https://doi.org/10.68502/IB.2026.11.27

Sprawdzenie warunków ULS murowych ścian obciążonych głównie pionowo, podpartych podatnie

Verification of ULS conditions for masonry walls subjected to mainly vertical loading and flexibly supported



dr inż. Iwona Galman
Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa
e-mail: Iwona.Galman@polsl.pl
https://orcid.org/0000-0002-0196-6478



prof. dr hab. inż. Radosław Jasiński
Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa
e-mail: Radoslaw.Jasinski@polsl.pl
https://orcid.org/0000-0003-4015-4971

Streszczenie

Murowe ściany obciążone głównie pionowo analizuje się zwykle za pomocą uproszczonych modeli prętowych, mimo że w rzeczywistości pracują jako powłoki o zróżnicowanych warunkach brzegowych. Decydujący wpływ na ich stateczność ma sposób podparcia pionowych krawędzi oraz sztywność połączeń ze ścianami prostopadłymi, które kształtują wysokość efektywną ściany. Na podstawie zapisów Eurokodu 6 i badań połączeń ścian z elementów ABK przedstawiono autorską procedurę uwzględniania podatności podparcia przy wyznaczaniu współczynników ρ_n i wysokości efektywnej. Opracowano nomogramy umożliwiające określenie wartości ρ_n w zależności od smukłości ściany i proporcji sztywności połączenia ψ. Analizę przeprowadzono, stosując różne schematy statyczne oraz typy połączeń. Wykazano, że uwzględnienie podatności połączeń pozwala na bardziej realistyczną ocenę stateczności i nośności ścian, ograniczając nadmierny konserwatyzm obliczeń.

Słowa kluczowe konstrukcje murowe, elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK), połączenia ścian, sztywność połączeń

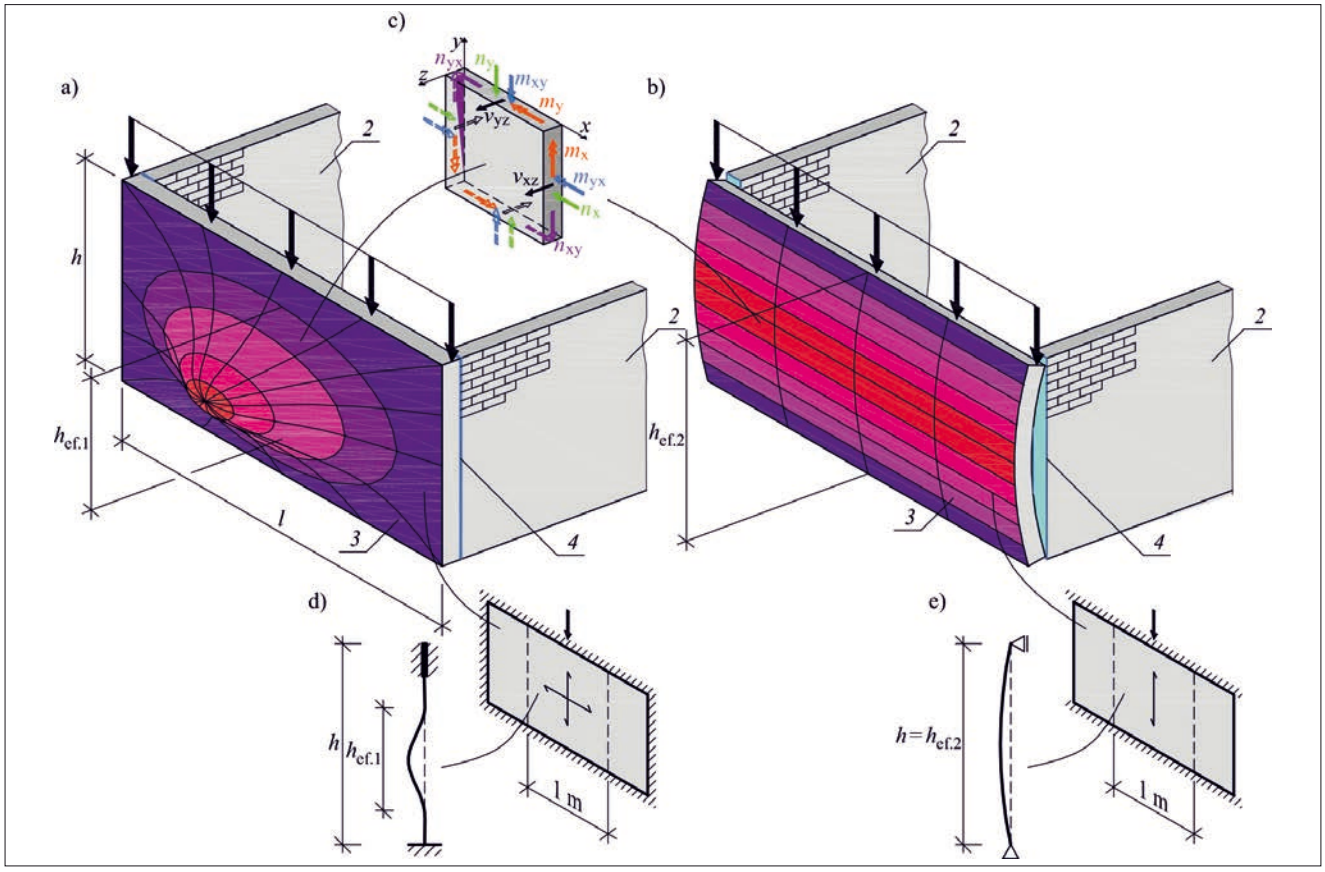
Abstract

Masonry walls subjected to mainly vertical loading are commonly analyzed using simplified member models, although in reality they behave as shell structures with varying boundary conditions. Their stability is strongly influenced by the support conditions along vertical edges and the stiffness of connections to perpendicular walls, both of which affect the effective height of the wall. Based on the provisions of Eurocode 6 and experimental studies on wall connections made of AAC masonry units, an original procedure is proposed for incorporating support flexibility into the determination of the reduction factor ρ_n and the effective height. Nomograms were developed to determine ρ_n as a function of wall slenderness and the joint stiffness ratio ψ. The procedure was applied to walls with different static schemes and connection types. The results demonstrate that accounting for connection flexibility enables a more realistic assessment of wall stability and load-bearing capacity, while reducing excessive conservatism in design calculations.

Keywords masonry structures, AAC masonry units, wall joints, connectors, stiffness of connections

WPROWADZENIE

Murowe ściany obciążone głównie pionowo występują najpowszechniej w budynkach wykonanych w technologii tradycyjnej lub skrępowanej. Ze względu na warunki brzegowe oraz obciążenia działające w płaszczyźnie i prostopadle do niej (wiatr, obciążenie gruntem, materiały sypkie, obciążenie liniowe) rzeczywistym schematem statycznym ściany obciążonej głównie pionowo jest powłoka. Obliczeniowe sprawdzenie warunków ULS na zginanie i ściskanie powinno uwzględniać interakcję sił tarczowych n_x, n_y oraz momentów zginających m_x, m_y i skręcających m_{xy}, m_{yx}, a także stateczność (rys. 1c). Znane z literatury analityczne modele prostokątnych powłok płaskich mogą nastręczać dużo problemów [1, 2], dlatego w praktyce inżynierskiej powłokę reprezentującą ścianę zastępuje się modelem pręta ramy [3, 4]. **Stateczność murowej ściany obciążonej mimośrodowo określano w przeszłości, stosując trzy podejścia:**



Rys. 1. Ideowy schemat roli połączeń w ścianach obciążonych głównie pionowo: a) sztywne połączenie między ścianą obciążoną głównie pionowo a ścianami prostopadłymi, b) podane połączenie między ścianą obciążoną głównie pionowo a ścianami prostopadłymi, c) rzeczywiste siły wewnętrzne w ścianie, d), e) obliczeniowe modele prętowe ścian obciążonych głównie pionowo (1 – ściana usztywniająca, 2 – ściany prostopadłe, 3 – ściana obciążona głównie pionowo – ściana ściskana, 4 – połączenie ścian)

- klasyczny model Eulera – Oniszczyk [5, 6], Royen [7];
- modele oparte na analizie równań różniczkowych odkształconej osi ściany – Angervo [8], Chapman i Slatford [9], Lewicki [10], Kukulski i Lugez [11], Mann [12] oraz Jäger [13];
- modele bazujące na przebiegu odkształconej osi ściany – Haller [14], Kitsching [15–18], Kordina i Quast [19] oraz Graubner [20, 21].

Aktualna procedura wyznaczania wartości współczynnika wyboczeniowego Φ obowiązująca w Eurokodzie 6 [22] bazuje na modyfikacjach modeli Kitschinga [23], a współczesne badania dotyczą empirycznej walidacji współczynników redukcyjnych nośności Φ_m i oceny błędów modeli ścian [24–27].

Każdy z wymienionych modeli, łącznie z normowym, sprowadza zagadnienie przestrzennego stanu obciążenia do stanu płaskiego, a warunki podparcia pionowych krawędzi ściany uwzględnia się, stosując różne warunki brzegowe, które wynikają ze sposobu połączenia z innymi ścianami.

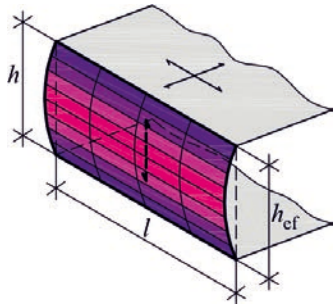
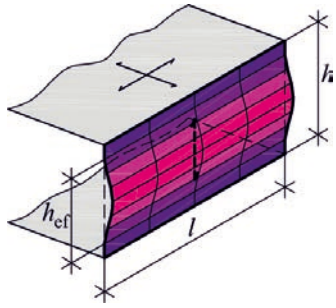
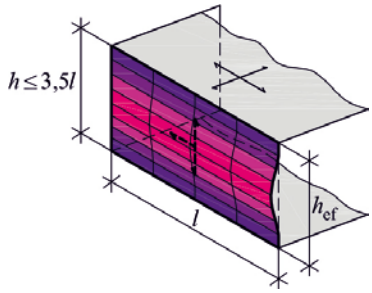
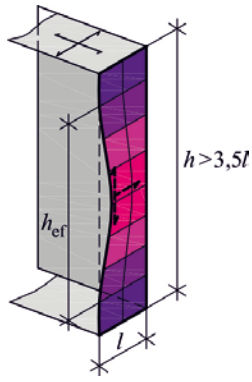
Połączenia ścian odgrywają więc kluczową rolę w kształtowaniu pracy przestrzennej budynku, a ich zadaniem jest zapewnienie skutecznego przenoszenia sił wewnętrznych działających między ścianami krzyżującymi się lub stykającymi w narożach. **Brak odpowiedniego połączenia może prowadzić do lokalnych uszkodzeń powodujących redukcję sztywności przestrzennej budynku.** Na rys. 1a, b pokazano widok odkształconej ściany usztywniającej z różnymi typami połączeń między ścianami prostopadłymi. Kiedy ściana obciążona głównie pionowo podparta jest w sztywny sposób wzdłuż pionowych krawędzi oraz wieńców u góry i dołu (rys. 1a), wtedy utrata stateczności obejmuje środkowy obszar ściany, a wysokość efektywna (długość wyboczeniowa) wynosi $h_{ef.1}$. Jeżeli ściana jest usztywniona u góry i dołu, a wzdłuż pionowych krawędzi nie jest połączona lub występuje połączenie podatne (rys. 1b), wtedy utrata stateczności nie ma charakteru lokalnego, a wysokość efektywna ściany obciążonej głównie pionowo jest równa $h_{ef.2} = h_k > h_{ef.1}$. Uproszczonymi modelami ściany obciążonej głównie pionowo, różnie podpartymi wzdłuż pionowych krawędzi, są pręty pokazane na rys. 1c, d. Z technicznego punktu widzenia połączenia ścian powinny zapewniać ciągłość materiałową oraz odpowiednią wytrzymałość na ścinanie, ściskanie i rozciąganie. W praktyce jest to realizowane dzięki odpowiedniemu wiązaniu elementów murowych, stosowaniu materiałów o właściwej klasie, a w niektórych przypadkach także przez mechaniczne

Rys. autorów

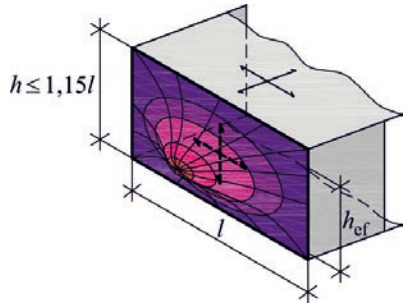
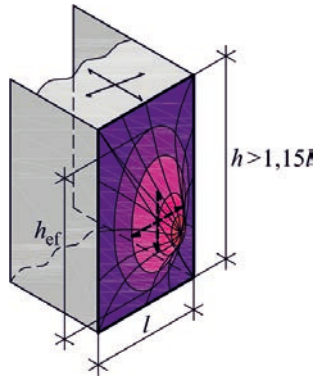
kotwienie lub zbrojenie. Sposób połączenia ścian obciążonych głównie pionowo z prostopadłymi powinien być świadomie dobrany i uwzględniony w obliczeniach warunków ULS.

Norma Eurokod 6 [22] określa, że **ściany wzajemnie prostopadłe lub ukośne muszą być połączone w celu ułatwienia przenoszenia obciążeń pionowych i poziomych między nimi**. Pomija się wpływ podatności połączeń, zakładając ich pełną nieodkształcalność. Sztywne połączenia można osiągnąć, stosując tradycyjne wiązanie murowe. Natomiast łączniki lub zbrojenie wpuszczone w każdą ścianę powodują, że połączenia mają charakter podatny. Norma [22] szczegółowo wskazuje zasady obliczeń ścian obciążonych głównie pionowo, w których ich połączenia mają charakter sztywny – tym samym nieznany jest wpływ połączeń ścian w przypadku, gdy mają one charakter podatny. Artykuł stanowi praktyczną kontynuację publikacji autorów [28], dotyczącą uproszczonego postępowania i uwzględnienia podatnych połączeń między ścianami obciążonymi głównie pionowo ze ścianami prostopadłymi. Ze względu na ograniczoną populację wyników badań połączeń ścian rozważania zawężono wyłącznie do ścian

Tab. 1. Wartości współczynników ρ_n ścian o różnych warunkach podparcia

Nr schematu	Szkic	Współczynnik ρ_n	Zakres stosowania
„1”		$\rho_2 = 1{,}00$	ściana utwierdzona na górnej i dolnej krawędzi przez stropy lub dachy drewniane rozpięte dwukierunkowo albo przez stropy drewniane rozpięte jednokierunkowo, oparte na co najmniej 2/3 grubości ściany i nie mniej niż 85 mm
„2”		$\rho_2 = 0{,}75$	ściana utwierdzona na górnej i dolnej krawędzi przez stropy żelbetowe lub dachy rozpięte dwukierunkowo albo przez stropy żelbetowe rozpięte jednokierunkowo, oparte na co najmniej 2/3 grubości ściany
		$\rho_2 = 1{,}00$	jeżeli mimośród obciążenia na górnej krawędzi ściany jest większy niż 0,25 grubości ściany
„3”		$\rho_3 = \frac{1}{1+\left[\frac{\rho_2 \times h}{3\,l}\right]^2} \times \rho_2$	ściana utwierdzona na górnej i dolnej krawędzi oraz usztywniona na jednej pionowej krawędzi (z jedną krawędzią swobodną), gdy h ≤ 3,5 l
		$\rho_3 = \frac{1{,}5\,l}{h} \geq 0{,}3$	ściana utwierdzona na górnej i dolnej krawędzi oraz usztywniona na jednej pionowej krawędzi (z jedną krawędzią swobodną), gdy h > 3,5 l

Tab. i rys. autorów

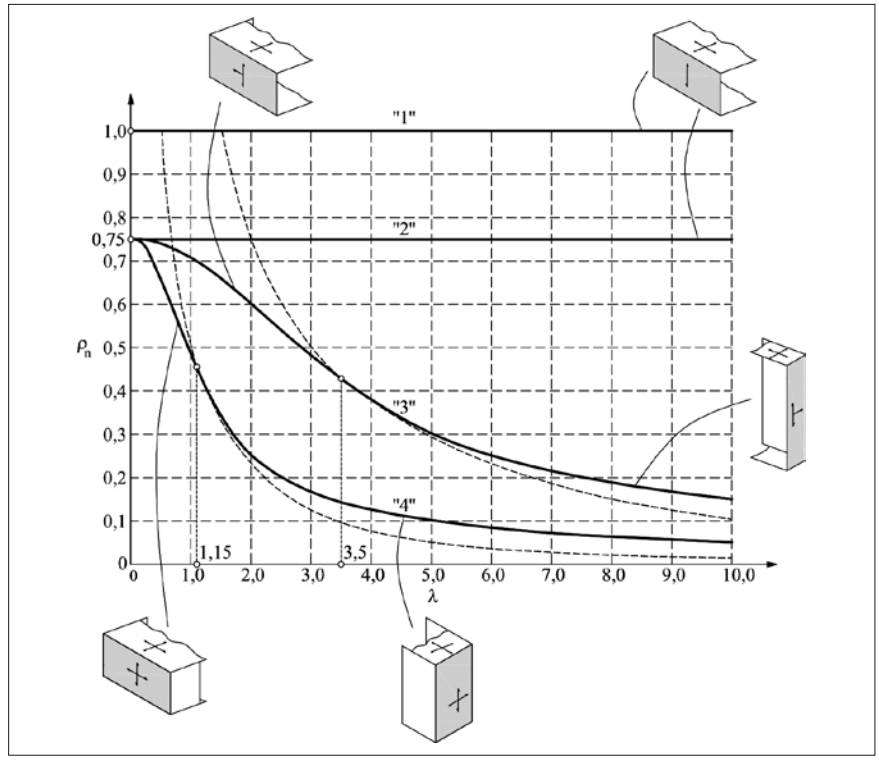
		$\rho_4 = \frac{1}{1+\left[\frac{\rho_2 \times h}{l}\right]^2} \times \rho_2$	ściana utwierdzona na górnej i dolnej krawędzi oraz usztywniona na obydwu pionowych krawędziach, gdy h ≤ 1,15 l
„4”		$\rho_4 = \frac{0{,}5\ l}{h}$	ściana utwierdzona na górnej i dolnej krawędzi oraz usztywniona na obydwu pionowych krawędziach, gdy h > 1,15 l

wykonanych z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego – w ich przypadku dysponowano danymi badawczymi w zakresie różnych typów połączeń [29–32].

USTALENIA NORMOWE

Informacje o wpływie sposobu podparcia ścian obciążonych głównie pionowo przedstawiono w normie [22] w rozdziale 5.5.1.2 poświęconym wysokości efektywnej ścian. Wskazano, że kluczowe znaczenie ma sposób współpracy ściany z innymi elementami konstrukcji. Należy wziąć pod uwagę względną sztywność ścian oraz jakość połączeń. To, jak bardzo ograniczone są przemieszczenia ściany obciążonej głównie pionowo, zależy więc nie tylko od samych właściwości materiałowych i geometrycznych, lecz także od tego, w jakim stopniu zapewniona jest jej współpraca z pozostałymi elementami konstrukcji i jaki jest rzeczywisty schemat statyczny. Oprócz stropów, dachów i odpowiednio rozmieszczonych ścian poprzecznych usztywnieniami ściany mogą być również inne elementy o porównywalnej sztywności, do których należy zaliczyć żelbetowe rdzenie skrępowania lub poszerzenia – pilastry.

W rozdziale 5.5.1.2 normy [22] **wskazano warunki, przy których ścianę można uznać za usztywnioną wzdłuż jej pionowej krawędzi**. Taka sytuacja ma miejsce przede wszystkim wtedy, gdy między ścianami rozpatrywaną a usztywniającą nie przewiduje się powstawania zarysowań i występuje tradycyjne wiązanie murarskie. Oznacza to, że obie powinny charakteryzować się zbliżonymi właściwościami



Rys. 2. Zmiany wartości współczynnika ρ_n w funkcji smukłości ścian λ = h/l

Rys. autorów

odkształceniowymi, być obciążone w porównywalny sposób oraz wznoszone jednocześnie i odpowiednio ze sobą połączone. Istotne jest również to, aby nie występowały znaczące różnice odkształceń, które mogłyby wynikać np. ze skurczu materiału czy zróżnicowanego obciążenia. Alternatywnie za podatne usztywnienie można uznać sytuację, w której połączenie między ścianami jest zdolne do przejmowania zarówno sił rozciągających, jak i ściskających przy znacznie większych przemieszczeniach w stosunku do tradycyjnego wiązania murarskiego. W praktyce realizuje się to poprzez zastosowanie odpowiednich łączników, kotew lub innych rozwiązań konstrukcyjnych zapewniających współpracę ścian.

W normie [22] podano także interpretację warunków podparcia ścian w zależności od ich smukłości oraz liczby usztywnionych krawędzi pionowych i określania wysokości efektywnej ściany – długości wyboczeniowej. Na wysokość efektywną wpływają sposób podparcia ściany oraz stopień usztywnienia, a jest ona iloczynem wysokości kondygnacji w świetle oraz odpowiedniego współczynnika redukcyjnego według wzoru adaptowanego z normy DIN 1053-1 [33] w postaci:

$$h_{ef} = \rho_n \times h \qquad (1)$$

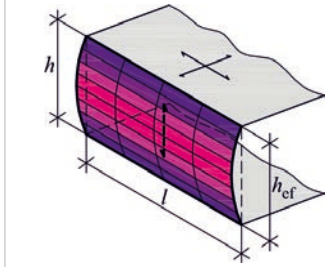
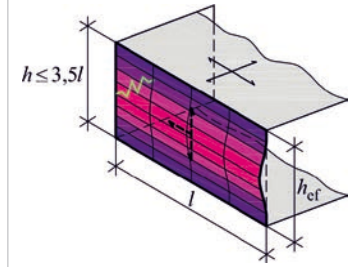
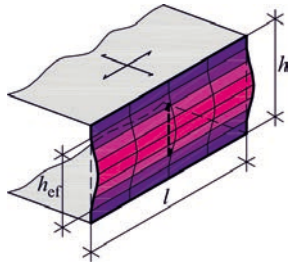
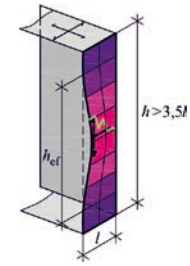
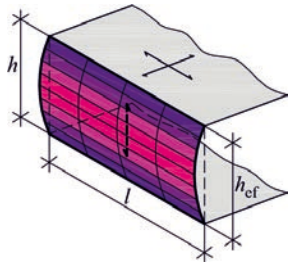
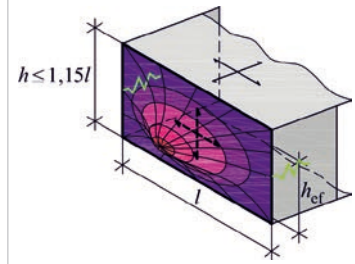
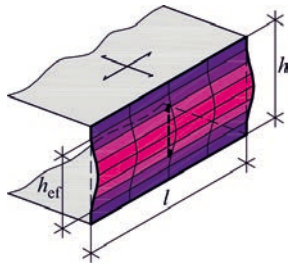
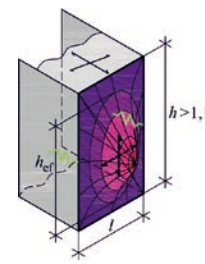
gdzie:

h_{ef} – wysokość efektywna ściany [m],

h – wysokość kondygnacji w świetle [m],

ρ_n – współczynnik redukcyjny zależny od sposobu utwierdzenia oraz usztywnienia ściany (przyjmujący wartości odpowiadające różnym schematom pracy, np. n = 2, 3, 4) zestawiony w tab. 1 i zobrazowany na rys. 2.

Tab. 2. Możliwe przekształcenia schematów statycznych ścian z uwzględnieniem podatnego podparcia

Pierwotny schemat statyczny		Schemat statyczny po dodaniu ścian połączonych sprężyście	
„1”		„3”	
„2”			
„1”		„4”	
„2”			

– podatne połączenie ze ścianą prostopadłą

PROPOZYCJA UWZGLĘDNIENIA WPŁYWU POŁĄCZEŃ ŚCIAN

Zgodnie z zaleceniami normy [22] połączenia ścian z wiązaniem (dowolnym) murarskim można traktować jako sztywne, a w pozostałych przypadkach pionowe krawędzie można uważać za swobodnie podparte. Przy ścianach z ABK [29, 30] połączenie sztywne charakteryzowałoby się sztywnością $^1K_{el}$, a połączenie podatne – sztywnością $^2K_{el}$. W związku z tym schematy „1” i „2” ścian z dwiema krawędziami swobodnymi (tab. 1) mogą przekształcić się w schematy z jedną (schemat „3”) lub dwoma krawędziami podpartymi podatnie lub sztywnie – schemat „4”.

Uwzględniając fakt, że sztywne połączenie charakteryzuje się sztywnością ^1K_e, a połączenie podatne sztywnością $^2K_{el}$, poszukiwaną wartość współczynnika ρ_{cal} w schemacie z krawędziami podpartymi podatnie można obliczyć według relacji:

$$\rho_{cal} = \rho_j + \frac{\rho_i - \rho_j}{^1K_{el}} \left(^1K_{el} - \ ^2K_{el} \right) =$$

$$= \rho_j + \left(\rho_i - \rho_j \right)(1 - \psi) \qquad (2)$$

w której:

ρ_i – współczynniki schematów ze swobodnymi krawędziami (i = 1, 2),

ρ_j – współczynniki schematów z krawędziami podpartymi sztywnie (j = 3, 4),

ψ – iloraz sztywności połączenia podatnego $^2K_{el}$ i sztywnego ^1K_e.

Schematy „1” i „2” po dodaniu jednej ściany połączonej łącznikami mogą przekształcać się w schemat „3” z jedną

Tab. i rys. autorów

krawędzią swobodną i jedną krawędzią podpartą podatnie, a po dodaniu dwóch ścian połączonych podatnie – w schemat „4”.

Wykorzystując zależność (2), opracowano nomogramy, które pozwalają odczytać wartości współczynników ρ_n przy przekształceniu ścian ze schematów „1” i „2” w schematy „3” i „4” przy różnych wartościach współczynników ψ. Nomogramy pokazano na rys. 3 i 4.

Skorygowane wartości współczynników ρ_n wpływają na wysokość efektywną ściany (1) i smukłość względną obliczaną według wzoru:

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t_{ef}}\sqrt{\frac{f_k}{E}} \qquad (3)$$

gdzie:

E – moduł sprężystości muru [m],

f_k – charakterystyczna wytrzymałość muru na ściskanie [N/mm²],

t_{ef} – efektywna grubość ściany [m].

Zmiany smukłości względnej (2) powodują zmiany współczynnika redukcyjnego nośności Φ_m, który jest równy, zgodnie z załącznikiem G normy [22]:

$$\Phi_m = A_1 \times e^{-\frac{u^2}{2}} \qquad (4)$$

gdzie:

$$A_1 = 1 - 2\frac{e_{mk}}{t} \qquad (5)$$

$$u = \frac{\lambda - 0{,}063}{0{,}73 - 1{,}17\frac{e_{mk}}{t}} \qquad (6)$$

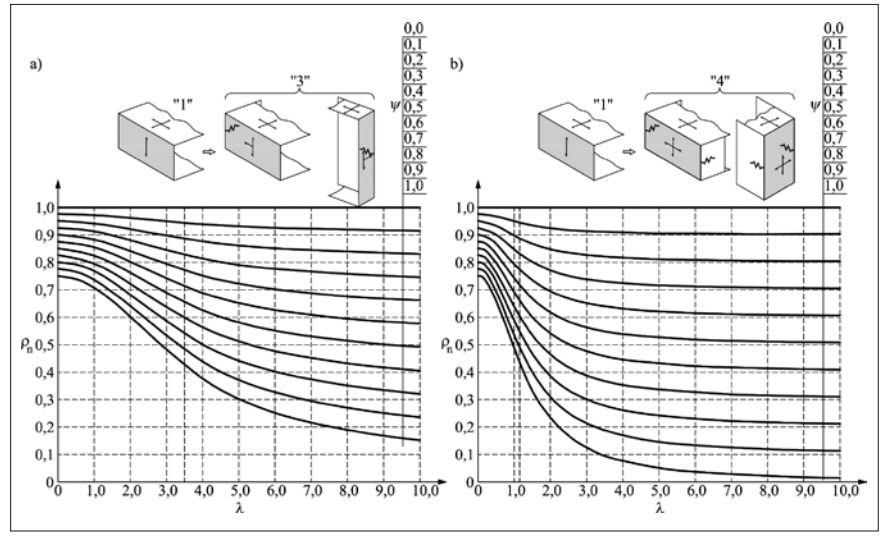
e_{mk} – mimośród całkowity w połowie wysokości ściany [m],

t – grubość ściany [m].

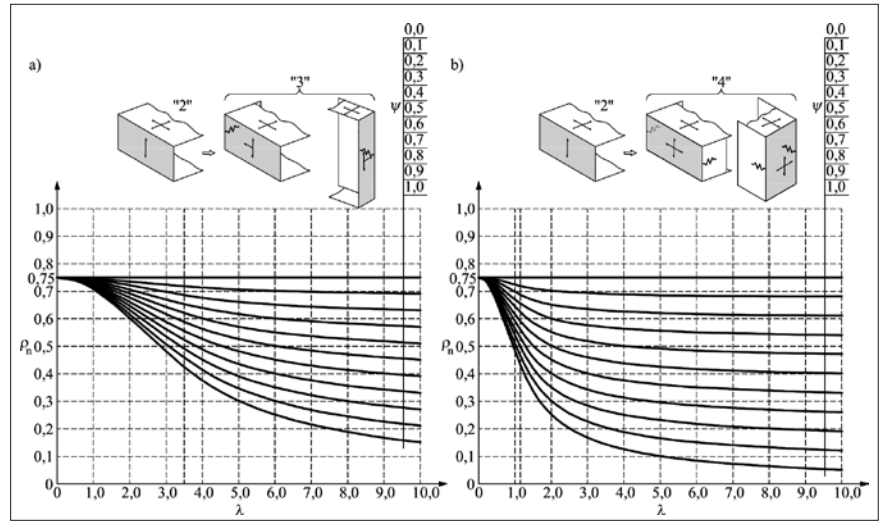
Wartość współczynnika Φ_m wpływa bezpośrednio na nośność na ściskanie ściany obciążonej głównie pionowo:

$$N_{Rdm} = \Phi_m \times t \times f_d \qquad (7)$$

gdzie f_d – obliczeniowa wytrzymałość na ściskanie muru [N/mm²].



Rys. 3. Nomogramy współczynników ρ_n w funkcji smukłości ścian λ = h/l przy różnych wartościach ilorazów sztywności ψ: a) przekształcenie schematu „1” w „3”, b) przekształcenie schematu „1” w „4”



Rys. 4. Nomogramy współczynników ρ_n w funkcji smukłości ścian λ = h/l przy różnych wartościach ilorazów sztywności ψ: a) przekształcenie schematu „2” w „3”, b) przekształcenie schematu „1” w „4”

APLIKACJA METODY W ŚCIANACH WYKONANYCH Z ELEMENTÓW MUROWYCH Z ABK

Wpływ sztywności połączeń ścian z elementów murowych z ABK w stanie sprężystym określono na podstawie badań własnych. Szczegółowy opis ich metodologii oraz pełne zestawienie wyników przedstawiono w artykułach [29–32]. Rozpatrywano połączenia wykonywane w ścianach konstrukcyjnych jako tradycyjne połączenie murarskie oraz realizowane z wykorzystaniem płaskowników perforowanych (typ P10), a także perforowanych z poszerzeniem. Oprócz tego zaprezentowano połączenia stosowane w naprawach i wzmocnieniach lub ścianach niekonstrukcyjnych w postaci siatek z tworzywa sztucznego układanych w spoinach wspornych oraz siatek typu SGM (Silica Glass Mesh) układanych przestrzennie. Uzyskane wartości sztywności połączeń oraz ich ilorazy zestawiono w tab. 3.

Otrzymane wyniki wskazują na wyraźną przewagę pod względem sztywności połączenia klasycznego nad rozwiązaniem, które wykorzystuje płaskowniki perforowane oraz siatki z tworzywa sztucznego. W przypadku połączenia ścian konstrukcyjnych ze stalowych płaskowników perforowanych wartości współczynnika ψ wyniosły odpowiednio 0,202 i 0,522. Połączenia z siatek z tworzywa sztucznego charakteryzowały się zdecydowanie mniejszą sztywnością

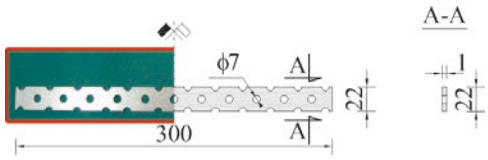
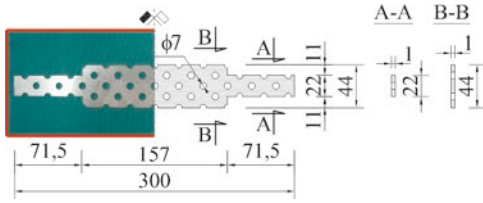
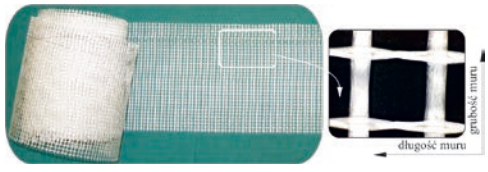
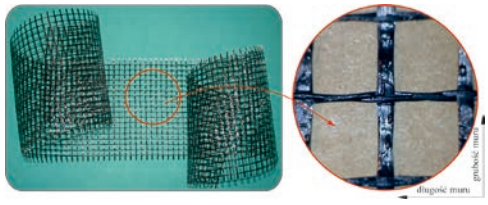
Rys. autorów

równą 0,18 sztywności klasycznego wiązania murarskiego i zaledwie 0,006 w przypadku siatek ułożonych przestrzennie.

PRZYKŁADY OBLICZEŃ

W ramach prowadzonych obliczeń przyjęto model ściany wykonanej z autoklawizowanego betonu komórkowego o wysokości 2,7 m i zróżnicowanej długości oraz grubości 0,18 m. Następnie wyznaczono wysokość efektywną ściany w dwóch wariantach pracy konstrukcji „1" i „2". Wyniki obliczeń ścian bez ścian poprzecznych zestawiono w tab. 4.

Tab. 3. Sztywności połączeń ścian wykonanych z elementów murowych z różnymi typami łączników

Typ połączenia	Sztywność połączenia [MN/m]		$\psi = {}^2K_{el}/{}^1K_e$
	^1K_e	$^2K_{el}$	
Klasyczne wiązanie murarskie	496	–	–
Płaskownik perforowany (typ P10) 	–	100,00	0,202
Płaskownik perforowany z poszerzeniem 	–	259,00	0,522
Siatka z tworzywa sztucznego umieszczana w spoinach wspornych 	–	89,20	0,180
Siatka typu MAP-Reinforcement (SGM) ułożona przestrzennie 	–	3,02	0,006

Tab. 4. Zestawienie uzyskanych wyników obliczeń ścian bez ścian poprzecznych

Schemat ściany	ρ_2	h [m]	Φ_m
„1"	1,00	2,7	0,325
„2"	0,75	2,7	0,436

W tab. 5 przedstawiono rezultaty obliczeń, w których do ściany obciążonej głównie pionowo w schemacie „1" lub „2" dodawano jedną ścianę poprzeczną połączoną łącznikami, przekształcając schemat „1" lub „2" w „3". Natomiast w tab. 3 zestawiono wyniki obliczeń, w których do ściany obciążonej głównie pionowo w schemacie „1" lub „2" dodawano dwie ściany poprzeczne połączone łącznikami, przekształcając schemat „1" lub „2" w „4". Na rys. 5 i 6 zaprezentowano sposób wykorzystania nomogramów w przypadku połączenia wykonanego z płaskownika perforowanego typu P30. Każdorazowo dostosowano długość ściany w taki sposób, aby spełnić wymagania normy [22] w zakresie długości. Po wyznaczeniu ρ_{cal} obliczono wartości współczynników redukcyjnych nośności w środkowym przekroju Φ_m, przy założeniu średniej wartości mimośrodu: $e_{mk} = 0{,}5(0{,}45–0{,}05)t = 0{,}2t$. Dodatkowo na podstawie badań przyjęto wartość modułu sprężystości muru z autoklawizowanym betonem komórkowym równą E = 2040 N/mm^2, a charakterystyczną wytrzymałość na ściskanie obliczono według zależności $f_k = E/600 = 3{,}4$ N/mm^2.

Na podstawie wykonanych obliczeń z uwzględnieniem podatności połączeń ścian wykazano, że dodanie jednej lub dwóch ścian poprzecznych połączonych łącznikami, czyli przekształcenie schematów „1" i „2" w „3" i „4", spowodowało redukcję wartości współczynników ρ_n oraz Φ_m. W przypadku połączenia z płaskownikami perforowanymi typu P30 i dodaniu jednej ściany poprzecznej, czyli przekształceniu schematu „1" lub „2" w „3", współczynnik Φ_m w stosunku do wartości Φ_m, uzyskanej w ścianie z dwiema krawędziami swobodnymi, był niższy o 8–14%. Z kolei przy dodaniu dwóch ścian poprzecznych i przekształceniu schematu „1" lub „2" w „4" analogicznie określona redukcja współczynnika redukcyjnego nośności wyniosła 10–19%.

Z powodu większej sztywności współczynnik Φ_m udało się obniżyć zdecydowanie bardziej, kiedy zastosowano płaskownik

Tab. i rys. autorów

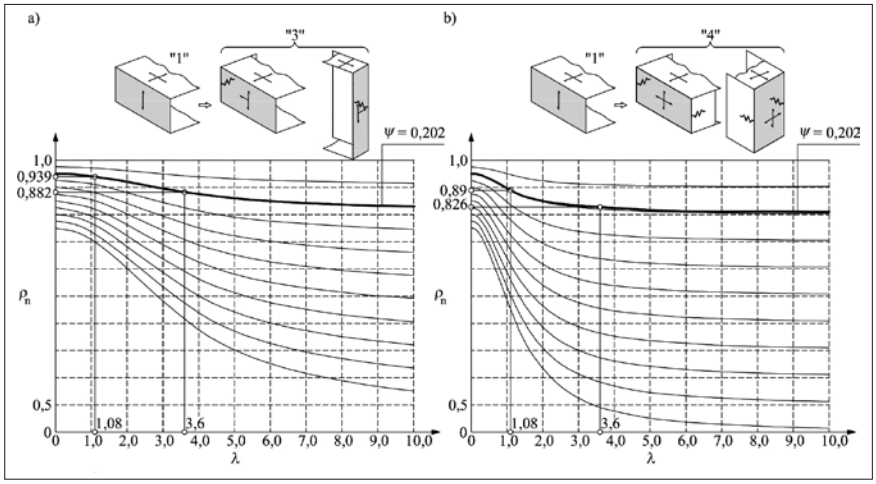
Tab. 5. Przekształcenie ścian w schemat „3" z jedną ścianą poprzeczną

Pierwotny schemat ściany	ρ_2	h [m]	l [m]	$\frac{h}{l}$	Schemat ściany po przekształceniu	ρ_{cal}	$^3\Phi_{m1}$	$\frac{\Phi_m}{^3\Phi_{m1}}$
Płaskownik perforowany (typ P10)								
„1"	1,00	2,7	2,50	1,08 < 3,50	„3"	0,939	0,352	0,92
			0,75	3,60 > 3,50		0,882	0,378	0,86
„2"	0,75	2,7	2,50	1,08 < 3,50		0,740	0,440	0,99
			0,75	3,60 > 3,50		0,683	0,464	0,94
Płaskownik perforowany z poszerzeniem								
„1"	1,00	2,7	2,50	1,08 < 3,50	„3"	0,843	0,395	0,82
			0,75	3,60 > 3,50		0,695	0,459	0,71
„2"	0,75	2,7	2,50	1,08 < 3,50		0,723	0,447	0,97
			0,75	3,60 > 3,50		0,576	0,506	0,86
Siatka z tworzywa sztucznego umieszczana w spoinach wspornych								
„1"	1,00	2,7	2,50	1,08 < 3,50	„3"	0,946	0,349	0,93
			0,75	3,60 > 3,50		0,895	0,372	0,87
„2"	0,75	2,7	2,50	1,08 < 3,50		0,741	0,440	0,99
			0,75	3,60 > 3,50		0,690	0,461	0,95
Siatka typu MAP-Reinforcement (SGM) ułożona przestrzennie								
„1"	1,00	2,7	2,50	1,08 < 3,50	„3"	0,998	0,326	1,0
			0,75	3,60 > 3,05		0,996	0,326	1,0
„2"	0,75	2,7	2,50	1,08 < 3,50		0,750	0,436	1,0
			0,75	3,60 > 3,50		0,748	0,437	1,0

Tab. 6. Przekształcenie ścian w schemat „4" z dwiema ścianami poprzecznymi

Pierwotny schemat ściany	ρ_2	h [m]	l [m]	$\frac{h}{l}$	Schemat ściany po przekształceniu	ρ_{cal}	$^4\Phi_{m1}$	$\frac{\Phi_m}{^4\Phi_{m1}}$
Płaskownik perforowany (typ P10)								
„1"	1,00	2,7	2,50	1,08 < 1,15	„4"	0,89	0,374	0,87
			0,75	3,60 > 1,15		0,826	0,403	0,81
„2"	0,75	2,7	2,50	1,08 < 1,15		0,69	0,461	0,95
			0,75	3,60 > 1,15		0,627	0,487	0,90
Płaskownik perforowany z poszerzeniem								
„1"	1,00	2,7	2,50	1,08 < 1,15	„4"	0,714	0,451	0,72
			0,75	3,60 > 1,15		0,55	0,515	0,63
„2"	0,75	2,7	2,50	1,08 < 1,15		0,595	0,499	0,87
			0,75	3,60 > 1,15		0,431	0,553	0,79
Siatka z tworzywa sztucznego umieszczana w spoinach wspornych								
„1"	1,00	2,7	2,50	1,08 < 1,15	„4"	0,902	0,369	0,88
			0,75	3,60 > 1,15		0,545	0,394	0,82
„2"	0,75	2,7	2,50	1,08 < 1,15		0,697	0,459	0,95
			0,75	3,60 > 1,15		0,640	0,482	0,91
Siatka typu MAP-Reinforcement (SGM) ułożona przestrzennie								
„1"	1,00	2,7	2,50	1,08 < 1,15	„4"	0,997	0,326	1,00
			0,75	3,60 > 1,15		0,995	0,327	0,99
„2"	0,75	2,7	2,50	1,08 < 1,15		0,748	0,437	1,00
			0,75	3,60 > 1,15		0,746	0,38	1,00

Tab. autorów

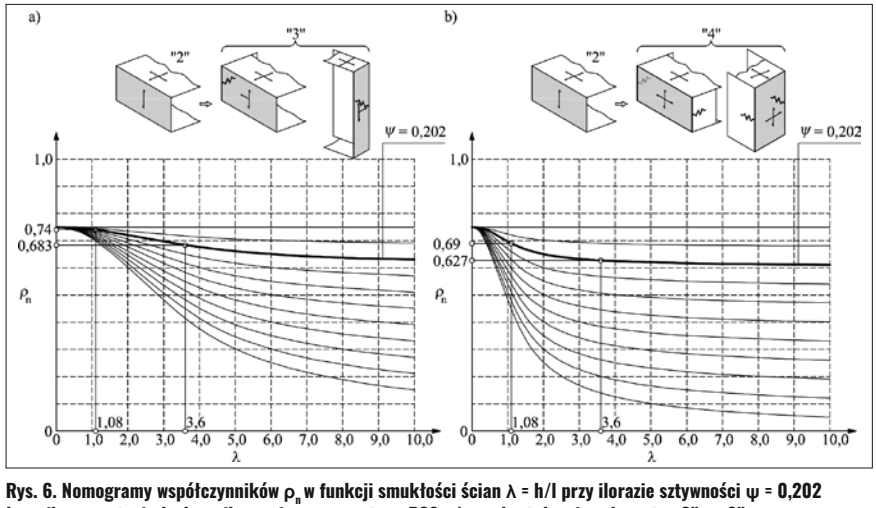


Rys. 5. Nomogramy współczynników ρ_n w funkcji smukłości ścian λ = h/l przy ilorazie sztywności ψ = 0,202 łącznika w postaci płaskownika perforowanego typu P30: a) przekształcenie schematu „1" w „3", b) przekształcenie schematu „1" w „4"

perforowany z poszerzeniem. Przy transformacji schematu „1" lub „2" w „3" spadek wniósł 3–29%. Natomiast przy przekształceniu schematu „1" lub „2" w „4" określona redukcja współczynnika Φ_m sięgnęła 13-27%.

W przypadku siatek z tworzywa sztucznego umieszczanego w spoinach wspornych współczynniki Φ_m w przypadku transformacji schematu „1" lub „2" w „3" obniżyły się o 1–7%, a przy transformacji schematu „1" lub „2" w „4" odpowiednio o 5–18%. Niewielka sztywność połączeń z siatek typu MAP-Reinforcement (SGM) ułożonych przestrzennie spowodowała, że redukcje współczynników Φ_m były znikome.

Stosowanie płaskowników perforowanych typu P30 do poprzecznego usztywniania ścian obciążonych pionowo może korzystnie zredukować wartość współczynnika Φ_m.



Rys. 6. Nomogramy współczynników ρ_n w funkcji smukłości ścian λ = h/l przy ilorazie sztywności ψ = 0,202 łącznika w postaci płaskownika perforowanego typu P30: a) przekształcenie schematu „2" w „3", b) przekształcenie schematu „2" w „4

Rys. autorów

Reasumując, można potwierdzić, że stosowanie płaskowników perforowanych typu P30 do poprzecznego usztywniania ścian obciążonych pionowo może korzystnie zredukować wartość współczynnika Φ_m, a tym samym zwiększyć nośność, w zależności od liczby dodatkowych ścian, o 14% (jedna) i 19% (dwie). Lepsze rezultaty uzyskano, stosując perforowany płaskownik z poszerzeniem – wtedy redukcja współczynnika Φ_m mogła wynosić nawet 29% (jedna dodatkowa ściana) i 27% (dwie dodatkowe ściany). W istniejących konstrukcjach zastosowanie połączeń w postaci siatek z tworzywa sztucznego umieszczanych w spoinach wspornych może ograniczyć wartość współczynnika Φ_m maksymalnie o 18% (dwie dodatkowe ściany) i zaledwie o 7% (jedna ściana). Natomiast **siatki typu MAP-Reinforcement (SGM) w układzie przestrzennym nie spowodowały istotnego zmniejszenia współczynników redukcyjnych nośności**.

PODSUMOWANIE

Zaprezentowano ustalenia Eurokodu 6 w zakresie uwzględniania roli połączeń ścian w procedurze sprawdzania warunków ULS ścian obciążonych głównie pionowo. Zaproponowano uproszczone postępowanie, które pozwala uwzględnić sztywność połączeń ścian. Opracowano nomogramy umożliwiające wyznaczenie skorygowanych wartości współczynników ρ_n. W części aplikacyjnej przedstawiono wyniki własnych badań połączeń ścian wykonanych z ABK z różnymi typami połączeń. Zestawiono rezultaty badań połączeń ścian z tradycyjnym połączeniem murarskim, łącznikami w postaci perforowanych płaskowników stalowych oraz perforowanych płaskowników z poszerzeniem, a także siatek z tworzywa sztucznego i z siatek typu MAP-Reinforcement (SGM).

Wykorzystując zależności normy [22], przeprowadzono symulację obliczeń współczynników ρ_n oraz Φ_m. Wykazano, że po uwzględnieniu współpracy

stalowych łączników typu P30 w ścianach redukcja współczynnika Φ_m może wynosić nawet 19%, a łącznika z perforowanego płaskownika z poszerzeniem – nawet 29%. W przypadku siatek z tworzywa sztucznego umieszczanych w spoinach wspornych maksymalne zmniejszenie współczynnika redukcyjnego wyniosła 18% i może być przydatna we wzmocnieniach konstrukcji.

Zaproponowana metoda nie jest sprzeczna z ogólnymi zaleceniami normy [22]. Może być wykorzystana w przypadku niedoborów nośności ścian obciążonych głównie pionowo i zastosowana z użyciem łączników lub przy prowadzeniu wzmocnień oraz poszukiwaniu rezerw nośności. Pominięcie wpływu obecności łączników zawsze daje konserwatywne rezultaty, zmniejszając wartości współczynników Φ_m. Oznacza to, że właściwe uwzględnienie sztywności połączeń pozwala na bardziej realistyczną ocenę pracy konstrukcji, co w konsekwencji może prowadzić do optymalizacji projektowej. ■

Literatura

[1] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Teoria płyt i powłok*, Warszawa: Wydawnictwo Arkady, 1962.

[2] J. Nalaszkiewicz, *Zagadnienia stateczności sprężystej*, wyd. 2 rozsz., Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1958.

[3] A.W. Hendry, *Structural masonry*, London: MacMillan Education Ltd, 1990.

[4] S. Sahlin, *Structural masonry*, New Jersey: Prentice-Hall, 1971.

[5] L.I. Oniszczyk, *Kamennye konstrukcii*, Strojizdat, 1939.

[6] L.I. Oniszczyk, *Pro?nost? i ustoj?ivost? kamennyh konstrukcij*, Leningrad: ONTI, 1939.

[7] N. Royen, „Knickfestigkeit exzentrisch beanspruchten Säulen aus Baustoff der nur gegen Druck widerstandsfähig ist" w: *Bauingenieur*, 1937, nr 18.

[8] K. Angervo, „Über die Knickung und Tragfähigkeit eines exzentrisch gedrückten Pfeilers ohne Zugfestigkeit", Helsinki: Staatliche Technische Forschungsanstalt, 1954.

[9] J.C. Chapman, J. Slatford, „The elastic buckling of brittle columns" w: *ICE Proceedings*, 1957, t. 6, s. 107–125.

[10] B. Lewicki, *Nośność konstrukcji betonowych w przypadku technicznego obciążenia osiowego*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1960.

[11] W. Kukulski, J. Lugez, „Resistance des mures en beton non arme soumis a des charges verticales" w: *Cahiers du CSTB*, 1966, nr 9 (78).

[12] W. Mann, „Grundlagen der vereinfachten und der genauren Bemessung von Mauerwerk nach DIN 1053-1" w: *Mauerwerk – Kalender*, Berlin: Ernst & Sohn, 2001, s. 259–286.

[13] W. Jäger, „The Conversion of the ENV 1996-1-1 into EN – some comments n the general German point of view" w: *Proceedings of the 35th Meeting of W023 – Wall Structures*, Drezno, 1998, październik, Rotterdam: CIB, 2000, s. 27–44.

[14] P. Haller, „Knickfestigkeit von Mauerwerk aus künstlichen Steinen" w: *Schweizerische Bauzeitung*, 1949, t. 67, nr 38.

[15] W. Jäger i in., „Knicksicherheit von Mauerwerk nach EC 6. Untersuchungen von Mauerwerksbauteilen mit Berücksichtigung großer Exzentrizitäten und nichtlinearer Spannungs-Dehnungs-Beziehung nach ENV 1996-1-1", Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2002.

[16] K. Kirtschig K., „Tragfähigkeit von Mauerwerk bei vertikaler Belastung - Traglastverfahren" w: *Mauerwerk – Kalender*, Berlin: Ernst & Sohn, 1976, s. 28–321.

[17] K. Kirtschig i in., *Aufbereitung eines Traglastverfahrens für den Mauerwerksbau*, Hannover: Institut für Baustoffkunde und Materialprüfwesen der Technischen Universität, 1975, nr 30.

[18] K. Kirtschig, R. Cordes, W. Schöne, „Zur Berechnung der Tragfähigkeit von Mauerwerk mit Hilfe von Spannungs-Dehnungs-Linien" w: *Tagungsband der Internationalen Mauerwerkstagung*, 1973, s. 120–123.

[19] K. Kordina, U. Quast, *Bemessung von Beton- und Stahlbetonbauteilen nach DIN 1045*, wyd. 2, Berlin: Ernst & Sohn, 1979, s. 105–195.

[20] C.A. Graubner, „Traglasten schlanker Mauerwerkswände unter Berücksichtigung wirklichkeitsnaher Werkstoffeigenschaften" w: *Das Mauerwerk*, 2000, nr 2, s. 47–55.

[21] C.A. Graubner, „Buckling of slender masonry walls – a realistic approach regarding nonlinear material behavior" w: *Proceedings of the 12th International Brick/Block Masonry Conference*, Madryt, 2000, s. 777–790.

[22] PN-EN 1996-1-1+A1:2013-05P Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych Część 1-1. Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.

[23] K. Kirtschig, W. Anstötz, „Knickuntersuchung an Mauerwerksproblem" w: *Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference*", Berlin, 13–16 października 1991, Bonn: Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e.V., s. 202–209.

[24] B. Lewicki, R. Jarmontowicz, J. Kubica, *Podstawy projektowania niezbrojonych konstrukcji murowych*, Warszawa: Wydawnictwa Instytutu Techniki Budowlanej, 2001.

[25] P. Matysek, *Analiza czynników wpływających na nośność murów z uwzględnieniem stateczności*, nieopublikowana rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, Kraków 1995.

[26] P. Matysek, S. Seręga, „Interaction between masonry walls and RC slabs – Numerical analysis of stresses and deformation" w: *4th International Conference – Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures*, Kraków 2002.

[27] P. Matysek, „Compressive tests on masonry made of expanded clay aggregate concrete units" w: *13th International Brick and Block Masonry Conference*, Amsterdam 2004.

[28] I. Galman, R. Jasiński, „Połączenia ścian w analizie ścian obciążonych głównie pionowo" w: *Materiały Budowlane*, 2026, nr 5, s. 100–102.

[29] R. Jasiński, I. Galman, „Propozycja analitycznego opisu faz pracy zbrojonego połączenia ścian murowych wykonanych z ABK" w: *Materiały Budowlane*, 2020, nr 6, https://doi.org/10.15199/33.2020.06.02.

[30] R. Jasiński, I. Galman, „Propozycja analitycznego opisu fazy pracy niezbrojonego połączenia ścian murowanych wykonanych z elementów z ABK", w: *Materiały Budowlane*, 2020, nr 5, https://doi.org/10.15199/33.2020.05.07.

[31] R. Jasiński, I. Galman, „Testing joints between walls made of AAC masonry units" w: *Buildings*, 2020, t. 10(4), https://doi.org/10.3390/buildings10040069.

[32] R. Jasiński, I. Galman, „Innovative connection of non-load-bearing walls using a spatially arranged silica glass mesh" w: *Materials*, 2026, t. 19(13), https://doi.org/10.3390/ma19132900.

[33] DIN 1053-1 Mauerwerk. Teil 1: Berechnung und Ausfürung, wyd. z 1974, 1990 i 1996.

CC BY NC SA

I. Galman, R. Jasiński, „Sprawdzenie warunków ULS murowych ścian obciążonych głównie pionowo podpartych podatnie" w: *Inżynier Budownictwa*, 2026, nr 11, s. 30–39, https://doi.org/10.68502/IB.2026.11.27

Artykuł wpłynął: 30.07.2026 r.

Zaakceptowano: 21.09.2026 r.

Opublikowano: 6.11.2026 r.