

## **Analiza nośności drewnianych więźb dachowych ekspozycyjnych obiektów architektury wernakularnej**

**Bartosz Szostak, Tomasz Nicer**

*Katedra Konserwacji Zabytków, Wydział Budownictwa i Architektury,  
Politechnika Lubelska, e-mail: b.szostak@pollub.pl, t.nicer@pollub.pl*

**Streszczenie:** Drewniane, zabytkowe obiekty ekspozycyjne znajdują się w muzeach etnograficznych oraz na przestrzeniach ogólnie dostępnych dla zwiedzających. Dokonano sprawdzenia stanów granicznych konstrukcji w tych obiektach. Autorzy dokonali analizy statycznej oraz wymiarowania więźb dachowych wernakularnych obiektów lubelskiego skansenu, jako reprezentacyjnych obiektów drewnianej architektury wernakularnej. Określono nośność elementów konstrukcyjnych oraz zestawiono wyniki analiz. Wyniki przeprowadzonych obliczeń porównano oraz wysnuto wnioski.

**Słowa kluczowe:** nośność więźb dachowych, obiekty ekspozycyjne, analiza nośności

### **1. Wprowadzenie**

Obiekty architektury wernakularnej znajdujące się w muzeach są ogólnie dostępne dla wszystkich zwiedzających. Obiekty te zostały przeniesione na podstawie inwentaryzacji wykonanej przed ich rozbiórką. Podczas przenoszenia tych obiektów skupiono się głównie na jak najlepszym odwzorowaniu stanu pierwotnego. Nie ingerowano w rozwiązania konstrukcyjno-budowlane oraz nie przeprowadzono analiz statycznych elementów konstrukcyjnych. Obiekty architektury wernakularnej powstawały w systemie gospodarczym na podstawie wiedzy oraz doświadczeń budowniczych tamtych czasów. W tamtym okresie nie prowadzono szczegółowych wyliczeń oraz nie wymiarowano poszczególnych elementów obiektów budowlanych. Zatem czy eksploatowane obecnie obiekty muzealne spełniają wymagania normowe gwarantujące bezpieczeństwo pracy konstrukcji? Czy nie stanowią one zagrożenia dla osób w nich przebywających?

Zgodnie z § 204 ust. 4. Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie: „Warunki bezpieczeństwa konstrukcji”, o których mowa w ust. 1, „uznaje się za spełnione, jeżeli konstrukcja ta odpowiada Polskim Normom dotyczącym projektowania i obliczania konstrukcji. Zgodnie z ust. 1. konstrukcja budynku powinna spełniać warunki zapewniające nieprzekroczenie stanów granicznych nośności oraz stanów granicznych przydatności do użytkowania w żadnym z jego elementów i w całej konstrukcji.”[1]

W celu sprawdzenia powyższego zagadnienia wybrano 6 obiektów z lubelskiego skansenu z więźbami dachowymi o konstrukcji drewnianej. Zdecydowano się na analizie więźb dachowych z uwagi na ich znaczący wpływ w statykę całego obiektu oraz największe wyťaženie ze wszystkich elementów konstrukcyjnych. Wszystkie wybrane obiekty są w zbliżonym stanie technicznym oraz o zbliżonej konstrukcji. Dokonano analizy statycznej tych więźb oraz przeprowadzono wymiarowanie zgodnie z obowiązującymi dziś zestawami norm. Na podstawie tabelarycznego zestawienia dokonano porównania wyników analiz, co w szerszym świetle pozwoli nam określić skalę problemu zagadnienia.

## 2. Charakterystyka wybranych obiektów

Wszystkie analizowane obiekty to obiekty drewniane o bardzo podobnej konstrukcji oraz o podobnym wykończeniu. Obiekty posadowione na kamiennej podmurówce lub drewnianych podwalinach. Ściany w konstrukcji drewnianej. Stropy poddaszy wykonane jako stropy na belkach drewnianych w większości przypadków nie użytkowe. Więźby dachowe w tych obiektach o konstrukcji krokwiowo-jętkowej oparte na drewnianych belkach wieńczących ściany oraz na płatwi pośredniej. Na podstawie oceny makroskopowej, stan techniczny analizowanych obiektów określono jako dobry. W wybranych obiektach nie stwierdzono znaczącego osłabienia przekrojów spowodowanych korozją biologiczną, szkodnikami technicznymi drewna lub nie odpowiednim sposobem eksploatacji.

Tabelarycznie zestawiono wszystkie najistotniejsze dane o obiektach z punktu widzenia powyższej problematyki.

Tabela 1. Zestawienie obiektów poddanych analizie

Nazwa obiektu	Okres powstania	Rozpiętość więźby [m]	Wymiary krokwi (b x h) [cm]	Maksymalny rozstaw krokwi
Chałupa z Błonia	1914-1918	5,00	13x15	190cm
Chałupa z Brzezin	1789	5,75	14x15	180cm
Stodoła z Rogowa	XIX wiek	5,50	9x13	190cm
Chałupa z Żabna	1895	4,80	14x14	160cm
Okólnik z Żabna	1895	5,45	10x13	220cm
Chałupa z Niemiec	1890	5,05	12x13	125cm

Poniżej znajdują się zdjęcia ogólne każdego z obiektów oraz zdjęcia konstrukcji drewnianych więźb dachowych.



Fot. 1. Chałupa z Błonia



Fot. 2. Konstrukcja dachu chałupy z Błonia



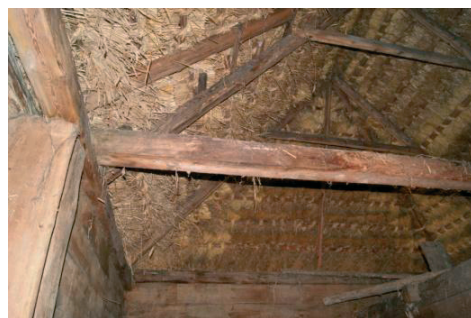
Fot. 3. Chałupa z Brzezin



Fot. 4. Konstrukcja dachu chałupy z Brzezin



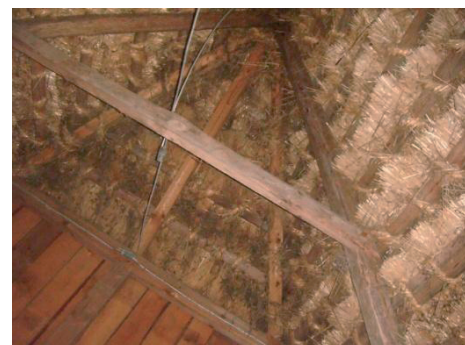
Fot. 5. Stodoła z Rogowa



Fot. 6. Konstrukcja dachu stodoły z Rogowa



Fot. 7. Chałupa z Rogowa



Fot. 8. Konstrukcja dachu chałupy z Rogowa



Fot. 9. Okólnik z Żabna



Fot. 10. Konstrukcja dachu Okólnika z Żabna



Fot. 11. Chałupa z Niemiec



Fot. 12. Konstrukcja dachu chałupy z Niemiec



### 3. Analiza statyczna oraz wymiarowanie

Analiz statycznych więźb dachowych dokonano w modelu dwuwymiarowym dla najbardziej niekorzystnego schematu statycznego dla każdego z dachów. Wszystkie analizowane więźby dachowe mają bardzo zbliżone materiałowo i technologicznie poszycie oraz pokrycie – strzecha słomiana na łąkach drewnianych. Z uwagi na ten fakt przyjęto jednakową wartość obciążenia od warstw wykończenia dachu dla wszystkich konstrukcji. Obciążenie charakterystyczne przyjęto o wartości  $0,80 \text{ kN/m}^2$ . Z uwagi na zbliżoną lokalizację obiektów (Lubelszczyzna) przyjęto również identyczne wartości charakterystyczne obciążeń środowiskowych wynikające z podziału na strefy normowe [5][6][7][8].

- Strefa śniegowa: 3.
- Strefa wiatrowa: I.
- Wys. n.p.m.: poniżej 300 m n.p.m.
- Klasa drewna: C18 – z uwagi na brak możliwości określenia przyjęto najbardziej niekorzystną klasę jak dla krajowego drewna sosnowego i świerkowego litego o wilgotności 12%

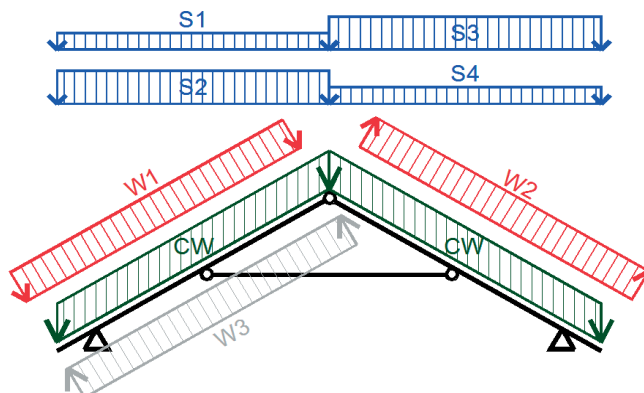
Zgodnie z normą [9] do analizy konstrukcji drewnianej, we wszystkich analizowanych modelach przyjęto następujące założenia:

- Klasa trwania obciążenia: obciążenia średniotrwale,
- Klasa użytkowania konstrukcji: 2.

#### 3.1. Analiza statyczna konstrukcji

Wszystkie konstrukcje wykonane jako krokwiowo-jętkowe. Z uwagi na jednakowy charakter wszystkich analizowanych konstrukcji (zwieńczenie ścian belkami stropowymi poddasza) mocowanie zamodelowano jako podpory przegubowe nieprzesuwne. Z uwagi na wykonane połączenie ciesielski jętki oraz połączenie krokwi w kalenicy zamodelowano w schemacie przegubowym.

Schemat statyczny obciążono podstawowymi obciążeniami od warstw poszycia, pokrycia oraz obciążeń środowiskowych. Ciężary warstw oraz współczynniki obciążenia dobrano zgodnie z Polską Normą [2][3][4]. Obciążenia środowiskowe oraz ich schematy obciążenia zamodelowano zgodnie z zaleceniami zawartymi w Polskich Normach [5][6][7][8] do obciążania śniegiem oraz wiatrem konstrukcji. Ponadto dobrano odpowiednią kombinację obciążeń oraz przeprowadzono analizę zgodnie z założoną kombinatoryką.



Rys. 1. Schemat obciążenia więźby dachowej

Tabela 2. Zestawienie grup obciążeniowych

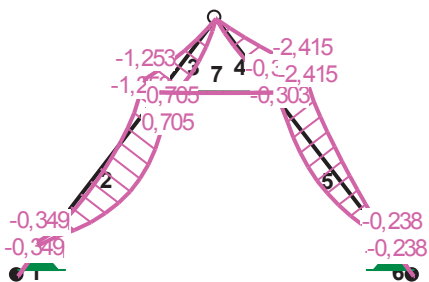
Grupa obciążenia	Rodzaj obciążenia	Współczynnik obciążenia
CW	CIEŻAR WARSTW WYKOŃCZENIOWYCH	1,2
S1	ŚNIEG C1 - NAWIETRZNA	1,5
S2	ŚNIEG C2 - NAWIETRZNA	1,5
S3	ŚNIEG C1 - ZAWIETRZNA	1,5
S4	ŚNIEG C2 - ZAWIETRZNA	1,5
W1	WIATR – PARCIE - NAWIETRZNA	1,5
W2	WIATR – SSANIE - NAWIETRZNA	1,5
W3	WIATR – SSANIE - ZAWIETRZNA	1,5

W celu uzyskania obwiedni sił wewnętrznych, dla analizowanych więźb dachowych wybrano odpowiednią kombinację oraz kombinatorykę obciążeń.

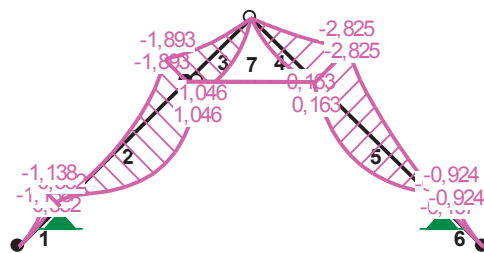
Poniżej przedstawiono zastosowaną kombinatorykę obciążenia:

- Obciążenie stałe (działające zawsze): CW.
- Obciążenie zmienne (działające ewentualnie): S1/S2+S3/S4+W1/W3+W2.
  - Gdzie „/” oznacza wykluczające się grupy obciążeń, a „+” oznacza kombinatorykę grup obciążeń.

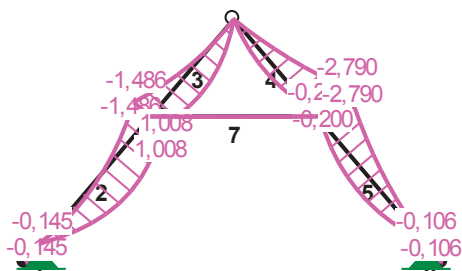
Schematy statyczne odpowiednio obciążono a następnie dokonano analizy statycznej. Poniżej przedstawiono wyniki analizy statycznej w postaci obwiedni momentów zginających – wartości obliczeniowych momentów zginających podano w kNm.



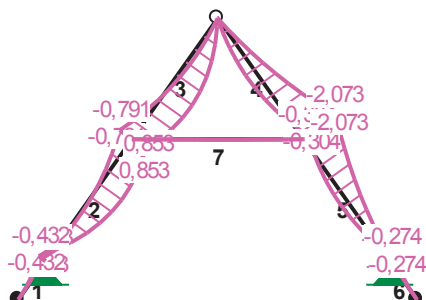
Rys. 2. Chałupa z Błonia



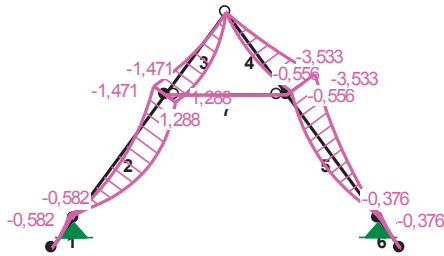
Rys. 3. Chałupa z Brzezina



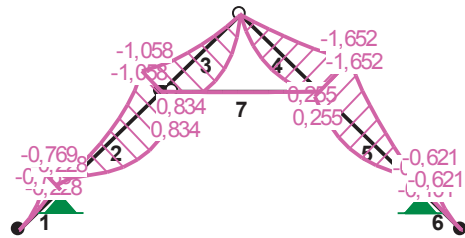
Rys. 4. Stodoła z Rogowa



Rys. 5. Chałupa z Żabna



Rys. 6. Okólnik z Żabna



Rys. 7. Chałupa z Niemiec

### 3.2. Wymiarowanie elementów konstrukcyjnych

W celu sprawdzenia bezpieczeństwa konstrukcji dokonano wymiarowania zgodnie z obowiązującym zestawem Polskich Norm [9]. Na podstawie przeprowadzonej analizy statycznej oraz wyznaczonych sił wewnętrznych przeprowadzono wymiarowanie elementów konstrukcyjnych w celu sprawdzenia stopnia wykorzystania przekrojów w stanach granicznych konstrukcji (Stan Graniczny Nośności oraz Stan Graniczny Użytkowości). Elementy wymiarowano dla rzeczywistych wymiarów elementów konstrukcyjnych zmierzonych w naturze podczas inwentaryzowania obiektu.

Dla najbardziej wyęźnionego przekroju każdej z więźb sprawdzono SGN (kolejno ściskanie/rozciąganie, zginanie, ścinanie, skręcanie) oraz SGU. Wyęźnienie elementów konstrukcyjnych sprawdzono zgodnie z normą PB-B-03150:2000 [9]. Obliczeń dokonano zgodnie z następującą metodologią:

Dla elementów rozciąganych:

$$\sigma_{t,0,d} = N/A_n$$

$\sigma_{t,0,d}$  – obliczeniowe naprężenia rozciągające wzdłuż włókien,  $N$  – siła normalna w elemencie,  $A_n$  – pole przekroju elementu netto.

Dla elementów ściskanych:

$$k_{c,y} = 1 / \left( k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2} \right)$$

$k_{c,y}$  – współczynnik wyboyceniowy,  $k_y$  – obliczane wg. pkt 4.2.1.e normy [9],  $\lambda_{rel,y}$  – smukłość sprawdzona przy ścisaniu.

Ściskanie ze zginaniem jako większa wartość z:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \quad \text{lub} \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}}$$

Nośność na zginanie ze ścisaniem jako większa wartość z:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}^2}{f_{c,0,d}^2} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \quad \text{lub} \quad \frac{\sigma_{c,0,d}^2}{f_{c,0,d}^2} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}}$$

$\sigma_{c,0,d}$  – naprężenie obliczeniowe ściskające w kierunku równoległym do włókien,  $\sigma_{m,z,d}$ ;  $\sigma_{m,y,d}$  – naprężenie obliczeniowe od zginania,  $f_{c,0,d}$  – wytrzymałość obliczeniowa na ściskanie wzdłuż włókien,  $f_{m,z,d}$ ;  $f_{m,y,d}$  – wytrzymałość obliczeniowa na zginanie wzdłuż osi głównych  $y$  i  $z$ .  $k_m$  – współczynnik zależny od przekroju.

Nośność na ścinanie:

$$\tau_d = \sqrt{\tau_{z,d}^2 + \tau_{y,d}^2}$$

$\tau_d$ ;  $\tau_{z,d}$ ;  $\tau_{y,d}$  – naprężenia obliczeniowe ścinające.

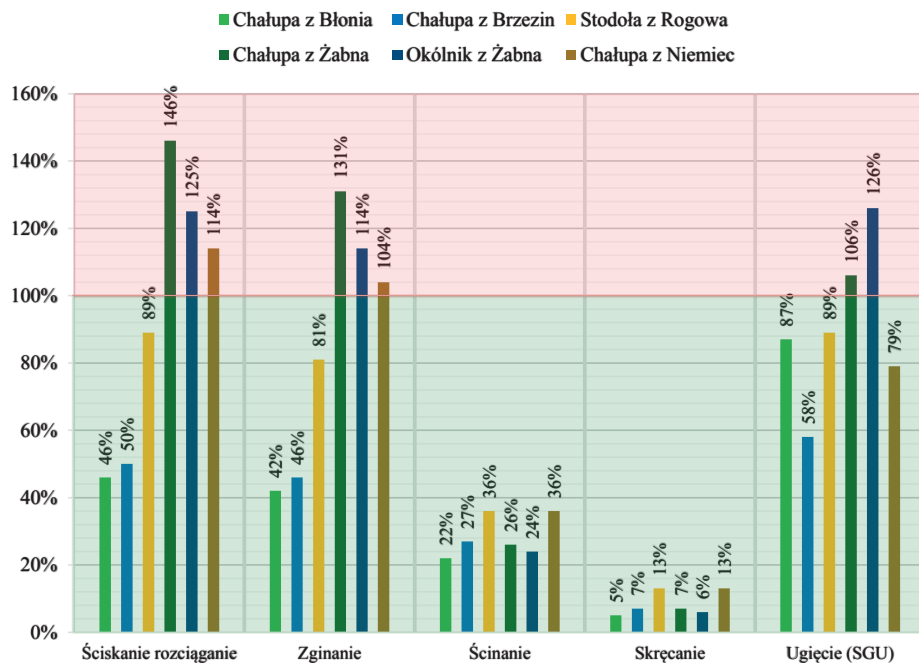
Ugięcie elementów konstrukcyjnych sprawdzono zgodnie z Polską Normą [10]:

$$u_{y,fin} = u_{y,inst} (1 + k_{def}), \quad u_{net,fin} < l / 250$$

$u_{y,fin}$  – przemieszczenie, ugięcie końcowe,  $u_{y,inst}$  – przemieszczenie, ugięcie chwilowe (doraźne),  $k_{def}$  – współczynnik uwzględniający przyrost przemieszczenia w czasie na skutek pełzania i zmian wilgotności,  $u_{net,fin}$  – ugięcie wynikowe.

#### 4. Zestawienie wyników

Zgodnie z powyższymi założeniami przeprowadzono wymiarowanie elementów konstrukcyjnych więźb dachowych. W celu jak najlepszego zobrazowania przeprowadzonych analiz zestawiono wyniki wymiarowania najbardziej wyťažonych elementów konstrukcyjnych dla Stanu Granicznego Nośności oraz Stanu Granicznego Użytkowania. Poniżej graficzne oraz tabelaryczne zestawienie efektów wymiarowania.



Rys. 8. Wykresy stanów granicznych nośności oraz użytkowania

Tabela 3. Zestawienie wyników wymiarowania

Obiekt	Ściskanie rozciąganie	Zginanie	Ścinanie	Skręcanie	Ugięcie (SGU)
Chałupa z Błonia	46%	42%	22%	5%	87%
Chałupa z Brzezin	50%	46%	27%	7%	58%
Stodoła z Rogowa	89%	81%	36%	13%	89%
Chałupa z Żabna	146%	131%	26%	7%	106%
Okólnik z Żabna	125%	114%	24%	6%	126%
Chałupa z Niemiec	114%	104%	36%	13%	79%

Kolorem czerwonym w tabeli oznaczono przekroczenia normowe.

Na podstawie dokonanych analiz stwierdzono przekroczenia stanów granicznych nośności oraz stanów granicznych użyteczności w trzech obiektach na sześć analizowanych. Miejscami te przekroczenia są znaczące – o ponad 40% stan graniczny nośności. Graniczne ugięcia również są przekroczone, jednak jak powszechnie wiadomo przekroczenie stanu granicznego użyteczności nie skutkuje bezpośrednio katastrofą budowlaną.

## 5. Podsumowanie oraz wnioski

Przeprowadzono analizę statyczną oraz wymiarowanie dla więźb dachowych charakterystycznych obiektów dla lubelskiego skansenu. Wybrano dachy 6 obiektów o podobnym charakterze. W analizach przyjęto schemat statyczny, który według autorów jest najbardziej zbliżony do rzeczywistej pracy konstrukcji. Konstrukcję obciążono ciężarem warstw poszycia, pokrycia oraz obciążeniami środowiskowymi zgodnie z obowiązującym zestawem norm. Wymiarowania elementów konstrukcyjnych dokonano dla wyznaczonych obwiedni sił wewnętrznych. Elementy zwymiarowano zgodnie z obowiązującymi na podstawie Rozporządzenia [1] Polskimi Normami. Wyniki zestawiono w postaci procentowej wartości stanów granicznych.

W trzech z sześciu analizowanych obiektów analiza wykazała przekroczenie stanów granicznych. Przeprowadzone analizy potwierdzają, iż elementy konstrukcje obiektów XIX wiecznej drewnianej architektury wernakularnej w bardzo zróżnicowanym stopniu odpowiadają dzisiejszym wymogom normowym. Z uwagi na dużą różnorodność wyników na podstawie powyższych analiz nie można wysnuć jednoznacznego wniosku o nośności więźb dachowych pozostałych obiektów skansenu. W przypadku tego typu obiektów każdorazowo należy przeprowadzić oddzielną analizę konstrukcji dachu. Konkluzja prawdopodobnie będzie taka sama dla wszystkich tego typu muzeów etnograficznych na terenie naszego kraju.

Zgodnie z Rozporządzeniem [1] obiekty, w których przekroczone są stany graniczne nośności i użytkowania nie spełniają warunków bezpieczeństwa budowli. Brak jest jakichkolwiek prawnych wytycznych dla tego typu obiektów dlatego z uwagi na przekroczenie stanów granicznych należało by zalecić wzmoczoną kontrolę stanu technicznego tych obiektów oraz kontrolowanie ugięć elementów konstrukcyjnych.

Wszystkie powstałe zmiany oraz anomalie w tych budowlach powinny zostać skontrolowane z osobami posiadającymi odpowiednią wiedzę techniczną w tym zakresie.

## Literatura

- 1 Rozporządzenie ministra infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- 2 PN-B-02000:1982 *Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości.*
- 3 PN-B-02001:1982 *Obciążenia budowli. Obciążenia stałe.*
- 4 PN-B-02003:1982 *Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne technologiczne. Podstawowe obciążenia technologiczne i montażowe.*
- 5 PN-B-02010:1980 *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie śniegiem.*
- 6 PN-B-02010:1980/Az1 *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie śniegiem.*
- 7 PN-B-02011:1977 *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.*
- 8 PN-B-02011:1977/Az1 Lipiec 2009 *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.*
- 9 PN-B-03150:2000. *Konstrukcje drewniane – Obliczenia statyczne i projektowanie.*
- 10 Kotwica J. *Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym.* Arkady, Warszawa 2009.



- 11 Tajchman J. *Propozycja systematyki i uporządkowania terminologii ciesielskich konstrukcji dachowych występujących na terenie Polski od XIV do XX w.* Monument t. II, Wydawnictwo Krajowy Ośrodek Badań Dokumentacji i Zabytków, 2005, s. 8-35.
- 12 Prace dyplomowe studentów Wydziału Budownictwa i Architektury znajdujące się w archiwum Katedry Konserwacji Zabytków.

## **Analysis of bearing capacity of wooden rafter frames in wooden vernacular building**

**Bartosz Szostak, Tomasz Nicer**

*e-mail: b.szostak@pollub.pl, t.nicer@pollub.pl*

**Abstract:** Wooden, heritage building are located in Muzeum Wsi Lubelskiej. Objects are available for visitors. Authors checked the bearing capacity of wooden rafter frames in this objects. Authors compared the results of analysis and defined bearing capacity of structural elements.

**Keywords:** bearing capacity of wooden rafter frames, vernacular objects.

