

Research of incorrect assembly of precast AAC lintels

Badania błędnego montażu prefabrykowanych nadproży z ABK

DOI: 10.15199/33.2025.08.04

Abstract. The article presents the results of experimental tests of reinforced lintels made of autoclaved aerated concrete assembled incorrectly. The subject of the tests were models diversified in terms of the width of the cross-section and the geometry of the reinforcement. Failure loads, loads causing the loss of anchorage of the tensile reinforcement, deflections and cracks were tested. The test results were compared with the results of load-bearing capacity tests of lintels assembled correctly.

Keywords: Autoclaved Aerated Concrete; precast lintels.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych zbrojonych nadproży wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego ułożonych w nieprawidłowy sposób. Przedmiotem badań były modele zróżnicowane pod względem szerokości przekroju poprzecznego oraz geometrii zbrojenia. Badano siły niszczące, siły powodujące utratę zakotwienia zbrojenia rozciąganego, ugięcia oraz zarysowania. Wyniki porównano z wynikami badań nośności nadproży ułożonych w sposób prawidłowy.

Słowa kluczowe: autoklawizowany beton komórkowy; nadproża prefabrykowane.

Failures of roof slabs made of autoclaved aerated concrete (AAC) which happened in the United Kingdom in 2023 caused concerns also in Poland. Precast reinforced lintels are among the most common reinforced autoclaved aerated concrete units used in Poland. A specific arrangement of transverse reinforcement in this type of element is forced by technological aspects of prefabrication and anchorage of longitudinal reinforcement with transverse rebars (shaped as open stirrups) welded with main rebars which control extension of main rebars. Anchorage of longitudinal reinforcement of reinforced autoclaved aerated concrete units was described in research papers published in Polish [1, 2] and international journals [3].

Because of the variety of structures of lintel reinforcement concerning the quantity of longitudinal reinforcement and a method of its anchorage in the compression and tension areas, manufacturers of precast beams use additional symbols and labels to minimise the risk of incorrect assembly of lintels in the masonry wall. However, incorrect assembly of lintels still happens as shown in Photo 1. The question therefore is what consequences for lintel resistance, and therefore the safety of the building structure, can arise from this type of construction error.

This paper presents results from testing bending resistance of the incorrectly assembled lintels. The aim of the described results is to determine the effect of reduced longitudinal reinforcement in the tension zone on lintel resistance. The determined values of ultimate forces were compared with test results for lintels correctly assembled as specified by the manufacturer. The analysis also included load resulting in the loss anchorage of tension reinforcement, bending and crack formation.



Photo 1. Incorrectly assembled lintel [4]

Fot. 1. Nieprawidłowo zamontowane nadproże [4]

Awaryjne płyty dachowych wykonanych ze zbrojonego betonu komórkowego (ABK), do jakich doszło w Wielkiej Brytanii w 2023 r., wywołały zaniepokojenie także w naszym kraju. Jednym z najpopularniejszych elementów ze zbrojonego betonu komórkowego stosowanych w Polsce są zbrojone prefabrykowane nadproża. Specyficzny układ zbrojenia poprzecznego tego typu elementów wymuszony jest względami technologii prefabrykacji oraz zakotwieniem zbrojenia podłużnego przez pręty poprzeczne (kształtowane w formie strzemion otwartych) zgrzewane z prętami głównymi, które przeciwdziałają wysuwowi prętów głównych. Tematyka zakotwienia zbrojenia podłużnego elementów zbrojonych z betonu komórkowego była podejmowana w pracach badawczych krajowych [1, 2] i zagranicznych [3].

Ze względu na zróżnicowanie konstrukcji zbrojenia nadproży pod względem ilości i sposobu zakotwienia zbrojenia podłużnego w strefie ściskanej i rozciąganej producenci prefabrykowanych belek nanoszą dodatkowe oznakowania i etykiety, aby zminimalizować ryzyko niewłaściwego zamontowania nadproży w murze. Mimo tych starań nadal zdarzają się przypadki niewłaściwie zamontowanych nadproży, co przedstawiono na fotografii 1. Nasuwa się więc pytanie, jakie konsekwencje może mieć taki błąd wykonawczy na nośność nadproży, a zarazem bezpieczeństwo konstrukcji budynku.

W artykule przedstawiono wyniki badania nośności na zginanie nadproży ułożonych w sposób nieprawidłowy. Celem prezentowanych badań było określenie wpływu zmniejszenia ilości zbrojenia podłużnego w strefie rozciąganej na nośność nadproży. Uzyskane wartości sił niszczących porównano z wynikami badań nadproży ułożonych w sposób prawidłowy, zgodny z wymaganiami producenta. Analizowano także obciążenia powodujące utratę zakotwienia zbrojenia rozciąganego, ugięcia oraz zarysowania.

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; wojciech.mazur@polsl.pl

Research models, test stand and testing procedure

The experimental tests included four series of beams which differed in geometry, and a structure of longitudinal and transverse reinforcements. Elements of series ND had a cross-section 116×240 mm (nominal dimensions 120×240 mm), and elements of series G and NE had a cross-section 176×240 mm (nominal dimensions 180×240 mm). A length of all elements was 2000 mm. The beam reinforcement was a spatial frame made of one or two bent reinforcement meshes, in which rebars with a diameter of 8 mm formed the longitudinal reinforcement, and U-shaped open stirrups were made of rebars with a diameter of 4.5 mm. Longitudinal spacing of stirrups was constant along the whole length of beams and was equal to 150 mm. Longitudinal reinforcement and stirrups were welded and coated with a protective anti-corrosion layer. Reinforcement in lintels was made of steel in grade St3S-b-500 (class B acc. to EC-2 [5]). Autoclave aerated concrete had a class density of 650 and compressive strength of 4.5 N/mm^2 . Research models from individual series are shown in Fig. 1, and the testing programme is presented in Table 1.

The test and the test stand conformed to the standard requirements [6, 7]. All the models were symmetrically placed on steel supports to provide the support length $\alpha_0 = 250$ mm

in accordance with the manufacturer's requirements (a blue strip on the lintel with a length of 250 mm). The theoretical span $l_0 = 1666$ mm was determined as a distance between two points situated in a $2/3$ length of the support zone. Load was applied through a steel crossbeam in the form of two concentrated forces exerted on the top surface of beams at $1/4$ of the theoretical span. Deflection of lintels was measured with LVDT sensors. Tips of rebars in the longitudinal reinforcement were additionally uncovered at ends of beams, LVDT sensors were applied to these tips. Force was measured with electro-resistant dynamometers with an

Model i stanowisko badawcze oraz procedura badań

Badania doświadczalne obejmowały cztery serie belek zróżnicowanych pod względem geometrii, struktury zbrojenia poprzecznego i podłużnego. Elementy serii ND miały przekrój poprzeczny 116×240 mm (wymiary nominalne 120×240 mm), a elementy serii G i NE 176×240 mm (wymiary nominalne 180×240 mm). Długość wszystkich elementów wynosiła 2000 mm. Zbrojenie belek wykonano jako przestrzenny szkielet składający się z jednej lub dwóch wygiętych siatek zbrojeniowych, w których zbrojenie podłużne stanowiły pręty o średnicy 8 mm, a strzemiona otwarte wygięte w kształt litery „U”, wykonano z prętów o średnicy 4,5 mm. Rozstaw podłużny strzemion był stały na całej długości belek i wynosił 150 mm. Zbrojenie podłużne oraz strzemiona zgrzewano i pokryto antykorozyjną powłoką ochronną. Zbrojenie nadpro-

ży wykonano ze stali gatunku St3S-b-500 (klasy B wg EC-2 [5]). Zastosowano beton komórkowy o klasie gęstości 650 i wytrzymałości na ściskanie $4,5 \text{ N/mm}^2$. Modele badawcze poszczególnych serii przedstawiono na rysunku 1, a program badań w tabeli 1.

Badanie oraz stanowisko badawcze zostały wykonane zgodnie z wymaganiami normy [6, 7]. Wszystkie modele podparto symetrycznie na stalowych podporach w taki sposób, aby długość oparcia $\alpha_0 = 250$ mm była zgodna z zalece-

niami producenta (niebieski pasek na nadprożu długości 250 mm). Rozpiętość teoretyczną $l_0 = 1666$ mm wyznaczono jako odległość pomiędzy dwoma punktami zlokalizowanymi w $2/3$ długości strefy oparcia. Obciążenie przykładano przez stalowy trawers w postaci dwóch sił skupionych, przyłożonych do górnej powierzchni belek w $1/4$ rozpiętości teoretycznej. Ugięcie nadproży mierzono czujnikami przemieszczeń LVDT. Dodatkowo na końcach belek odkryto zakończenia prętów zbrojenia podłużnego, do których także przyłożono czujniki przemieszczeń LVDT. Do pomiaru wielkości si-

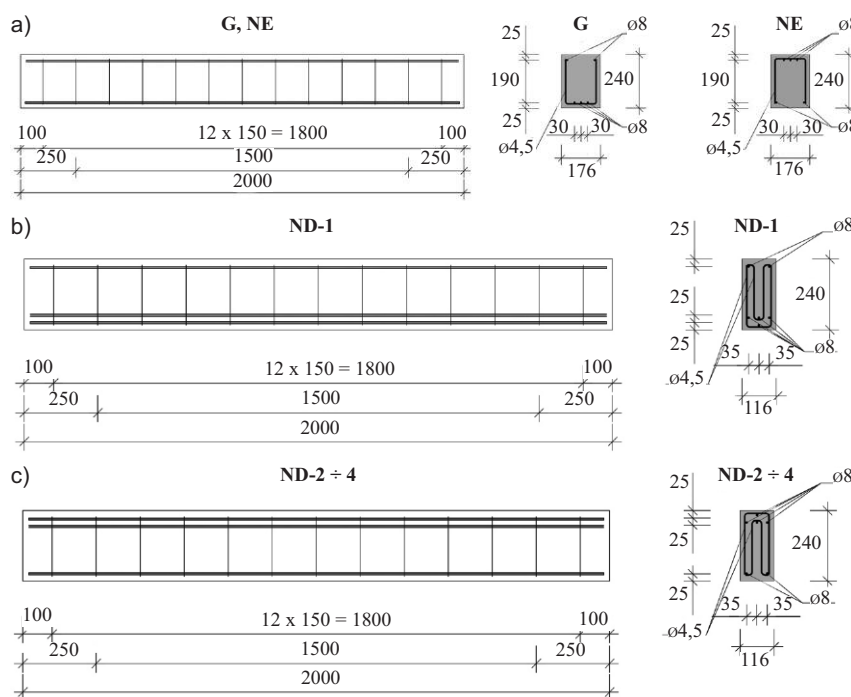


Fig. 1. The test models of series: a) G and NE; b) ND-1; c) ND-2÷4
Rys. 1. Modele badawcze serii: a) G oraz NE; b) ND-1; c) ND-2÷4

Table 1. The research tests program

Tabela 1. Program badań

Test elements/ Badane elementy		Number of models [pcs.]/ Liczba mo- deli [szt.]	Assembly/ Sposób uło- żenia belek
G	1	3	correct/ prawidłowy
	3		
NE	1	3	incorrect/ nieprawidłowy
	3		
ND	1	1	correct/ prawidłowy
	2		
ND	3	3	incorrect/ nieprawidłowy
	4		

operating range of 50 kN. A scheme of the test stand scheme and its view with the research model are shown in Figure 2 and Photo 2. The beams were subjected to monotonic loading until their failure. Force was measured and recorded with a dynamometer, and displacements were measured with LVDT sensors during the tests using the automated stand for measurements (ASM). Additionally, one side of the beams was coated with a pattern for the non-contact recording of deformations and cracks using the ARAMIS system based on Digital Image Correlation (DIC).

First cracks in lintels of the series G in the correct assembly caused by bending were curved. Then, diagonal cracks appeared running from the support to the point of load application. The ultimate force for the lintel G1 and G3 was 32.775 and 28.362 kN respectively, and the corresponding deflection was 5.252 and 4.740 mm. The ultimate force for the model G2 and the corresponding deflection were 39.048 kN and 5.434 mm, respectively. First displacements of rebar ends with reference to the beam end were recorded when the models G1 ÷ G3 were loaded with force 21.578, 23.895, and 20.048 kN respectively. The model G3 after tests is shown in Figure 3.

First cracks in the models of the series NE (the incorrect assembly) were observed in the central zone of the elements between points of load application. Cracks were vertical and slightly curved. At the moment of failure cracks propagated towards the top reinforcement. Some cracks disappeared when the force was not exerted. The element NE-1 was destroyed at the force of 36.070 kN and the deflection of 4.983 mm. The loss of anchorage of the longitudinal reinforcement began at the

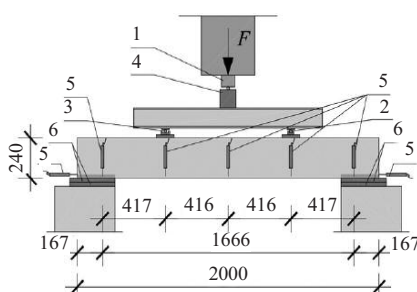


Fig. 2. The scheme of test stand, where: 1 – hydraulic jack; 2, 3 – bearing; 4 – force gauge; 5 – LVDT transducer; 6 – steel sheet
Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego, gdzie: 1 – siłownik hydrauliczny; 2, 3 – łożysko; 4 – siłomierz; 5 – indukcyjny czujnik przemieszczeń; 6 – stalowe blachy

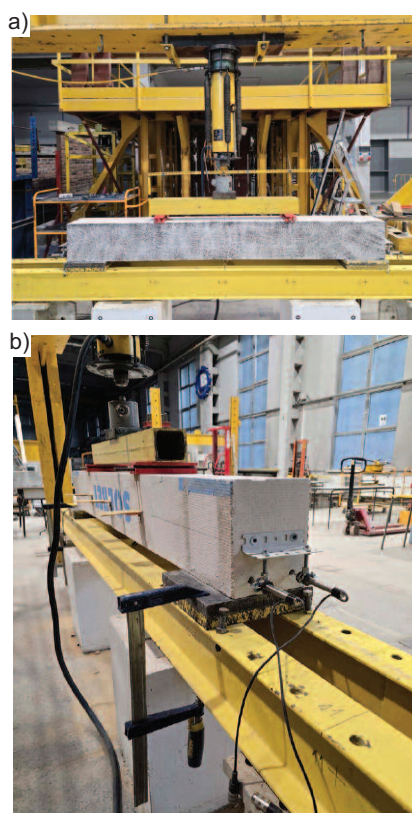


Photo 2. Test stand: a) front view; b) side view

Fot. 2. Stanowisko badawcze: a) widok z przodu; b) widok z boku

ły zastosowano siłomierze elektrooporowe o zakresie 50 kN. Schemat stanowiska oraz jego widok wraz z modelem badawczym przedstawiono na rysunku 2 oraz fotografii 2. Belki obciążano monotonicznie aż do zniszczenia. Pomiaru oraz rejestracji siły z siłomierza, a także przemieszczeń z czujników indukcyjnych LVDT dokonywano w trakcie badań za pomocą automatycznego stanowiska pomiarowego (ASP). Dodatkowo z jednej strony belek naniesiono wzór pozwalający na bezdotykową rejestrację odkształceń i zarysowań za pomocą systemu ARAMIS bazującego na cyfrowej korelacji obrazu (CKO).

W nadprożach serii G badanych w prawidłowym ułożeniu pierwsze powstałe rysy od zginania miały zakrzywiony kształt. Jako kolejne pojawiły się ukośne zarysowania biegnące od podpory do punktu przyłożenia obciążenia. W nadprożu G1 i G3 uzyskano siłę niszczącą na poziomie 32,775 i 28,362 kN oraz odpowiadające im ugięcia 5,252 oraz 4,740 mm. W przypadku modelu G2 siła niszcząca i odpowiadające jej ugięcie wyniosły odpowiednio 39,048 kN i 5,434 mm. Pierwsze przemieszczenia końców prętów względem końca belki zarejestrowano przy obciążeniu modeli G1 ÷ G3 odpowiednio 21,578, 23,895 i 20,048 kN. Widok modeli G2 oraz G3 po badaniu przedstawiono na rysunku 3.

W modelach serii NE (ułożonych nieprawidłowo) pierwsze zarysowania zaobserwowano w środkowej strefie elementów pomiędzy punktami przyłożenia obciążenia. Rysy miały pionowy, nieznacznie zakrzywiony, przebieg. W chwili zniszczenia propagowały one do poziomu górnego zbrojenia. Po odciążeniu część rys ulegała zamknięciu. Element NE-1 uległ zniszczeniu przy obciążeniu 36,070 kN i ugięciu 4,983 mm. Początek utraty zakotwienia zbrojenia po-

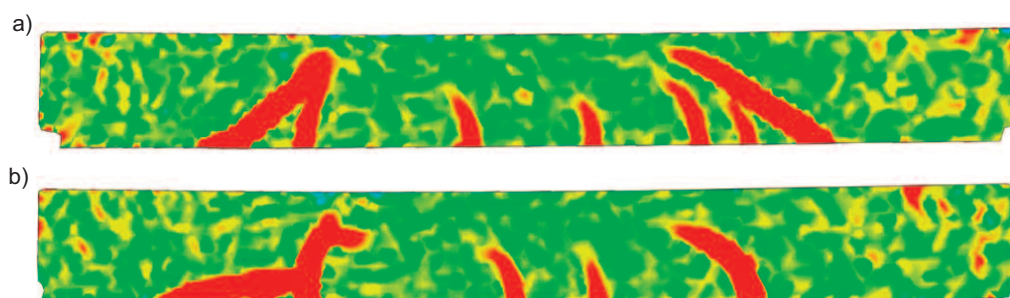


Fig. 3. Front view of model with cracks obtained from the Aramis system: a) G2; b) G3
Rys. 3. Widok z przodu zarysowania modelu uzyskany z systemu Aramis: a) G2; b) G3

force of ca. 25.389 kN and the deflection of 2.160 mm. Ultimate force for two other models NE-2 and NE-3 was 40.240 and 39,210 kN respectively and the corresponding deflection was 7.599 and 7.269 mm. Rebar extension for the beam NE-2 was observed under the load 18.786 kN and the deflection 2.866 mm, and for the beam NE-3 under the load 17.931 kN and the deflection 2.526 mm. After completing the test, the test cut in tension reinforcement was performed at a junction with stirrups. The joint was damaged and longitudinal reinforcement and stirrups were detached. The model NE-3 after tests is shown in Figure 4.

dłużnego nastąpił przy obciążeniu 25,389 kN i ugięciu 2,160 mm. Kolejne dwa modele osiągnęły siłę niszczącą na poziomie 40,240 i 39,210 kN oraz ugięcia 7,599 i 7,269 mm odpowiednio w przypadku modelu NE-2 i NE-3. Wysuw prętów nastąpił przy obciążeniu i ugięciu belki wynoszącym odpowiednio 18,786 kN i 2,866 mm w przypadku belki NE-2 oraz 17,931 kN i 2,526 mm w przypadku belki NE-3. Po badaniu dokonano odkrywki zbrojenia rozciąganego w miejscu połączenia ze strzemionami. Zaobserwowano uszkodzenie połączenia i odspojenie zbrojenia podłużnego i strzemion. Widok modelu NE-3 po badaniu przedstawiono na rysunku 4.

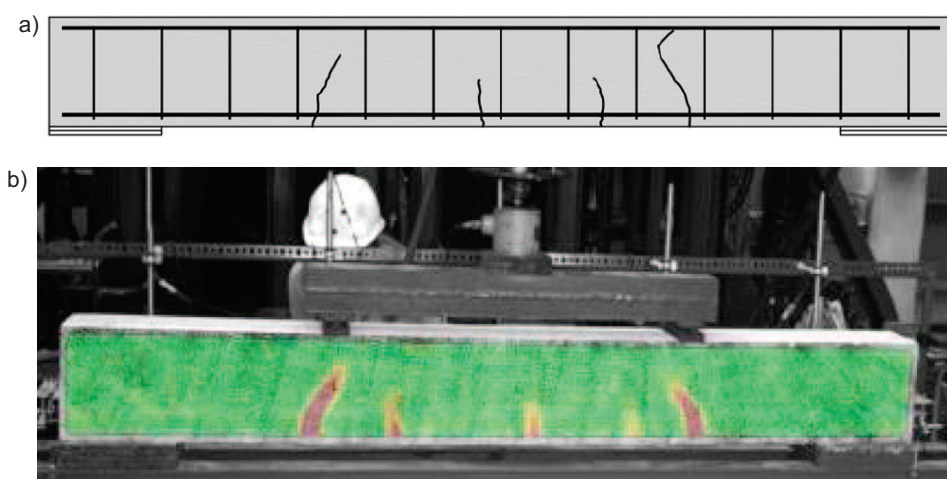


Fig. 4. Cracks of the NE-3 model: a) rear view; b) front view obtained from the Aramis system
Rys. 4. Rysy modelu NE-3: a) widok z tyłu; b) widok z przodu uzyskany z systemu Aramis

Beam ND1 correctly assembled in the models with a width of 120 mm was destroyed at the force 51.12 kN and the deflection 4.771 mm. Extension of the bottom rebar was 0.959 mm. The damaged specimen had diagonal cracks characteristic for shear destruction. The cracking force was 33.358 kN, and the deflection was 3.036 mm. The loss of longitudinal anchorage was observed at the force of 14.753 kN and the deflection of 1.446 mm.

In the models of the series ND with incorrectly assembled beams, first cracks were observed at the bottom edge of elements when the force was exerted, and other cracks were found in the central part of the beam. The element ND-2 was destroyed at the force of 45.115 kN and the deflection of 7.404 mm. The extension of longitudinal anchorage was observed at the force of 11.757 kN and the deflection of 0.641 mm. Ultimate force for two other models ND-3 and ND-4 was achieved at the level of 38.987 and 39,770 kN respectively and the corresponding deflection was 4.385 and 3.232 mm. The loss of anchorage of the longitudinal reinforcement for the beam ND-3 was observed under the load 13.039 kN and the deflection 1.182 mm, and for the beam ND-4 under the load 10.154 kN and the deflection 0.704 mm. After completing the test, the test cut in tension reinforcement was performed at a junction with vertical reinforcement. The joint was damaged, and longitudinal and transverse reinforcements were detached. Damaged elements are shown in Fig. 5 (the model ND-1) and in Fig. 6 (the model ND-4).

W badaniach modeli o szerokości 120 mm belka ułożona prawidłowo i oznaczona jako ND1 uległa zniszczeniu przy sile wynoszącej 51,12 kN i ugięciu 4,771 mm. Wysuw pręta dolnego wyniósł 0,959 mm. W zniszczonej próbce stwierdzono rysy ukośne charakterystyczne w przypadku zniszczenia przez ścinanie. Obciążenie rysujące wyniosło 33,358 kN, a ugięcie 3,036 mm. Utrata zakotwienia zbrojenia podłużnego nastąpiła przy obciążeniu 14,753 kN i ugięciu 1,446 mm.

W modelach serii ND, ułożonych nieprawidłowo, pierwsze zarysowania zaobserwowano na dolnej krawędzi elementów w miejscach przyłożenia obciążenia, a kolejne rysy w środkowej części belki. Element ND-2 uległ zniszczeniu przy obciążeniu 45,115 kN i ugięciu 7,404 mm. Początek wysuwu zbrojenia podłużnego nastąpił przy obciążeniu 11,757 kN i ugięciu 0,641 mm. Kolejne dwa modele osiągnęły siłę niszczącą na poziomie 38,987 i 39,770 kN oraz ugięcie wynoszące 4,385 mm i 3,232 mm odpowiednio w przypadku modeli ND-3 i ND-4. Utrata nośności zakotwienia podłużnego nastąpiła przy obciążeniu i ugięciu belek wynoszącym odpowiednio 13,039 kN i 1,182 mm w przypadku belki ND-3 oraz 10,154 kN i 0,704 mm w przypadku belki ND-4. Po badaniu dokonano odkrywki zbrojenia rozciąganego w miejscu połączenia ze zbrojeniem pionowym. Zaobserwowano uszkodzenie połączenia oraz odspojenie zbrojenia podłużnego i poprzecznego. Widok zniszczonych elementów pokazano na rysunku 5 (model ND-1) oraz na rysunku 6 (model ND-4).



Fig. 5. Cracks of the ND-1 model: a) rear view; b) front view obtained from the Aramis system

Rys. 5. Rysy modelu ND-1: a) widok z tyłu; b) widok z przodu uzyskany z systemu Aramis

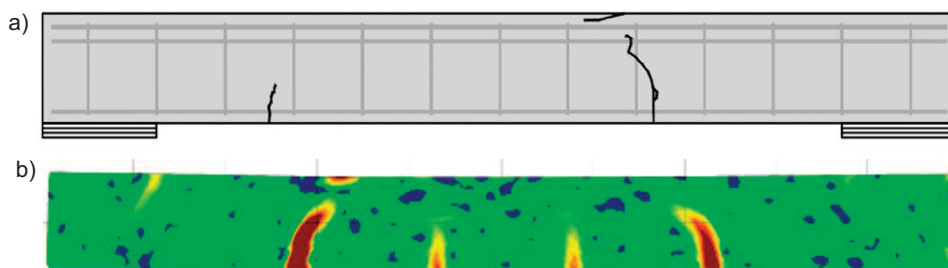


Fig. 6. Cracks of the ND-4 model: a) rear view; b) front view obtained from the Aramis system

Rys. 6. Rysy modelu ND-4: a) widok z tyłu; b) widok z przodu uzyskany z systemu Aramis

The test results for lintels representing the cracking and ultimate forces with respect to their deflection are presented in Table 2. The test results for extension of ends of the longitudinal reinforcement with respect to the beam end are presented in Table 3. The relationships load-deflection and load-extension of longitudinal reinforcement in lintels for all test series are illustrated in Figure 7.

W tabeli 2 podano wyniki badania nadproży, przedstawiając siłę rysującą oraz niszczącą w odniesieniu do ich ugięcia, a w tabeli 3 wyniki badania nadproży w odniesieniu do wysuwu końców zbrojenia podłużnego względem końca belki. Zależność obciążenie – ugięcie oraz obciążenie – wysuw zbrojenia podłużnego nadproży wszystkich serii badawczych przedstawiono na rysunku 7.

Analysis of test results

For lintels with the nominal width of 120 mm, the ultimate force was greater than in case of lintels with the nominal width of 180 mm. The ultimate force F_u for the element ND-1 was greater by 53.1 and 32.8% than for lintels with a width of 180 mm from the series G and NE respectively. Values of the force

Analiza wyników

Nadproża o szerokości nominalnej 120 mm uzyskały większe obciążenie niszczące w porównaniu z nadprożami o szerokości nominalnej 180 mm. Element ND-1 uzyskał siłę niszczącą F_u większą o 53,1 i 32,8% niż nadproża o szerokości 180 mm odpowiednio serii G i NE. W przypadku obciąże-

Table 2. The results of research of lintels: cracking and failure load and deflection at cracking and failure load

Tabela 2. Wyniki badania nadproży: siła rysująca i niszcząca oraz ugięcie przy zarysowaniu i zniszczeniu

Test element/ Element badany		Deflection at cracking f_{cr} [mm]/ Ugięcie przy zarysowaniu f_{cr} [mm]		Cracking force F_{cr} [kN/m]/ Siła rysująca F_{cr} [kN/m]		Deflection at failure f_u [mm]/ Ugięcie przy zniszczeniu f_u [mm]		Ultimate force F_u [kN]/ Siła niszcząca F_u [kN/m]		Przyczyna zniszczenia
series/ seria	model	element	average value/ wartość średnia	element	average value/ wartość średnia	element	average value/ wartość średnia	element	average value/ wartość średnia	
G	1	1,359		12,104		5,252		32,775		achieved shearing resistance/osiągnięcie nośności na ściananie
	2	1,570	1,434	13,997	13,076	5,434	5,142	39,048	33,395	
	3	1,374		13,127		4,74		28,362		
NE	1	1,166		19,717		4,983		36,070		achieved bending resistance/osiągnięcie nośności na zginanie
	2	2,422	1,676	18,670	16,514	7,599	6,617	40,240	38,507	
	3	1,440		11,156		7,269		39,21		
ND	1	1,175	1,175	12,560	12,560	4,771	4,771	51,118	51,118	achieved shearing re- sistance/osiągnięcie nośności na ściananie
	2	1,168		15,695		7,404		45,115		achieved bending resistance/osiągnięcie nośności na zginanie
ND	3	1,495	1,221	15,634	15,143	4,385	5,037	38,987	41,291	
	4	1,001		14,101		3,323		39,770		

Table 3. The results of research of lintels: movement of bars at failure load, deflection and load at the moment of loss of the anchorage capacity
Tabela 3. Wyniki badań nadproży: wysuw zbrojenia przy sile niszczącej, ugięcie i obciążenie belki w chwili utraty nośności zakotwienia

Test element/ Element badany		Extension of reinforcement f_u at ultimate failure F_u [mm]/Wysuw zbrojenia f_u przy sile niszczącej F_u [mm]		Loss of anchorage capacity/Utrata nośności zakotwienia		Load for beam [kN]/obciążenie belki [kN]	
series/seria	model	element	average value/wartość średnia	element	average value/wartość średnia	element	average value/wartość średnia
G	1	0,758	0,397	3,055	2,911	21,578	21,840
	2	0,121		3,016		23,895	
	3	0,312		2,662		20,048	
NE	1	0,999	1,027	2,16	2,517	25,389	20,702
	2	0,908		2,866		18,786	
	3	1,173		2,526		17,932	
ND	1	0,585	0,585	1,446	1,446	14,753	14,753
	2	1,063	1,109	0,641	0,842	11,757	11,650
ND	3	1,058		1,182		13,039	
	4	1,207		0,704		10,154	

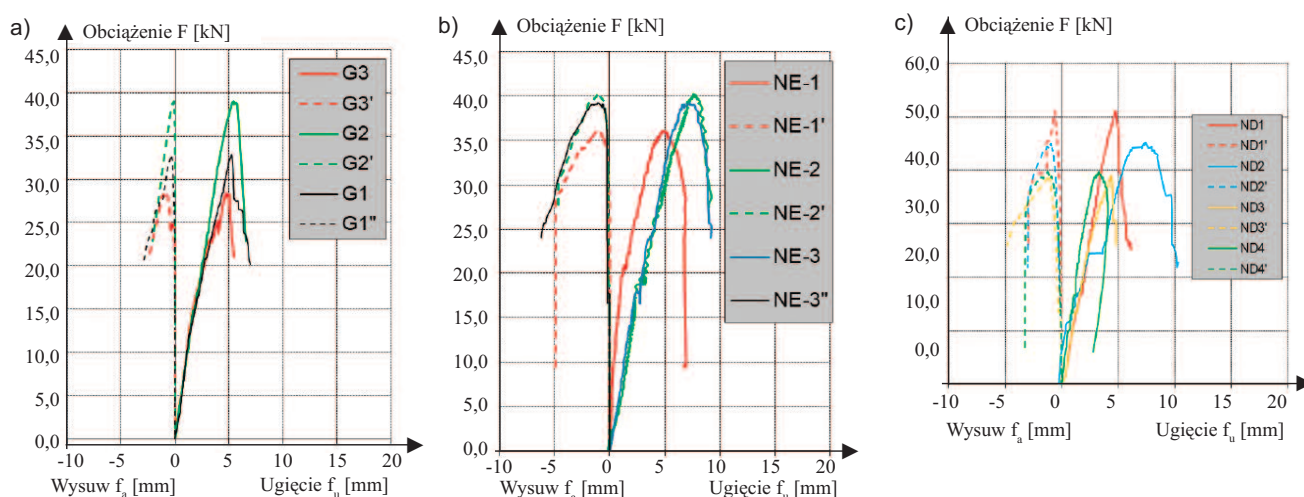


Fig. 7. Relationships of the load-deflection and load-extension of the reinforcement of the lintels of the series: a) G; b) NE; c) ND

Rys. 7. Zależność obciążenie – ugięcie oraz obciążenie – wysuw zbrojenia nadproży serii: a) G; b) NE; c) ND

F_{cr} were similar in case of cracking load. The inverse situation was observed for the load resulting in the loss of anchorage of the longitudinal reinforcement, where extension of longitudinal reinforcement under smaller load was found in the beam with a width of 120 mm and four-legged stirrups. Extension of the reinforcement in the element ND-1 occurred at the force of 14.753 kN, which contributed to 28.9% of the total load. For the series ND-2÷4, the average load at a loss of anchorage was equal to 11.650 kN, which contributed to 28.2% of the total load. The initial phase of extension of longitudinal reinforcement in the beam models with a width of 180 mm was observed under the load of 21.840 kN (the series G) and 20.702 kN (the series NE), which contributed to respectively 64.5% and 53.8% of the ultimate force. The inverse assembly of elements of the series NE had a positive impact by increasing the ultimate force by 15.3% despite the reduced quantity of tension reinforcement by 33.3% when compared to elements of the series G in the correct assembly, and also the changed method of anchorage. In the models of the series ND-2 ÷ 4 (tested in the inverse assembly), reduction of the longitudinal reinforcement by 50% when compared to the element ND-1

nia rysującego uzyskane siły F_{cr} były na zbliżonym poziomie. Odwrotne zjawisko zaobserwowano w przypadku obciążenia powodującego utratę zakotwienia zbrojenia podłużnego, gdzie w belkach o szerokości 120 mm i strzemionach czteroczętých dochodziło do wysuwu zbrojenia podłużnego przy mniejszym obciążeniu. W elemencie ND-1 wysuw zbrojenia następował przy obciążeniu 14,753 kN, stanowiącym 28,9% całkowitego obciążenia, a w serii ND-2÷4 średnie obciążenie w chwili utraty zakotwienia było na poziomie 11,650 kN, stanowiącym 28,2% całkowitego obciążenia. W modelach belek o szerokości nominalnej 180 mm początkowa faza wysuwu zbrojenia podłużnego nastąpiła przy obciążeniu 21,840 kN (seria G) oraz 20,702 kN (seria NE), co stanowiło odpowiednio 64,5% i 53,8% obciążenia niszczącego. Odwrotne ułożenie elementów serii NE wpłynęło pozytywnie na zwiększenie obciążenia niszczącego o 15,3% pomimo zmniejszenia ilości zbrojenia rozciąganego o 33,3% w porównaniu z prawidłowo ułożonymi elementami serii G, a co za tym idzie do zmiany sposobu zakotwienia. W modelach serii ND-2 ÷ 4 (badanych w odwrotnym ułożeniu), redukcja zbrojenia podłużnego o 50% w porównaniu z elementem ND-1 (badanym w prawi-

(correctly assembled) caused a drop in the ultimate force slightly by 19%.

In the analysis of results, the ultimate force F_u in all tested models was converted into the corresponding bending moment M_u , and also the tensile force in the longitudinal reinforcement, which were then compared with the results obtained from calculating bending resistance M_{Rk} , shear resistance and anchorage capacity of transverse rebars F_{RA} . Anchorage capacity of longitudinal rebars was determined in accordance with point A.10.3 of the standard [8]. The results and summarized analyses are presented in Table 4. The results from material tests on autoclaved aerated concrete and reinforcing steel [9] were used to determine analytically bending resistance, shear resistance, and anchorage capacity of longitudinal reinforcement in accordance with the standard [8]. Tension reinforcement in the models of the series G (correctly assembled) was composed of three rebars with a diameter of 8.0 mm, and two rebars formed the compressed reinforcement. Bending resistance M_u was 6.963 kNm, which contributed to 42.5% of the design resistance ($M_{Rk} = 16.383$ kNm), and shear resistance $V_u = 16.698$ kN contributed to 114.1% of the design resistance $V_{Rk3} = 14.637$ kN. Anchorage resistance of the longitudinal reinforcement was obtained by anchorage resistance of transverse rebars F_{Ik} was 35.707 kN and was greater by 162% when compared to analytically determined resistance ($F_{RA} = 13.635$ kN).

Table 4. Comparison of research results and analytical calculations

Tabela 4. Porównanie wyników badań doświadczalnych i obliczeń analitycznych

Testing series/ Seria badawcza	Results from experimental tests/Wyniki badań doświadczalnych			Theoretical values determined from analytical calculations/Wartości teoretyczne uzyskane na podstawie obliczeń analitycznych			Comparison of experimental results and theoretical values/ Porównanie wyników badań doświadczalnych i wartości teoretycznych		
	shearing force V_u [kN]/siła ścinająca V_u [kN]	bending moment M_u [kNm]/moment zginający M_u [kNm]	force acting on longitudinal reinforcement/siła w zbrojeniu podłużnym F_{Ik} [kN]	bending resistance M_{Rk} [kNm]/nośność na zginanie M_{Rk} [kNm]	shearing resistance V_{Rk3} [kN]/nośność na ścinanie V_{Rk3} [kN]	anchorage capacity F_{RA} [kN]/nośność zakotwienia F_{RA} [kN]	V_u/V_{Rk3}	M_u/M_{Rk}	F_{Ik}/F_{RA}
G	16,698	6,963	35,707	16,383	14,637	13,635	1,141	0,425	2,619
NE	19,254	8,029	41,173	10,806	14,637	7,434	1,315	0,743	5,538
ND-1	25,559	10,658	54,657	15,834	18,169	33,878	1,407	0,673	1,613
ND-2÷4	20,646	8,609	44,150	9,546	15,743	14,875	1,311	0,902	2,968

In case of the lintels from the series NE, tested as inverse with regard to the elements of the series G, tension reinforcement was composed of two rebars, and compressed reinforcement contained three rebars with a diameter of 8 mm. Bending resistance M_u was 8.029 kNm, which contributed to 74.3% of the design resistance ($M_{Rk} = 10.806$ kNm), and shear resistance $V_u = 19.254$ kN contributed to 131.5% of the design resistance $V_{Rk3} = 14.637$ kN. The maximum resistance F_{Ik} determined from the tests was 41.173 kN and was greater by 454% than design resistance ($F_{RA} = 7.434$ kN).

Considering beams with a nominal width of 120 mm, the beam ND-1 with tension reinforcement containing four rebars and compressed reinforcement containing two rebars with a diameter of 8.0 mm. Bending resistance M_u was 10.658 kNm, which contributed to 67.3% of the design resistance ($M_{Rk} = 15.834$ kNm), and shear resistance $V_u = 25.559$ kN contributed to 161.3% of the design resistance ($V_{Rk3} = 18.169$ kN). The determined anchorage resistance F_{Ik} was 54.657 kN

dłowym ułożeniu) spowodowała spadek obciążenia niszczącego zaledwie o 19%.

W analizie wyników obciążenie niszczące F_u wszystkich badanych modeli przekształcono na odpowiadający mu moment zginający M_u , a także siłę rozciągającą w zbrojeniu podłużnym, które następnie porównano z wynikami uzyskanymi na podstawie obliczenia nośności na zginanie M_{Rk} , nośności na ścinanie i nośności zakotwienia poprzecznych prętów kotwiących F_{RA} . Nośność zakotwienia podłużnych prętów zbrojenia wyznaczono wg pkt A.10.3 normy [8]. Wyniki oraz podsumowanie analiz przedstawiono w tabeli 4. Na podstawie wyników badań materiałowych betonu komórkowego oraz stali zbrojeniowej [9] wykonano obliczenia analityczne nośności na zginanie, ścinanie oraz nośności zakotwienia zbrojenia podłużnego zgodnie z normą [8]. W modelach serii G (badanych w prawidłowym ułożeniu) zbrojenie rozciągane stanowiły 3 pręty o średnicy 8,0 mm, a zbrojenie ściskane 2 pręty. Nośność na zginanie M_u wyniosła 6,963 kNm, co stanowiło 42,5% nośności uzyskanej z obliczeń ($M_{Rk} = 16,383$ kNm), a nośność na ścinanie $V_u = 16,698$ kN i stanowiła 114,1% nośności obliczeniowej $V_{Rk3} = 14,637$ kN. Nośność zakotwienia zbrojenia podłużnego realizowana przez nośność zakotwienia poprzecznych prętów kotwiących F_{Ik} wyniosła 35,707 kN i była większa o 162% w porównaniu z nośnością określoną w sposób analityczny ($F_{RA} = 13,635$ kN).

W przypadku nadproży serii NE, badanych jako odwrócone w stosunku do elementów serii G, zbrojenie rozciągane stanowiły 2 pręty, a zbrojenie ściskane 3 pręty o średnicy 8 mm. Nośność na zginanie M_u wyniosła 8,029 kNm, co stanowiło 74,3% nośności uzyskanej z obliczeń ($M_{Rk} = 10,806$ kNm), a nośność na ścinanie $V_u = 19,254$ kN, tj. 131,5% nośności uzyskanej z obliczeń ($V_{Rk3} = 14,637$ kN). Nośność zakotwienia F_{Ik} uzyskana w badaniach wyniosła 41,173 kN i była o 454% większa od nośności uzyskanej z obliczeń ($F_{RA} = 7,434$ kN).

W przypadku belek o szerokości nominalnej 120 mm, belka ND-1, w której zbrojenie rozciągane stanowiły 4 pręty, a zbrojenie ściskane 2 pręty o średnicy 8,0 mm, uzyskała większą siłę niszczącą w porównaniu z elementami badanymi jako odwrócone. Nośność na zginanie M_u wyniosła 10,658 kNm, co stanowiło 67,3% nośności uzyskanej z obliczeń ($M_{Rk} = 15,834$ kNm), a nośność na ścinanie $V_u = 25,559$ kN, co stanowiło 161,3% nośności uzyskanej z obliczeń ($V_{Rk3} = 18,169$ kN). Nośność zakotwienia F_{Ik} uzyskana w badaniach wyniosła

and was greater by 61.3% than the design resistance ($F_{RA} = 33.878$ kN). For the beams of the series ND-2 ÷ 4 with expected resistance to be the lowest, the determined bending moment was $M_u = 8.609$ kNm and contributed to 90.2% of the design value ($M_{Rk} = 9.546$ kNm). Shearing force had a value $V_u = 20.646$ kN which contributed to 131.1% of design resistance $V_{Rk3} = 15.743$ kN. The maximum axial force in the tension reinforcement F_{lk} was 44.150 kN and was greater by 197% than the design resistance ($F_{RA} = 14.875$ kN).

Summary and conclusions

The analysis of test results for two types of beams made of reinforced autoclaved aerated concrete, which differed in cross-section and reinforcement geometry, tested in the correct and incorrect (inverse) assembly did not unequivocally indicate whether resistance of lintels in the incorrect assembly was lower than that of lintels in the correct assembly. For the elements with a width of 180 mm in the incorrect assembly (the series NE), ultimate force was greater by 15.3% than in case of the elements in the correct assembly (the series G) despite the number of rebars in the tension reinforcement was reduced by 33.3%.

For the lintels with a width of 120 mm with elements in the incorrect assembly (the series ND-2-4), the ultimate force was smaller by 19.3% than in case of the element ND-1 in the correct assembly and longitudinal reinforcement reduced by 50%. Regardless of the number of rebars in the longitudinal reinforcement, lintel resistance in the tension zone was determined by the anchorage method of the compressed longitudinal reinforcement.

The authors would like to express particular thanks to Solbet Sp. z o.o. company for its cooperation with Department of Building Structures, factual and financial support during tests on brickwork structures.

Received: 11.02.2025

Revised: 08.04.2025

Published: 21.08.2025

54,657 kN i była o 61,3% większa od nośności uzyskanej z obliczeń ($F_{RA} = 33,878$ kN). W przypadku belek serii ND-2 ÷ 4 o teoretycznie najmniejszej spodziewanej nośności, uzyskany w badaniach moment zginający $M_u = 8,609$ kNm stanowił 90,2% nośności uzyskanej z obliczeń ($M_{Rk} = 9,546$ kNm). Siła ścinająca miała wartość $V_u = 20,646$ kN i stanowiła 131,1% nośności obliczeniowej $V_{Rk3} = 15,743$ kN. Maksymalna wartość siły osiowej w zbrojeniu rozciągającym F_{lk} wyniosła 44,150 kN i była o 197% większa od nośności uzyskanej z obliczeń ($F_{RA} = 14,875$ kN).

Podsumowanie i wnioski

Analizując wyniki badań dwóch typów belek ze zbrojonego autoklawizowanego betonu komórkowego, różniących się szerokością przekroju poprzecznego oraz geometrią zbrojenia, badanych w prawidłowym oraz nieprawidłowym (odwrotnym) ułożeniu, nie można jednoznacznie stwierdzić, że nośność nadproży ułożonych w sposób nieprawidłowy będzie mniejsza niż nośność nadproży ułożonych prawidłowo. W elementach o szerokości 180 mm belki ułożone nieprawidłowo (seria NE) uzyskały obciążenie niszczące większe o 15,3% w porównaniu z elementami ułożonymi prawidłowo (seria G) pomimo zmniejszenia liczby prętów zbrojenia rozciąganego o 33,3%.

W przypadku nadproży o szerokości 120 mm elementy badane w ułożeniu nieprawidłowym (elementy serii ND-2-4) uzyskały obciążenie niszczące mniejsze o 19,3% niż element ND-1 badany w prawidłowym ułożeniu przy redukcji zbrojenia podłużnego o 50%. Niezależnie od liczby prętów zbrojenia podłużnego, w strefie rozciąganej o nośności nadproży decydował sposób zakotwienia rozciąganego zbrojenia podłużnego.

Autorzy badań wyrażają szczególne podziękowania firmie Solbet Sp. z o.o. za podjęcie współpracy z Katedrą Konstrukcji Budowlanych oraz merytoryczną i materialną pomoc przy realizacji badań konstrukcji murowych.

Artykuł wpłynął do redakcji: 11.02.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 08.04.2025 r.

Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

- [1] Arendarski J. Zakotwienie zbrojenia w elementach zginanych z betonu komórkowego, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1965.
- [2] Arendarski J. Zakotwienie zbrojenia w betonie komórkowym, Inżynieria i Budownictwo. 1965; nr 8-9.
- [3] Kuene K, Boutros M. Details of reinforcement of autoclaved aerated concrete lintels for shear and anchorage. Material and Structure. 1998; t. 31, s. 536-542.
- [4] Undas P. Analiza nośności na zginanie prefabrykowanych nadproży z ABK, praca magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2024.
- [5] PN-EN 1992-1-1:2008/NA:2010 Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

- [6] PN-EN 846-9:2002 Metody badań wyrobów dodatkowych do wznoszenia murów. Część 9: Określenia nośności na zginanie i ścinanie belek nadprożowych.

- [7] PN-EN 1356:1999 Badanie właściwości użytkowych elementów zbrojonych z autoklawizowanego betonu komórkowego lub betonu lekkiego kruszywowego o otwartej strukturze przy zginaniu.

- [9] Drobiec Ł, Jasiński R, Mazur W. Safety of reinforced AAC structures. Cement Wapno Beton, t. 29, nr 2, 24. [Online]. DOI: <https://doi.org/10.32047/CWB.2024.29.2.3>.

- [8] PN-EN 12602+A1:2013-11 Prefabrykowane elementy zbrojone z autoklawizowanego betonu komórkowego.