

mgr inż. Wojciech Rogala^{1*)}
 ORCID: 0000-0001-7798-1191
 mgr Robert Turski²⁾

Prospects for the development of modular panels made of autoclaved aerated concrete in Poland

Perspektywy rozwoju modułowych elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego w Polsce

DOI: 10.15199/33.2024.09.14

Abstract. In 2023, the production of AAC modular wall panels began in Poland. The panels have the advantages of aerated concrete, but the installation time is significantly shorter, which may translate into a significant increase in the popularity of the technology in Poland. The paper discusses the fields of application, the technology of assembly, compares the labor intensity in relation to walls made of other materials, and discusses microeconomic factors that may affect the available technologies on the market in the future.

Keywords: autoclaved aerated concrete (AAC); modular AAC panels; mechanization of masonry works; precast walls; masonry structures.

Streszczenie. W 2023 r. w Polsce rozpoczęła się produkcja paneli ściennych z betonu komórkowego. Panele mają zalety betonu komórkowego, przy czym czas ich montażu jest znacznie krótszy niż stosowanych bloczków z ABK do wykonywania ścian, co może przełożyć się na istotny wzrost popularności technologii w Polsce. W artykule omówiono możliwości zastosowania paneli, sposób wykonywania ścian w tej technologii, porównano pracochłonność w odniesieniu do przegród z innych materiałów oraz omówiono czynniki mikroekonomiczne, które mogą wpłynąć na dostępne technologie wykonywania przegród w najbliższych latach.

Słowa kluczowe: autoklawizowany beton komórkowy (ABK); panele ścienne z betonu komórkowego; mechanizacja prac murarskich; prefabrykacja ścian; konstrukcje murowe.

Autoclaved aerated concrete (AAC) blocks are the most popular material for wall construction in Poland [1], with a market share of approximately 42% [1, 2] in wall materials and 50% in masonry materials.

The production technology of standard AAC blocks has not significantly changed over the past 10 years. Technologies for producing lighter AACs have been developed, which can be used as monolithic partitions even with current thermal requirements [3]. AAC materials used as typical insulation materials have also gained popularity [4]. Larger sized blocks have appeared on the market, but they have not gained the same popularity.

In 2023, the production of a new type of product, modular wall panels, began in Poland. These panels are floor-height and are intended for both partition and structural walls. Reinforced AAC elements have been produced and used in Poland since the 1950s, although their market share has never exceeded 2 – 5% of total AAC production [5, 6]. Production included both vertical and horizontal elements. Reinforced AAC products were used in single-family and multi-family housing. Polish scientists have made significant contributions to the development of this product, including the development of manufacturing standards and installation guides for these elements. Many innovative methods of corrosion protection for

blocczki z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) to najbardziej popularny materiał do wznoszenia ścian w Polsce [1]. Jego udział w rynku materiałów ściennych wynosi ok. 42% [1, 2] oraz ok. 50% w materiałach murowych [2]. Technologia produkcji standardowych bloczków z betonu komórkowego nie zmieniła się istotnie w ostatnich dziesięciu latach. Opracowano technologie produkcji lekkich betonów komórkowych, które nawet przy obecnych wymaganiach cieplnych mogą być stosowane na przegrody jednowarstwowe [3]. Popularność zyskały także materiały z betonu komórkowego stosowane jako materiały przewidziane do izolacji [4]. Na rynku pojawiły się bloczki o zwiększonych wymiarach, które nie zyskały jednakowo dużej popularności.

W 2023 r. w Polsce rozpoczęła się produkcja nowego rodzaju wyrobów z ABK, a mianowicie modułowych paneli ściennych. Mają one wysokość kondygnacji i są przewidziane do budowy zarówno ścian działowych, jak i konstrukcyjnych. Wielkoformatowe elementy ze zbrojonego betonu komórkowego były w Polsce produkowane i stosowane od lat pięćdziesiątych XX w., ale ich udział w rynku nie przekraczał 2 – 5% ogólnej produkcji ABK [5, 6]. Produkcja obejmowała zarówno elementy w układzie pionowym, jak i poziomym. Wyroby zbrojone z autoklawizowanego betonu komórkowego były stosowane w budownictwie jedno- i wielorodzinnym. Polscy naukowcy wnieśli istotny wkład w ich rozwój, m.in. przez opracowanie norm i informatorów nt. montażu. Opracowano też wiele innowacyjnych metod zabezpieczenia antykorozyjnego zbrojenia.

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ Xella Polska

^{*}) Correspondence address: wojciech.rogala@pw.edu.pl

reinforcement have also been developed. In the early 1990s, there was a decline in construction in Poland, especially in industrialized methods, which somewhat halted the production of reinforced elements. Producers at the time withdrew from the production of reinforced AAC elements, mainly due to the increase in the number of self-built houses and low labor costs in the early transformation period. Currently, we are dealing with different social and economic conditions that create new opportunities for the development of these elements.

Partition walls made of modular AAC panels, produced according to modern assumptions and recipes, have been used in Poland since 2012. However, due to imports from Germany and the Netherlands and transport costs, they have only gained popularity in a few regions of Poland. Production in Poland has the potential to significantly increase the popularity of these elements. The prospects for the development of the AAC industry have been discussed in the publication [7]. The aim of this publication is to describe the technical possibilities of using modular AAC wall panels and to present market and demographic analyses that affect the prospects for the development of technology in the current market realities.

Market shares and application possibilities in various market segments

Approximately 50% of masonry materials in Poland are used in the single-family housing market segment, where the market share of aerated concrete is estimated at around 55% (Figure 1). In this market segment, aerated concrete has gained popularity mainly due to its ease of installation and excellent thermal properties. In non-residential construction market segment (about 25% of masonry materials) and renovations (about 5% of masonry materials), the market share of aerated concrete is estimated at around 50%. In these segments, AAC has gained popularity due to its ease of installation and good fire properties. In the multi-family housing market segment (about 20% of the masonry materials market), aerated concrete has a smaller market share (about 15%) and is mainly used for partition walls and external cladding walls.

Modular wall panels in their available form can be used as structural elements in the single-family housing segment and in non-residential construction. In single-family houses, optimal conditions for the use of modular aerated concrete panels are provided by flat roof and hipped roof house designs. They are particularly useful in repetitive developer projects, where shorter construction time and lower labor intensity have a greater impact on the fixed costs of the investment.

In multi-family buildings, modular aerated concrete panels are mainly used for the construction of internal partition walls. A certain limitation in the application is the height of the panels (up

Na początku lat dziewięćdziesiątych nastąpił w Polsce regres w budownictwie, zwłaszcza realizowanym metodami przemysłowymi. Ówcześni producenci wycofali się z produkcji zbrojonych elementów z ABK, przede wszystkim ze względu na zwiększenie liczby domów budowanych w systemie gospodarczym i niewielkie koszty robocizny w początkowym okresie transformacji gospodarczej. Obecnie mamy do czynienia z innymi warunkami społecznymi i gospodarczymi, które stwarzają nowe możliwości do rozwoju tych elementów.

Ściany działowe z modułowych paneli z ABK, produkowane wg współczesnych założeń i receptur, są stosowane w Polsce od 2012 r., ale ze względu na import z Niemiec i Holandii, a więc duże koszty transportu, zyskały jedynie popularność w kilku regionach naszego kraju. Produkcja w Polsce ma szansę zmienić ten stan rzeczy. Perspektywy rozwoju branży ABK zostały omówione w publikacji [7]. Celem tego artykułu jest zaprezentowanie technicznych możliwości zastosowania modułowych paneli ściennych z AKB oraz przedstawienie analiz rynkowych i demograficznych, które wpływają na perspektywy rozwoju technologii w obecnych realiach.

Udział w rynku i możliwości zastosowania w poszczególnych segmentach budownictwa

Prawie 50% materiałów murowych w Polsce trafia do segmentu budynków jednorodzinnych, w którym udział betonu komórkowego szacowany jest na ok. 55% (rysunek 1). W tym segmencie beton komórkowy zyskał popularność głównie ze względu na łatwość montażu i dobre parametry cieplne. W budownictwie niemieszkaniowym (ok. 25% materiałów ściennych) i przy remontach (ok. 5% materiałów ściennych) udział betonu komórkowego szacowany jest na ok. 50%. Zdecydowała o tym również łatwość montażu oraz dobre właściwości ogniowe. W segmencie budynków wielorodzinnych (ok. 20% rynku materiałów ściennych), beton komórkowy ma udział ok. 15% i znajduje zastosowanie przede wszystkim do budowy ścian działowych oraz zewnętrznych ścian osłonowych.

Modułowe panele ścienne w dostępnej formie mogą być zastosowane jako elementy konstrukcyjne w budownictwie mieszkaniowym i niemieszkaniowym. W budynkach jednorodzinnych optymalne warunki do zastosowania modułowych paneli z betonu komórkowego stanowią projekty domów z dachem płaskim oraz z dachem kopertowym. Budowa domów z dachem dwuspadowym jest możliwa, ale utrudniona przez obecność skośnych ścian szczytowych. Wymaga docinania elementów na budowie lub wymurowania skośów z bloczków drobnowymiarowych. Z tego względu wpisuje się w koncepcję modułowych elementów konstrukcyjnych dostępnych na specjalne zamówienie. Szczególne zastosowanie znajdują panele z ABK w powtarzalnych projektach deweloperskich, gdzie krótki czas realizacji oraz mała pracochłonność przekładają się na koszty stałe inwestycji. W budynkach

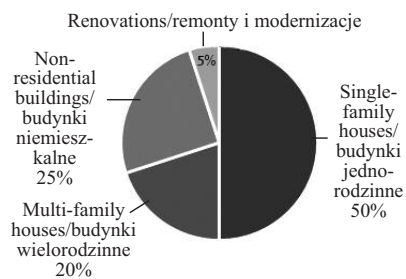


Fig. 1. Masonry structures market shares depending of market segment

Rys. 1. Zastosowanie konstrukcji murowych w poszczególnych segmentach rynku

to 3.0 m) and the required acoustic insulation of partitions [8], which requires the use of heavy, thin partitions. However, acoustic requirements in multi-family buildings allow the use of 10 cm thick panels for the construction of partition walls. The advantage of the panels is the possibility of thin-layer finishing, which significantly reduces the actual thickness of the partitions. Walls made of modular elements can also be used for inter-apartment partitions as double partitions with mineral wool between the layers [9]. This variant, due to the double installation cost, is more expensive to implement but is used in the adaptation of existing buildings for residential purposes, where the floors were not designed to carry the loads of massive partitions.

Labor Costs and Forecasted Availability of Physical Workers

In 2010, labor costs accounted for 28% of the costs of wall construction. Ten years later, labor costs already accounted for 48% of the costs of building walls with calcium silicate blocks. This is not solely related to the general increase in labor costs. Between 2017 and 2022, the labor rate increased by 80%, while the average wage increased by 55% (Fig. 2). At the end of 2023, due to the increase in the minimum wage, the difference decreased but still favored labor costs. The dynamics of the increase in construction labor prices are therefore greater than the dynamics of the increase in material prices and wage growth. Employment costs are currently indicated as the biggest barrier to business activity in the construction sector [13]. Unemployment among those seeking physical work in construction has fallen below 1%, and 93% of companies report a desire to hire workers in the masonry and reinforcement sectors [14]. Wall construction involves significant physical effort. Assuming that such work can be effectively performed by men aged 20 – 60, the number of people potentially able to work will decrease from the current 11.3 million to 8.0 million by 2050 [15]. Considering that the number of people with higher education increased by 30% between 2011 and 2021 (from 17.1% to 23.1%) [16], the prospect of improving the availability of workers willing to work in the masonry sector is unlikely.

The population decline is not associated with a proportional decrease in housing needs. In 2021, Poland ranked third from the bottom in terms of the number of dwellings per 1,000 inhabitants in European countries, with a number of 400 compared to 495 dwellings in the EU [17]. The new EPBD directive on the energy performance of buildings

wielorodzinnych modułowe panele z betonu komórkowego znajdują zastosowanie przede wszystkim jako elementy do budowy wewnętrznych ścian działowych. Pewnym ograniczeniem jest wysokość płyt (do 3,0 m) oraz wymagana izolacyjność akustyczna przegród międzymieszkaniowych [8], która wymusza stosowanie ciężkich przegród o małej grubości. Wymagania akustyczne w budynkach wielorodzinnych pozwalają jednak na zastosowanie paneli o grubości 10 cm do budowy ścian działowych. Ich zaletą jest możliwość cienkowarstwowego wykończenia, które istotnie zmniejsza realną grubość przegród. Elementy modułowe mogą być także stosowane do wykonywania przegród międzymieszkaniowych (podwójne przegrody z wełną mineralną pomiędzy warstwami) [9]. Taki wariant ze względu na podwójny koszt montażu jest drogi w realizacji, ale znajduje zastosowanie przy adaptacji istniejących budynków na cele mieszkaniowe, gdzie stropy nie były zaprojektowane do przeniesienia obciążeń od masywnych przegród.

Koszty robocizny i prognozowana dostępność pracowników fizycznych

W 2010 r. koszty robocizny stanowiły 28% kosztów wykonania ścian, a 10 lat później zwiększyły się do 48% kosztów budowy ścian w przypadku bloczków silikatowych. Nie jest to związane jedynie z ogólnym wzrostem kosztów pracy. W latach 2017 – 2022 stawka za robociznę zwiększyła się o 80%, podczas gdy przeciętne wynagrodzenie o 55% (rysunek 2). Pod koniec 2023 r. ze względu na wzrost pensji minimalnej różnica się zmniejszyła, ale dalej pozostawała na korzyść kosztów robocizny. Dynamika wzrostu cen robocizny w budownictwie jest zatem większa niż wzrost cen materiałów oraz wynagrodzeń. Koszty zatrudnienia są wskazywane obecnie jako największa bariera działalności gospodarczej w budownictwie [13]. Bezrobocie wśród poszukujących pracy fizycznej w budownictwie wynosi mniej niż 1%, a 93% firm zgłasza chęć zatrudnienia pracowników w zawodach murarz i zbrojarz [14]. Murowanie ścian wiąże się z dużym wysiłkiem fizycznym. Przy założeniu, że tego typu prace mogą wykonywać efektywnie mężczyźni w wieku 20 – 60 lat, liczba osób potencjalnie zdolnych do pracy w 2050 r. zmniejszy się z obecnych 11,3 mln do 8,0 mln [15]. Biorąc pod uwagę, że liczba osób z wyższym wykształceniem zwiększyła się w budownictwie w latach 2011 – 2021 o 30%

(z 17,1 do 23,1%) [16], to perspektywa poprawy dostępności pracowników gotowych do pracy w branży mularskiej jest mało prawdopodobna.

Zmniejszenie populacji nie wiąże się z proporcjonalnym spadkiem potrzeb mieszkaniowych. Polska w 2021 r. była bowiem na

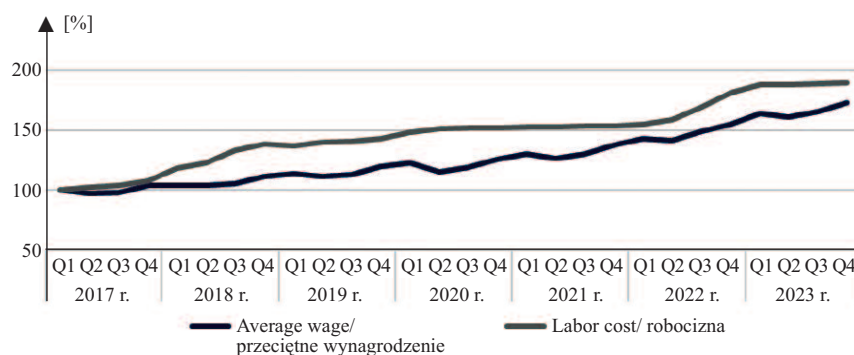


Fig. 2. Construction labor costs based on Intercenbud [12] vs. increase in average wages based on GUS [11]

Rys. 2. Koszty robocizny budowlanej na podstawie Intercenbud [12] vs. wzrost przeciętnego wynagrodzenia na podstawie GUS [11]

[18] aims to reduce energy consumption in residential buildings by 16% by 2030 and by 26% by 2033. After the introduction of renovation passports, it is likely that adapting many buildings to the zero-emission standard in Poland will be too expensive. In 2021, buildings over 50 years old accounted for 38% of the housing stock in Poland, and over a million dwellings in Poland were built over 100 years ago [19]. Adapting such buildings to the modern emission standard involves significantly higher costs, especially since the insulation of such buildings often cannot be carried out in the traditional way [20].

Given the above, many factors indicate that the number of people willing to do physical work will decrease, the need for energy-efficient residential buildings will increase, which will undoubtedly significantly affect the currently popular masonry technologies. Without mechanization, these works will become too expensive and may be replaced by other technologies. Even today, many contractors report that the only people willing to perform constant heavy physical work are those over 40 years old.

Concept of modular AAC panels production

In 2023, the production of aerated concrete panels began in two plants in Poland – Ostrołęka (Ytong production plant, part of the Xella group) and Śniadowo (Prefbet Śniadowo production plant) [21]. Although these elements were historically produced in Poland, the equipment of the plant and the product range concept were redesigned, allowing the products to be adapted to current material and construction requirements. The reinforcement at the Ostrołęka plant consists of ribbed bars supplied in coils. The reinforcement is automatically cut and delivered to the reinforcement station, where it is suspended on steel needles. A transport anchor is also placed at the reinforcement station. The reinforcement skeleton is then dipped in anti-corrosion paint and transported to the parking station. After the paint dries, the form with the mounted and anti-corrosion protected reinforcement is transported to the curing chamber. The needles suspending the reinforcement are removed from the mixture, which gains initial strength after a few hours in the curing chamber, ensuring the bars do not change position. The reinforced panels are then autoclaved, and further differences compared to small-sized blocks only occur during packaging. The produced assortment in terms of density is analogous to standard blocks. The range of elements intended for use in structural walls is presented in Table 1 [22]. The weight of a single element, depending on dimensions, type, and moisture content, ranges from 56 to 291 kg.

Each of the above elements are available in the dimensions specified in Table 2. The four available lengths of the elements allow for the easy adaptation of existing projects, and the adaptation does not affect the position of partitions and openings by more than 3.75 cm. The concept requires the availability of 11 types of panels of each width at the storage site. Elements with a height of 800 mm are used for

trzecim miejscu od końca wśród krajów europejskich pod względem liczby mieszkań na 1000 mieszkańców, z liczbą 400 przy średniej w UE wynoszącej 495 mieszkań [17]. Nowa dyrektywa EPBD [18] w sprawie charakterystyki energetycznej budynków zakłada obniżenie o 16% zużycia energii w budynkach mieszkalnych do 2030 r. oraz o 26% do 2033 r. Po wprowadzeniu paszportów renowacji prawdopodobnie okaże się, że dostosowanie wielu budynków do standardu zeroemisyjnego w Polsce będzie nieopłacalne. W 2021 r. budynki w wieku ponad 50 lat stanowiły 38% zasobów mieszkaniowych w Polsce, a więcej niż milion mieszkań w Polsce zostało wybudowanych ponad 100 lat temu [19]. Dostosowanie takich budynków do współczesnego standardu emisyjnego wiąże się z dużymi kosztami, zwłaszcza że ocieplenie takich budynków często nie może być realizowane w tradycyjny sposób [20].

Wymienione czynniki potwierdzają, że liczba osób chętnych do pracy fizycznej będzie malała, a zapotrzebowanie na efektywne energetycznie budynki mieszkalne będzie coraz większe. To bez wątpienia istotnie wpłynie na popularne obecnie technologie murowe. Bez mechanizacji staną się one zbyt drogie i zostaną wyparte przez inne technologie. Już dziś wielu wykonawców zgłasza, że do wykonywania stałej ciężkiej pracy fizycznej chętne są jedynie osoby powyżej czterdziestego roku życia.

Koncepcja produkcji elementów modułowych z betonu komórkowego

W Polsce w 2023 r. rozpoczęła się produkcja paneli zbrojonych z betonu komórkowego w zakładzie produkcyjnym Ytong, należącym do grupy Xella w Ostrołęce oraz w zakładzie produkcyjnym Prefbet Śniadowo [21]. Pomimo tego, że elementy tego typu były produkowane już w Polsce, to jednak zamaszynowanie zakładów i koncepcja asortymentu zostały na nowo zaprojektowane, w celu ich dostosowania do współczesnych wymagań. Zbrojenie w zakładzie w Ostrołęce stanowią pręty żebrowane dostarczane w postaci kęgów. Zbrojenie jest automatycznie docinane i dostarczane na stanowisko zbrojenia form, gdzie jest podwieszane do szpilek stalowych. Na stanowisku zbrojarskim jest umieszczana też kotwa transportowa. Następnie szkielet ze zbrojeniem jest zanurzany w farbie antykorozyjnej i transportowany na stanowisko parkingowe. Po wyschnięciu farby następuje transport formy z zamocowanym i zabezpieczonym antykorozyjnie zbrojeniem na stanowisko zalewania mieszanki. Szpilki, które podwieszają zbrojenie, są wyciągane z mieszanki, która uzyskała wstępną wytrzymałość po kilku godzinach w komorze dojrzewania. Dzięki temu pręty nie zmieniają swojego położenia. Płyty ze zbrojeniem są następnie autoklawizowane i dalsze różnice w procesie produkcji w porównaniu z drobnowymiarowymi bloczkami z ABK występują jedynie przy pakowaniu. Płyty są pakowanie nie na paletach, ale na drewnianych belkach, dlatego też docelowo opakowanie będzie miało dłuższy cykl życia, ponieważ będzie mogło być łatwiej i bez mniejszych uszkodzeń transportowane. Pod względem gęstości asortyment paneli zbrojonych z ABK jest analogiczny do bloczków drobnowymiarowych. Parametry elementów przewidzianych do zastosowania w ścianach konstrukcyjnych przedstawiono w tabeli 1 [22], a ich wymiary w tabeli 2.

Table 1. Types of AAC panels for structural walls

Tabela 1. Rodzaje dostępnych elementów z ABK do budowy ścian konstrukcyjnych

Thickness [cm]/ Grubość [cm]	Compressive strength [MPa]/Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Mean dry density [kg/m³]/Średnia gęstość w stanie suchym [kg/m³]	Intended use/Zamierzone zastosowanie
36,5	2,2	300	external monolithic walls ($U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)/ściany zewnętrzne jednowarstwowe ($U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)
20 24	4,0	475	internal structural walls or external walls intended to be insulated/ściany wewnętrzne konstrukcyjne, ściany zewnętrzne podlegające ociepleniu

walls in the under-window zone, elements with a height of 1800 – 2400 mm are used as elements supporting lintels, and elements with a height of 2600 – 3000 mm are used for full-height walls fragment. The wall height is increased by the height of the starting layer (100 or 200 mm), which is recommended to level the surface of the slab or foundation wall. In the system, it is possible to construct walls in a height module of 100 mm. This concept is a continuation of the „Efficient Construction” program, under which two innovative mini-cranes for building walls with calcium silicate blocks were developed in recent years, and the „Construction Services” service was introduced, allowing walls to be ordered directly from the manufacturer along with installation. The manufacturer provides installation plans developed in the BIM environment along with the product.

The assortment for partition wall construction (Table 3) results from acoustic requirements in multi-family buildings [8]. Due to the fact that partitions are used in buildings with walls made of different materials and different height modules, production with a height graded every 2 cm, from 2600 mm to 3000 mm, is necessary.

Panel production is waste-free, meaning the unused volume of the mold goes to the slurry tanks and is then re-added to production. Unlike the assembly of small-sized blocks, the system requires an installation plan that includes the arrangement of the panels. Depending on the phase of the investment in which the adaptation is carried out, the project requires slight dimensional changes or is modified for optimal technology application. In

Table 2. Dimensions of AAC panels for structural walls

Tabela 2. Wymiary paneli z ABK do wykonywania ścian konstrukcyjnych

Height/length [mm]/ Długość/wysokość [mm]	Width [mm]/ Szerokość [mm]			
	299	374	449	599
800				+
1 800	+ ¹⁾			
2 000	+			
2 200	+			
2 400	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+ ¹⁾
2 600	+	+	+	+
2 800	+	+	+	+
3 000	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+ ¹⁾

¹⁾ elements on special demand/elementy dostępne na zamówienie

Masa pojedynczego elementu w zależności od wymiarów, odmiany i wilgotności wynosi 56 – 291 kg.

Dostępna szerokość elementów umożliwia swobodną adaptację istniejących projektów i nie jest konieczna zmiana położenia przegród i otworów o więcej niż 3,75 cm. Wymagana jest dostępność na placu składowym jedenaśmiu typów paneli o każdej szerokości. Elementy o wysokości 800 mm wykorzystywane są w strefie podokiennej, a na elementach o wysokości 1800 – 2400 mm opierają się nadproża. W wielu współczesnych projektach występują jednak otwory o większej wysokości i elementy te nie są wykorzystywane. Ściany pełne wykonywane są z paneli z ABK o wysokości 2600 – 3000 mm. Wysokość ścian jest powiększana o warstwę startową 100 lub 200 mm, której wykonanie jest wskazane, aby wyrównać powierzchnię ściany lub płyty fundamentowej. Możliwe jest zatem wykonanie ścian w module wysokości 100 mm.

W przypadku konieczności uzyskania wysokości spoza modułu można przycinać bloczki warstwy startowej, chociaż zaburza to ideę ekspresowego wznoszenia ścian i ograniczenia ręcznych prac na budowie. Koncepcja ta jest kontynuacją rozwoju programu „Efektywna budowa”, w ramach której w ostatnich latach zostały opracowane m.in. dwa innowacyjne miniżurawie do wznoszenia ścian z bloczków silikatowych oraz wprowadzono usługę „Construction services”, w ramach której bezpośrednio u producenta można zamówić ścianę wraz z montażem. Producent dostarcza wraz z produktem plany montażowe, opracowane w środowisku BIM.

Asortyment paneli z ABK do wznoszenia ścian działowych (tabela 3) wynika z wymagań akustycznych w budynkach wielorodzinnych [8]. W związku z tym, że ściany działowe wykonywane są w budynkach o ścianach konstrukcyjnych z różnych materiałów i o różnym module wysokości, konieczna jest produkcja paneli z ABK o wysokości stopniowanej co 2 cm od 2600 do 3000 mm. Zarówno elementy do ścian działowych, jak i konstrukcyjnych mają zabezpieczone antykorozyjnie zbrojenie transportowe. Produkcja paneli jest bezodpadowa, tj. niewykorzystana

Table 3. Parameters of AAC panels for partition walls

Tabela 3. Parametry dostępnych paneli z ABK do budowy ścian działowych

Thickness [cm]/ Grubość [cm]	Compressive strength [MPa]/Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Mean dry density [kg/m³]/Średnia gęstość w stanie suchym [kg/m³]	Intended use/Zamierzone zastosowanie
7,5 10	4,0	575	walls between rooms in multi-family buildings ($R_{A1} \geq 37 \text{ dB}$) [8]/ściany pomiędzy pokojami w budynkach wielorodzinnych ($R_{A1} \geq 37 \text{ dB}$) [8]
10	5,0	725	walls between rooms and bathrooms in multi-family buildings ($R_{A1} \geq 40 \text{ dB}$) [8]/ściany pomiędzy pokojami i łazienkami w budynkach wielorodzinnych ($R_{A1} \geq 40 \text{ dB}$) [8]

the case of adaptation, any changes resulting from the width module of the plates can be mitigated by reinforced concrete columns.

Assembly of AAC modular panels

Structural AAC modular panels are installed using lifting equipment. It is possible to install them using a typical construction crane, a telescopic rotating loader, a mini-crane, or lifting equipment on HDS-type transport. Renting a mini-crane is not expensive but requires the delivery of the equipment. This is why it is not optimal equipment unless contractors owns such equipment. Installation from wheels using HDS lifting equipment is possible at a short distance from the production plant, as such a vehicle has a smaller load capacity, which significantly affects the price of the material delivered to construction sites located more than 50 – 100 km from the production site. The most efficient installation method is a crane on a wheeled chassis, which is usually able to install the walls of a single-family house from one or at most two workstations.

AAC modular panels intended for use as structural walls are equipped with transport anchors to which ring couplings are attached. The construction of the walls begins with the laying of the first layer of small-sized blocks, which serves to level the surface for the installation of panel elements. The panels are installed by a brigade consisting of two installers and a crane operator, whose employment cost is included in the equipment rental price. When erecting the panels, vertical joints are filled, and the mortar is usually applied before lifting the element. After installation, the panels are stabilized by nailing two steel clips, and every fourth panel is secured with an oblique plumbing strut.

Dedicated mortar is used for installation, the thickness of which should not exceed 3 mm. The elements are not equipped with vertical junctions. The connection using only mortar means that mutual load transmission between the elements is not considered in the design. The plumbing strut are released after the ceiling is completed [34]. Photo 1 shows an example photo of the installation of panels used for the construction of structural walls.

To lift the panels for partition walls from the pallet, a manual trolley is most commonly used. This trolley is used for transport to the target location and serves as a workbench in case the panel needs to be cut. Before lifting the panel, rubber blocks are installed, which serve as expansion joints from the ceiling or structural walls. The panels are installed by rotation. During installation, the panel is lifted with a special lifter, and wooden wedges are placed under the bottom edge. After installation, the bottom cavity is filled with general-purpose mortar, and the ceiling cavity and expansion

część betonu w objętości formy trafia do szlamatorów i następnie jest ponownie dodawana do produkcji. Ze względu na łatwe wykorzystanie skruszonego betonu, w przyszłości może się okazać, że optymalna jest produkcja mniejszego asortymentu paneli i przycinanie mniej typowych płyt do wymaganej długości.

Montowanie paneli w odróżnieniu od drobnowymiarowych bloczków wymaga planu montażowego, który zawiera ich rozmieszczenie. W zależności od fazy realizacji inwestycji, w jakiej wykonywana jest adaptacja, projekt wymaga nieznacznej zmiany wymiarów lub jest modyfikowany pod kątem optymalnego zastosowania technologii. Ewentualne zmiany wynikające z modułu szerokości płyt mogą być niwelowane przez rdzenie żelbetowe.

Montaż modułowych paneli z ABK

Panele z betonu komórkowego do ścian konstrukcyjnych montuje się za pomocą następujących urządzeń dźwigowych: typowego dźwigu budowlanego; teleskopowej ładowarki obrotowej; minizurawia lub urządzenia dźwigowego na transporcie typu HDS. Wypożyczenie minizurawia jest tanie, ale wymaga jego dostarczenia. Z tego względu nie jest najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem, chyba że wykonawca realizujący obiekt ma taki sprzęt w swoim parku maszynowym. Montaż z kół za pomocą urządzenia dźwigowego HDS jest możliwy przy niedalekiej odległości od zakładu produkcyjnego, ponieważ taki samochód ma małą ładowność, co istotnie wpływa na cenę materiału w przypadku budów oddalonych od miejsca produkcji więcej niż 50 – 100 km. Najbardziej efektywnym sposobem montażu jest żuraw na podwoziu kołowym, który zwykle jest w stanie zamontować ściany budynku jednorodzinnego z jednego lub maksymalnie dwóch stanowisk roboczych.

Elementy z ABK przewidziane do zastosowania jako ściany konstrukcyjne są wyposażone w uchwyty montażowe, do których podczipione są sprzęgi pierścieniowe. Wznoszenie ścian rozpoczyna się od wymurowania pierwszej warstwy z bloczków drobnowymiarowych. Panele montuje brygada składająca się z dwóch monterów oraz operatora dźwigu, którego koszt etatowej obsługi jest zawarty w cenie najmu. Przy wznoszeniu płyt wypełnia się spoiny pionowe, a zaprawę nakłada zwykle przed podniesieniem elementu. Po zamontowaniu stabilizuje się panele przez nabicie dwóch spinek stalowych, a co czwartą płytę zabezpiecza za pomocą ukośnej podpory montażowej.

Do montażu wykorzystuje się dedykowaną zaprawę, której grubość nie powinna przekraczać 3 mm. Panele z ABK nie są wyposażone w złącza pionowe. Połączenie jedynie z wykorzystaniem zaprawy powoduje, że przy projektowaniu nie uwzględnia się współpracy pomiędzy elementami. Podpory montażowe zwalnia się po wykonaniu stropu [23]. Na fotografii 1 przedstawiono montaż paneli zastosowanych do budowy ścian konstrukcyjnych. Do podniesienia paneli do ścian działowych z palety najczęściej stosowany jest ręczny wózek, wykorzystywany do transportu w miejsce docelowe oraz jako blat roboczy w przypadku konieczności przycinania płyty. Przed podniesieniem



Photo 1. Construction of a kindergarten in Bytom using modular AAC panels

Fot. 1. Budowa przedszkola w Bytomiu z modułowych paneli z ABK

joints from the structural walls are filled with polyurethane foam [23]. Photo 2 shows an example photo of the installation of panels used for partition walls.



Photo 2. Partition walls made of modular AAC panels in multi-family building in Łomża
Fot. 2. Ściany działowe z modułowych paneli z ABK w budynku wielorodzinnym w Łomży

Construction time and labor intensity of installation

The construction time and labor intensity were compared for the most popular technologies using the example of a two-story house with a usable area of 135 m², using catalogs of labor, materials and equipment expenditures KNR (Table 4). For modular elements, empirically estimated data were used. Based on experiences from existing projects, it can be assumed that in single day, two installers can assembly approximately 150 m² of structural walls from modular AAC panels during one work shift (10 hours). For partition walls, one experienced installer typically achieves an efficiency of about 40 m² wall surface during one work shift (10 hours).

The workload for erecting structural external walls, structural internal walls and partition walls compared to calcium silicate blocks and ceramic hollow bricks is more than five times lower. Walls from AAC are erected faster, but the use of modular elements further reduces labor intensity by almost three times. The difference increases when utilizing the thermal properties of aerated concrete and constructing monolithic walls. In extreme cases, erecting walls and finishing the facade with modular AAC panels can shorten the construction time by over 600 man-hours, or nearly 80%. This is a significant difference even for a single-family house project. Considering that the system is currently most commonly used in developer projects where several to

a dozen buildings are erected, it can also translate into significant differences in fixed costs associated with maintaining the construction site.

Buildings can be erected faster using typically prefabricated partitions. The advantages of such a solution include the possibility of delivering walls together with installations. The assembly time can be reduced to 0.5 days for a single-story building, which is not

Table 4. Labour intensity comparison of construction of partitions in building with an area of 135 m² using different technologies [24 – 28]
Tabela 4. Porównanie pracochłonności wykonania przegród obiektu o powierzchni 135 m² w różnych technologiach [24 – 28]

Parameters/Parametry	AAC 36,5 cm/ ABK 36,5 cm	AAC 24 cm/ ABK 24 cm	CSU 18 cm/ Bloczki silikatowe 18 cm	Clay 25 cm/ Pustak ceramiczny 25 cm	AAC Panels 36,5 cm/ Modułowe panele z ABK 36,5 cm	AAC Panels 24 cm/ Modułowe panele z ABK 24 cm
Workload for construction of partitions [r-g]/Pracochłonność wykonania ścian [r-g]	221	187	335	364	66	66
Construction time [days]/Czas wykonania ścian [dni]	11	9	17	18	3	3
Workload for construction of partitions and façade [r-g]/Pracochłonność wykonania ścian i elewacji [r-g]	320	593	761	789	165	473
Construction time of partitions and façade [days]/Łączny czas wykonania ścian i elewacji [dni]	16	30	38	39	8	24
Weight of manual assembled units [tons]/Masa do ręcznego wbudowania [tona]	40,5	43,1	68,6	52,9	4,6	4,6

płyty montuje się gumowe bloki, które służą jako dylatacja od stropu lub ścian konstrukcyjnych. Montaż paneli następuje przez obrót. W trakcie montażu płytę unosi się specjalnym podnośnikiem, a pod dolną krawędzią umieszcza drewniane kliny. Po montażu dolną szczelinę wypełnia się zaprawą ogólnego przeznaczenia, a szczelinę podstropową i dylatację od ścian konstrukcyjnych za pomocą pianki poliuretanowej [23]. Przykładową realizację przedstawiono na fotografii 2.

Czas i pracochłonność montażu

Czas oraz pracochłonność montażu paneli zbrojonych z ABK porównano z najbardziej popularnymi elementami na przykładzie piętrowego domu o powierzchni użytkowej 135 m², wykorzystując katalogi nakładów rzeczowych (tabela 4). W przypadku elementów modułowych wykorzystano dane oszacowane empirycznie. Na podstawie doświadczeń ze zrealizowanych inwestycji można założyć, że dwóch monterów jest w stanie wykonać ok. 150 m² ścian konstrukcyjnych z modułowych paneli ABK w trakcie jednej zmiany roboczej (10 h). W przypadku ścian działowych jeden doświadczony monter uzyskuje średnio wydajność ok. 40 m² w trakcie jednej zmiany roboczej.

Pracochłonność wykonania ścian zewnętrznych, wewnętrznych konstrukcyjnych z paneli z ABK jest ponadpięciokrotnie mniejsza w porównaniu z bloczkami silikatowymi i pustakami ceramicznymi. Ściany z bloczków z betonu komórkowego wznosi się szybciej, ale wykonanie przegród z elementów modułowych zmniejsza pracochłonność prawie trzykrotnie. Różnica powiększa się przy wykorzystaniu właściwości termicznych betonu komórkowego i wznoszeniu przegród jednowarstwowych. W skrajnym przypadku wzniesienie ścian oraz wy-

konanie elewacji z paneli z ABK pozwala skrócić czas budowy o ponad 600 roboczogodzin, czyli o prawie 80%. To istotna różnica nawet przy realizacji pojedynczego obiektu jednorodzinne. Biorąc pod uwagę, że elementy te są obecnie najczęściej stosowane w projektach deweloperskich, w ramach których wznosi się zwykle kilka, kilkanaście obiektów, to może się przełożyć na istotne różnice także w kosztach stałych związanych z utrzymaniem budowy.

Budynki można wzniesić szybko z wykorzystaniem typowo prefabrykowanych przegród. Przewagą takie-

a significant difference considering the need to manufacture elements on special order. Flexibility in ordering is crucial for the realization time. The assumption of modular aerated concrete panel systems is the availability of typical solutions from stock. This flexibility is important for design changes and mistakes on construction, which occur more frequently in this segment of applications than in other buildings.

For construction projects commissioned by private investors, estimates are rarely based on bill of quantities and are most often a lump sum for a specified scope of work. This means that the costs of building construction are not proportional to the labor intensity. Despite this, the labor costs for partitions in the modular AAC panels system constitute about 40 to 60% of the costs of constructing partitions using standard technology.

The technology of modular aerated concrete wall panels fits into the mechanization of construction work, which still has a small share in masonry work in Poland. In countries where labor costs are higher, the mechanization of masonry work is already significantly developed. According to estimates, even 95% of partitions in multi-family buildings in the Netherlands are constructed using lifting equipment.

There are many research studies worldwide on the robotization of masonry work. Three directions can be distinguished in the development of construction robotization: printing walls on-site and in production plants, using cable robots to erect walls from small-sized elements, and using a mobile crane (Hadrian X) for autonomous masonry with masonry elements.

In practice, each of these solutions has drawbacks. On-site printing [29] and cable robots [30] require setting up temporary structures, which for small constructions like single-family houses, will likely take longer than the process of installing AAC panels. The mobile robot requires continuous replenishment of material in the loading area [31], so it is not maintenance-free. In practice, only prefabricated structures can have a significant advantage in installation time. The real advantage is not in the installation time but in the ability to deliver the partition together with installations, which are prepared not on-site but in the production hall. This allows workers performing tasks at fixed workstations to achieve better efficiency compared to construction conditions.

According to our opinion the installation time of aerated concrete panels at the level of one working day per single floor will no longer require optimization for projects involving up to several residential buildings. The issue of installing electrical and sanitary installations and potentially finishing the walls remains to be resolved. It is worth noting that setting up panels requires significantly fewer qualifications than masonry walls, and the partitions are significantly more even and easier to construct. In some projects in Poland, due to the lack of available masons, panels were installed by people inexperienced in working with heavy building materials. Setting up panels for partition walls requires slightly more qualifications. In this case, achieving

go rozwiązania jest możliwość dostarczenia ścian razem z instalacjami. Czas montażu można zredukować do 0,5 dnia w przypadku pojedynczej kondygnacji budynku jednorodzinny, co nie jest istotną różnicą, biorąc pod uwagę konieczność wykonania elementów na specjalne zamówienie. W przypadku czasu realizacji istotna jest elastyczność przy zamówieniu. Założeniem modułowych systemów paneli z betonu komórkowego jest dostępność typowych rozwiązań. Elastyczność ta jest istotna przy zmianach projektowych i błędach wykonawczych, które w przypadku domów jednorodzinnych występują częściej niż w przypadku innych budynków.

Wycena budów realizowanych na zlecenie inwestorów prywatnych jest rzadko wykonywana na podstawie przedmiarów budynku i najczęściej stanowi ryczałt za określony zakres robót. To powoduje, że koszty wykonania obiektu nie są proporcjonalne do pracochłonności. Pomimo tego koszty robocizny przegród w systemie modułowych elementów ściennych stanowią 40 – 60% kosztów realizacji przegród w technologii murowej.

Technologia modułowych paneli ściennych z betonu komórkowego wpisuje się w mechanizację prac na budowie, której udział przy robotach murowych w Polsce jest nadal niewielki. W krajach, w których koszty robocizny są większe, mechanizacja robót murarskich jest już w znacznym stopniu rozwinięta. W Holandii nawet 95% przegród budynków wielorodzinnych powstaje z wykorzystaniem urządzeń dźwigowych.

Na świecie występuje wiele prac badawczych na temat robotyzacji prac murarskich. Wśród kierunków rozwoju robotyzacji na budowie można wyodrębnić trzy kierunki – drukowanie przegród na budowie i w zakładach produkcyjnych, wykorzystanie robotów kablowych do wznoszenia elementów drobnomiarowych oraz wykorzystanie mobilnego dźwigu (Hadrian X) do autonomicznego murowania elementów murowych. W praktyce każde z tych rozwiązań ma wady. Drukowanie na budowie [29] oraz roboty kablowe [30] wymagają rozstawienia konstrukcji, co w przypadku niedużych budów, takich jak domy jednorodzinne prawdopodobnie będzie dłuższe niż proces montażu paneli z betonu komórkowego. Mobilny robot wymaga ciągłego uzupełniania materiału w przestrzeni ładunkowej [31], a więc nie jest pozbawiony obsługi. W praktyce istotną przewagę w terminie montażu mogą stanowić jedynie konstrukcje prefabrykowane. Realna przewaga nie występuje w czasie montażu, ale dzięki możliwości dostarczenia przegrody razem z instalacjami, które są montowane nie na budowie, ale w hali produkcyjnej. Dzięki temu pracownicy wykonujący prace na stałych stanowiskach roboczych uzyskują lepszą wydajność niż w warunkach budowy.

Czas montażu paneli z betonu komórkowego na poziomie dnia roboczego na kondygnację budynku, wg naszej opinii, nie będzie wymagał już optymalizacji przy realizacji do kilku obiektów mieszkalnych. Do rozwiązania pozostaje kwestia montażu instalacji elektrycznych i sanitarnych oraz potencjalnego wykończenia ścian. Warto podkreślić, że ustawianie paneli wymaga znacznie mniej kwalifikacji niż murowanie ścian, a przegrody są bardziej równe i łatwiejsze do wykonania. Na terenie Polski zdarzały się budowy, w przypadku których ze względu na brak murarzy panele montowały osoby niedoświadczone w pracach z ciężkimi materiałami budowlanymi.

the assumed efficiency usually requires about a month of practical work on the construction site. Full efficiency in installing panels for structural walls using a crane can be achieved by workers after a short training and installing just a few elements.

Safety during AAC modular panels assembly

The harmonized technical specification PN-EN 12602 does not require testing for the safety of transport anchors during installation. Regardless of the requirements, tests of the transport anchor for pull-out were carried out based on the requirements of the EN 13155:2021-05 standard [32]. The tests were conducted at the Xella T&F laboratory in Emstal. A 606 mm long transport anchor is embedded in the panels as a mounting element (Fig. 3). The elements are installed using a TPA-R2 coupling ring with a load capacity of 1.25 tons. The elements are installed by rotation with lifting, so it was reasonable to test the anchor in two directions. The longitudinal direction test simulates the loads during the transport of the panel to the installation site. The perpendicular direction test simulates the loads during lifting the element from the pallet. Additionally, the panels were tested in the direction parallel to the thickness in case of incorrect placement of the element during installation. Five elements were tested in each direction (Photo 3). During the test, the elements were mounted on the test stand. The TPA-R2 coupling ring was attached to the transport anchor, and then a tensile force was applied, which was increased until the maximum value was reached. The destructive force R_k was determined for the 5% quantile and a confidence level of 75%. The obtained value was compared with the maximum theoretical weight of the panel multiplied by the safety factor γ , which for dynamic loads is 3.0 for the direction related to the transport of panels. For the other two directions, a safety factor $\gamma = 2.0$ was adopted as the limit value. The test results are presented in Table 5. The destructive forces obtained in

Nieco więcej kwalifikacji wymaga ustawianie paneli do ścian działowych. Wówczas do osiągnięcia zakładanej wydajności zwykle potrzeba ok. miesiąca pracy na budowie. Pełną wydajność przy montażu ścian konstrukcyjnych z paneli, z wykorzystaniem dźwigu, pracownicy mogą osiągnąć już po krótkim szkoleniu oraz montażu zaledwie kilku elementów.

Bezpieczeństwo montażu elementów do ścian konstrukcyjnych

Zharmonizowana specyfikacja techniczna PN-EN 12602 nie wymaga przeprowadzania badań dotyczących bezpieczeństwa transportu elementów podczas montażu. Niezależnie od wymagań, w ramach dopuszczenia do obrotu paneli konstrukcyjnych, zostały wykonane badania kotwy transportowej na wrywanie wg normy PN-EN 13155:2021-05 [32]. Badania wykonano w laboratorium badawczym Xella T&F w Emstal. Jako element montażowy w panelach umieszczona jest kotwa transportowa o długości 606 mm (rysunek 3). Elementy montowane są, przy użyciu sprzęgu pierścieniowego TPA-R2 o nośności 1,25 t, przez obrót z uniesieniem, dlatego też zasadne było przebadanie kotwy w dwóch kierunkach. Badanie w kierunku podłużnym do kotwy symuluje obciążenia podczas transportu panelu do miejsca wbudowania. Badanie w kierunku prostopadłym do grubości elementu symuluje obciążenia w trakcie unoszenia elementu z palety. Dodatkowo przebadano panele w kierunku równoległym do grubości na wypadek nieprawidłowego odłożenia elementu w trakcie montażu. W każdym kierunku przebadano 5 elementów (fotografia 3). Podczas badania elementy zostały zamocowane na stanowisku badawczym. Do kotwy transportowej został zamocowany sprzęg pierścieniowy TPA-R2, a następnie przyłożono siłę rozciągającą, która była zwiększana aż do osiągnięcia maksymalnej wartości. Siłę niszczącą R_k wyznaczono dla kwantyla 5% oraz poziomu ufności 75%. Uzyskaną wartość porównano z maksymalnym teoretycznym ciężarem płyty przemnożonym przez współczynnik bezpieczeństwa γ , który w przypadku obciążeń dynamicznych wynosi 3,0 dla kierunku związanego z transportem płyt. W przypadku dwóch pozostałych kierunków jako graniczną wartość przyjęto współczynnik $\gamma = 2,0$. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5. Uzyska-

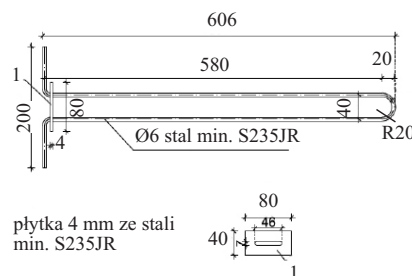


Fig. 3. Transport anchor scheme
Rys. 3. Schemat kotwy transportowej



Photo 3. Testing the transport anchor in the longitudinal direction (a); perpendicular to the thickness (b) and perpendicular to the width of the element (c)

Fot. 3. Badanie kotwy transportowej w kierunku podłużnym (a); prostopadłym do grubości (b) oraz prostopadłym do szerokości elementu (c)

Table 5. Transport anchor safety tests results

Tabela 5. Wyniki badań bezpieczeństwa kotwy transportowej

Type of element (compressive strength [MPa]/dry density class) [kg/m ³]/Wytrzymałość [MPa]/gęstość w stanie suchym [kg/m ³]	Dimension [mm]/Wymiary płyt [mm]	Load direction/Kierunek obciążenia	Destructive force R _k [kN]/Siła niszcząca R _k [kN]	Required load capacity R _{req} [kN]/Wymagana nośność R _{req} [kN]
2,2/300	3000 x 365 x 599	londitudinal/wzdłużny	10,36	8,48
		perpendicular to length/prostopadły do szerokości	10,08	4,24
		perpendicular to thickness/prostopadły do grubości	4,82	4,24
4/500	3000 x 200 x 599	londitudinal/wzdłużny	12,47	7,67
		perpendicular to length/prostopadły do szerokości	8,75	3,83
		perpendicular to thickness/prostopadły do grubości	4,16	3,83

this way are greater than the calculated weight of the element, determined according to the standard. The obtained results are influenced by the shape of the transport anchor, the type of steel used, the size of the bearing plate, and the way it cooperates with the steel rod.

ne w ten sposób siły niszczące są większe niż obliczeniowy ciężar elementu, wyznaczony zgodnie z normą. Na uzyskane wyniki wpływ ma kształt kotwy transportowej, rodzaj zastosowanej stali, wielkość blaszki oporowej oraz sposób jej współpracy z prętem stalowym.

AAC as a material for sustainable construction

Aerated concrete is known as a material with a low environmental impact [33 – 36]. To produce 1 m³ of concrete, between 300 to 600 kg of raw materials are needed, making it a unique construction material in this regard. Its low mass translates to lower emissions from transport and reduced load and reinforcement requirements for structures. The production of aerated concrete uses sand, lime, cement, anhydrite, water, and aluminum paste. Production in Polish plants is zero-waste – no waste is generated during production, as unused parts of the mass are returned to the mold, and after autoclaving, elements can be crushed and included in the recipe. Currently, aerated concrete can be produced with up to 30% recycled material. Emissions from AAC production mainly consist of scope 2 emissions, mainly emissions from the production of lime and cement. The aerated concrete industry has developed a roadmap for zero-emission production of aerated concrete [33]. The roadmap includes, among other things, reducing lime and cement emissions using Carbon Capture technology. An important property of aerated concrete is its ability to bind atmospheric carbon dioxide in the amount of 70 – 80 kg CO₂/m³ during the recarbonization process [36]. Over its lifecycle, the emissions of aerated concrete are comparable to those embedded in wooden structures.

Modular panels made of aerated concrete, compared to standard blocks, have slightly higher emissions due to the presence of reinforcement, which is, however, minimal and amounts to about 10 kg/m³. In Scandinavian countries, the technology of building houses from AAC panels with a thickness of only 10 cm is popular. These buildings do not even have ring beams, and the roof structure based on trusses

Beton komórkowy jako materiał do zrównoważonego budownictwa

Beton komórkowy jest znany jako materiał o niewielkim wpływie na środowisko [33 – 36]. Do wyprodukowania 1 m³ ABK potrzeba 300 – 600 kg surowców, co czyni go unikatowym materiałem konstrukcyjnym w tym zakresie. Niewielka masa przekłada się na małą emisję z transportu oraz małe obciążenie konstrukcji. Do produkcji betonu komórkowego wykorzystuje się piasek, wapno, cement, anhydryt, wodę i pastę aluminiową. Produkcja w polskich zakładach jest bezodpadowa – odpady nie powstają zarówno podczas produkcji, gdzie niewykorzystane w rozkroju części masy trafiają do ponownego zalewania formy, jak i po autoklawizacji, kiedy elementy mogą być po przekruszeniu włączone do receptury. Obecnie beton komórkowy może być produkowany z dodatkiem nawet 30% materiału z recyklingu. Na emisję przy produkcji ABK składa się przede wszystkim emisja przy wytwarzaniu wapna i cementu. Branża betonów komórkowych opracowała mapę drogową do bezemisyjnej produkcji tego wyrobu [33]. Zakłada ona m.in. redukcję emisji podczas produkcji wapna i cementu z wykorzystaniem technologii Carbon Capture. Istotną właściwością betonu komórkowego jest możliwość wiązania atmosferycznego dwutlenku węgla w ilości 70 – 80 kg CO₂/m³ w procesie rekarbonizacji [36]. Emisja w cyklu życia betonu komórkowego jest porównywalna do emisji w przypadku obiektów o konstrukcji drewnianej.

Modułowe panele z betonu komórkowego w porównaniu ze standardowymi bloczkami z ABK charakteryzuje nieznacznie większa emisja, wynikająca z obecności zbrojenia, którego udział jest jednak niewielki i wynosi ok. 10 kg/m³. Docelowo zbrojenie będzie mogło być zastąpione przez zbrojenie z włókna szklanego, które charakteryzuje niższy ślad węglowy. Modyfikacja połączeń pomiędzy panelami pozwoli na wznosze-

is only connected to the foundation slab with steel pins. In the coming years, the popularity of thinner partitions is expected to increase, which will result in a typical AAC wall having an even lower carbon footprint than wooden structures over its lifecycle.

Conclusions

Modular aerated concrete panels have been used in Europe for many years. Various indicators point to an inevitable increase in labor costs in Poland in the coming years and good prospects for the development of the AAC industry. Western European countries have been facing a shortage of willing construction workers and high labor costs on a larger scale for years, which is why these solutions have a much larger market share there (e.g., in the Netherlands).

In Poland, panels are currently produced in two manufacturing plants. In both cases, the production lines have been redesigned to meet contemporary market and production realities, and the product range includes typical elements. Elements available from stock can be used in virtually any type of building, and modularity does not imply significant changes in the assumed design concepts.

Modular elements for structural partitions are mainly used in single-family and non-residential buildings. In the case of private investors houses, the fixed costs of the investment mainly consist of mortgage servicing, so speeding up the construction of walls compared to small-sized blocks is not as important. Considering that younger investors, in particular, are more inclined to buy houses from developers, in investments involving the construction of several to a dozen single-family houses, whose number has been increasing in recent years, shortening the time has a real financial dimension. Regardless of profitability, the ability to complete the structure (even without insulation) in single day can be a key factor likely to increase interest in this technology. The key in this technology is reducing labor intensity, which will allow meeting housing needs even with a reduced availability of physical workers. Modular wall panels are also intended for use in multi-family buildings as partition walls, where shortening the construction time has a real impact on its costs.

In France, Belgium, Sweden, and Germany, the environmental impact of products increasingly determines the choice of solutions. ABK elements already have a low carbon footprint and require a small amount of primary raw materials for production over their lifecycle. Achieving the goals of the roadmap for zero-emission production [32] will further enhance the attractiveness of the solution and contribute to increasing development prospects in Poland and Europe.

Received: 17.06.2024
Revised : 19.08.2024
Published: 23.09.2024

nie ścian, które będą mogły być ponownie wykorzystane po demontażu. W krajach skandynawskich popularna jest technologia wznoszenia domów z paneli ABK o grubości zaledwie 10 cm. W tych obiektach nie występują nawet wieńce, a konstrukcja dachu oparta na więźbach jest jedynie związana szpilkami stalowymi z płytą fundamentową. O ile w Polsce przegrody konstrukcyjne o grubości mniejszej niż 18 cm nie są obecnie stosowane, to w kolejnych latach możliwa jest zmiana tego trendu projektowego. Pozwoli to na ograniczenie śladu węglowego obiektów w technologii cienkich paneli modułowych ABK do poziomu znacznie niższego niż stawiane za wzór obiekty w konstrukcji drewnianej.

Wnioski

Modułowe panele z betonu komórkowego są wykorzystywane w Europie od wielu lat. Wiele wskazuje na nieunikniony wzrost kosztów robocizny w Polsce w najbliższych latach oraz dobre perspektywy do rozwoju branży ABK. Z brakiem chętnych do pracy fizycznej na budowie, jak i wysokimi kosztami robocizny na większą skalę mierzą się już od lat kraje Europy Zachodniej, dlatego tam prefabrykacja ma znacznie większy udział w rynku (np. w Holandii).

Obecnie w Polsce modułowe panele zbrojone z betonu komórkowego są produkowane w trzech zakładach produkcyjnych. W obu przypadkach linie produkcyjne zostały na nowo zaprojektowane z uwzględnieniem współczesnych realiów rynkowych i produkcyjnych, a asortyment produkcji uwzględnił typowe elementy. Elementy dostępne ze stanu magazynowego mogą być zastosowane praktycznie w każdym rodzaju budynku, a modułowość nie oznacza istotnych zmian w założonych koncepcjach projektowych.

Elementy modułowe do przegród konstrukcyjnych wykorzystywane są przede wszystkim w budynkach jednorodzinnych i niemieszkaniowych. Możliwość wykonania konstrukcji (nawet niewymagającej ocieplenia) w dzień, to istotny czynnik, który prawdopodobnie wpłynie na zwiększenie zainteresowania tą technologią. Kluczowe w tej technologii jest zmniejszenie pracochłonności, co pozwoli realizować potrzeby mieszkaniowe nawet przy zmniejszeniu dostępności pracowników fizycznych. Modułowe panele ścienne są przewidziane także do zastosowania w budynkach wielorodzinnych jako przegrody działowe, gdzie skrócenie czasu realizacji inwestycji ma realne przełożenie na jej koszty.

We Francji, Belgii, Szwecji czy Niemczech o wyborze rozwiązań coraz częściej decyduje wpływ produktów na środowisko. Elementy z ABK już dziś w cyklu życia charakteryzują się niskim śladem węglowym oraz małą ilością surowców pierwotnych wymaganych do produkcji. Realizacja celów mapy drogowej do zeroemisyjnej produkcji [33] dodatkowo uatrakcyjni rozwiązanie oraz przyczyni się do zwiększenia perspektyw rozwoju.

Wpłynął do redakcji: 17.06.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 19.08.2024 r.
Opublikowano: 23.09.2024 r.

Literature

- [1] Misiewicz L. Rynek materiałów budowlanych do wznoszenia ścian w Polsce w 2021 r. *Materiały Budowlane*. 2022; 4: 16 ÷ 17.
- [2] GUS, Produkcja wyrobów przemysłowych w 2021, 2022, 2023 r.
- [3] [Online] https://www.xella.pl/pl_PL/sciany-jednowarstwowe-Ytong (dostęp 10.07.2024).
- [4] Rogala W, Niemiec K. Wykorzystanie właściwości izolacyjnych betonu komórkowego przy budowie przegród. *Materiały Budowlane*. 2024; (2): 79 – 80.
- [5] Zapotoczna-Sytek G. *Historia Autoklawizowanego Betonu Komórkowego w Polsce*. PWN; Warszawa, 2019.
- [6] Pogorzelski J, Urban L. *Gazobeton w budownictwie*. Wydawnictwo Arkady; Kraków, 1958.
- [7] Turski R, Rogala W. Current situation and further development of AAC in Europe, *Cement Wapno Beton* 27 (3) 154 – 165 (2022). <https://doi.org/10.32047/cwb.2022.27.3.1>
- [8] PN-B 02151-3:2015-10, Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 3: Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i elementów budowlanych.
- [9] Raport z badań izolacyjności akustycznej LZF00-01529/18/Z00NZF.
- [10] Baza cenowa Intercenbud, 1 kw. 2010 – 4 kw. 2023.
- [11] GUS, Komunikaty Prezesa Głównego Urzędu Statystycznego w sprawie przeciętnego wynagrodzenia, 1 kw. 2017 – 4 kw. 2023.
- [12] Baza cenowa Intercenbud, 1 kw. 2017 – 4 kw. 2023.
- [13] [Online] <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/koniunktura/koniunktura/koniunktura-w-przetworstwie-przemyslowym-budownictwie-handlu-i-uslugach-2000-2024-maj-2024,4,85.html> (dostęp 10.07.2024).
- [14] [Online] <https://www.wielkiebudowanie.pl/go.live.php/PL-H716/rynek-pracy-w-budownictwie.html> (dostęp 10.07.2024).
- [15] [Online] <https://www.populationpyramid.net/> (dostęp 15.06.2023).
- [16] [Online] https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/6494/2/1/1/ludnosc_wedlug_cech_spolecznych_-_wyniki_wstepne_nsp_2021.pdf (dostęp 10.07.2024).
- [17] [Online] <https://strefainwestorow.pl/artykuly/nieruchomosci/20221103/odnowa-zasobow-mieszkania-polska/> (dostęp 10.07.2024).
- [18] Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast).
- [19] [Online] <https://www.rp.pl/nieruchomosci/art37737731-milion-mieszkan-w-polsce-ma-ponad-100-lat> (dostęp 10.07.2024).
- [20] Rogala W. Warunki techniczne w odniesieniu do termomodernizacji obiektów zabytkowych, *Acta Sci. Pol. Architectura*. 2017, 16.2: 77 – 84.
- [21] System Śniadowo – budownictwo ekologiczne i ekonomiczne. *Materiały Budowlane*. 2024; 4: 45 ÷ 46.
- [22] [Online] https://www.xella.pl/pl_PL/Ytong-Panel-SWE-Ultra-plus (dostęp 10.07.2024).
- [23] Ytong Panel SWE I Ytong Panel – Wielkoformatowe systemy do szybkiej budowy, Warszawa 2023.
- [24] KNR BC-01, *Roboty budowlane w systemie YTONG*, Wydanie II, Warszawa 2009.
- [25] KNR K-28, *Roboty murowe w technologii Silka E*, Wydanie I, Koszalin 2006.
- [26] KNR AT-38, *Systemy ociepleń ATLAS*, Wydanie I, Warszawa 2017.
- [27] KNR AT-32, *Wyprawy z fabrycznych suchych mieszanek tynkarskich w technologii BAUMIT*, Warszawa 2006.
- [28] KNR K-30, *Roboty murowe w systemie Porotherm*, Wydanie II, Koszalin 2015.
- [29] Hoffmann M, Skibicki S, Pankratow P, Zieliński A, Pajor M, Techman M. Automation in the Construction of a 3D-Printed Concrete Wall with the Use of a Lintel Gripper. *Materials*. 2020; <https://doi.org/10.3390/ma-13081800>.
- [30] Bartoš M, Bulej V, Kuric I. Conceptual Design and Simulation of Cable-driven Parallel Robot for Inspection and Monitoring Tasks. *MATEC Web of Conferences*. 357. 02024. 2022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202235702024>.
- [31] [Online] <https://news.xella.com/blogs/xella-tf-launches-pilot-project-with-fast-brick-robotics-australia> (dostęp 10.07.2024).
- [32] PN-EN 13155:2021-05 Dźwignice – Bezpieczeństwo – Zdejmowalne urządzenia chwytające.
- [33] Kreft O, Fudge C, Walczak P. Roadmap für eine treibhausgasneutrale Porenbetonindustrie in Europa, *Mauerwerk* 26 (2), 77 – 84. 2022. <https://doi.org/10.1002/dama.202200004>
- [34] Kreft O. Circular economy potential for autoclaved aerated concrete, *CE/Papers*. 2, 465 – 470. 2018. <https://doi.org/10.1002/cepa.893>
- [35] [Online] https://www.xella.pl/pl_PL/NEWS-Raport-ESG-2023 (dostęp 10.07.2024).
- [36] Walther H. CO₂ absorption during the use phase of autoclaved aerated concrete by recarbonation, *AAC Worldwide*, 2022 (1), 18 – 29 (2022).