
- [4] <https://rshp.com/projects/culture-and-leisure/bodegas-protos/>.
- [5] Gonzalo Palomar G. Control de Gestión. Cuadro de Mando Integral para la Bodega Protos. 2016.
- [6] Martínez Cerdón D. Traducción comentada ES>FR de parte de la página web de las Bodegas Protos de Peñafiel. 2022.
- [7] Bowen DH, Greene JP, Kisida B. Learning to think critically: A visual art experiment. Educ Res. 2014; 43 (1): 37 – 44.
- [8] <https://www.enr.com/articles/56522-contractors-take-care-in-expanding-arkansas-art-museum>.
- [9] Dickson M, Parker D. Sustainable Timber Design. Oxford: Routledge; 2014.
- [10] Vranovci K. The Effects of Crystal Bridges in Downtown Revitalization of Bentonville, Arkansas in The Last Decade. Fayetteville, AR: University of Arkansas; 2018.
- [11] Burry J, et al. Fabricate 2020. London: UCL Press; 2020.
- [12] Kamionka L, Wdowiak-Postulak A, Hajdenrajch A. Nowoczesne budownictwo drewniane w technologii CLT na przykładzie budynku Bioklimatycznej Jednostki Modularnej. Materiały Budowlane. 2022; <https://doi.org/10.15199/33.2022.03.07>.
- [13] Issa CA, Kmeid Z. Advanced wood engineering: glulam beams. Constr Build Mater. 2005; 19 (2): 99 – 106.
- [14] Haddadi R. An Industry in Transition: Early Glue-Laminated Timber in Switzerland, 1909-1939. Zurich: ETH Zurich; 2023.
- [15] Szewczyk J. Drewno we współczesnej architekturze Część 2. Budownictwo szybkościowe z drewna. Builder. 2019; 266 (9): 32 – 36.

- [16] Moody RC, Hernandez R. Glued-laminated timber. Madison: Forest Product Laboratory, USDH Forest Service; 1997.
- [17] Kram D, Nowak K, Śliwa-Wieczorek K, Hrehorowicz-Gaber H, Błazy R, Hrehorowicz-Nowak A, Błachut J, Łysień M, Ciepiela A, Dudek J. Drewniane budownictwo modułowe jako innowacyjne rozwiązanie szkół przyszłości. Materiały Budowlane. 2023; <https://doi.org/10.15199/33.2023.12.06>.
- [18] Nowak T. Wpływ smukłości przekrojów zginanych elementów z drewna klejonego warstwowo na nośność w warunkach pożaru. Materiały Budowlane. 2015; 1: 52 – 55.
- [19] Aicher S, Stapf G. Block glued glulam – Bridges, beams and arches. In: Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014). Quebec City, Canada; 2014.
- [20] Stefńska A, Cygan M, Batte K, Pietrzak J. Applications of timber and wood-based materials in architectural design using multi-objective optimisation tools. ConstrEconBuild. 2021; <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v21i3.7606>.
- [21] Wiercińska M. Potencjał oszczędności materiału w łukach gracujących na ściskanie, a forma architektoniczna. Optymalizacja zużycia materiału na etapie projektowania wstępnej konstrukcji. Przegląd Budowlany. 2025; 3.
- [22] Średniawa W. Zastosowanie konstrukcji z drewna klejonego w budownictwie ogólnym i mostownictwie. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej; 2021.
- [23] Premrov M, Žegarac, Leskovicar V. Innovative structural systems for timber buildings: A comprehensive review of contemporary solutions. Buildings. 2023; 13 (7): 1820.
- [24] Ong C. B. Glue-laminated timber (Glulam). In: Wood Composites. 1st ed. 2015. p. 123–140.
- [25] Szeptyński P, Jasińska D, Mikulski L. Shape optimization and experimental investigation of glue-laminated timber beams. Materials. 2024; <https://doi.org/10.3390/ma17246263>.
- [26] Kukule A, Rocens K. Reduction of wood consumption for glulam arch by its strengthening. In: Proceedings of the International Scientific Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”. 2014. p. 69–76.