

## Możliwości nieniszczących badań istniejących konstrukcji murowych wykonanych z elementów autoklawizowanego betonu komórkowego

### Features of non-destructive testing of existing masonry structures made of autoclaved aerated concrete units

Radosław Jasiński\*, Łukasz Drobiec, Wojciech Mazur

Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

\*Corresponding author: R. Jasiński, e-mail: [Radoslaw.Jasinski@polsl.pl](mailto:Radoslaw.Jasinski@polsl.pl)

#### Streszczenie

W artykule opisano możliwości nieniszczących badań istniejących konstrukcji z elementów murowych, z autoklawizowanego betonu komórkowego. Opracowano zależności umożliwiające wyznaczenie znormalizowanej wytrzymałości na ściskanie autoklawizowanego betonu komórkowego, metodą semi-nieniszczącą MDT. Wykorzystano ogólną postać znanej z diagnostyki betonu zwykłego krzywej Neville'a, którą skalibrowano do ABK nominalnych klas gęstości 400, 500, 600 i 700. Wykonano badania i opracowano dodatkowe zależności empiryczne, pozwalające uwzględnić wpływ gęstości i wilgotności. Przedstawiono ponadto ultradźwiękową metodę nieniszczącą NDT wykalibrowaną na standardowych próbkach sześciennych 100×100×100 mm, o różnej gęstości i wilgotności. Oprócz nieniszczącej metody ultradźwiękowej zastosowano także metodę sklerometryczną skalibrowaną na całych elementach murowych, ograniczoną do jednej nominalnej gęstości, o zróżnicowanej wilgotności. Przedstawiono praktyczną ocenę wytrzymałości ABK, w istniejącej konstrukcji murowej.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje murowe, autoklawizowany beton komórkowy, wytrzymałość na ściskanie, techniki nieniszczące

#### Summary

The article describes the possibilities of non-destructive testing of existing structures, made of autoclaved aerated concrete [AAC] masonry units. Relationships that allow the determination of the normalized compressive strength of autoclaved aerated concrete, were developed with the MDT semi-non-destructive method. The general form of the Neville curve, known from the diagnosis of plain concrete was used, which was calibrated to AAC of nominal density classes 400, 500, 600 and 700. The tests were performed and additional empirical relationships were built, to allow for the influence of density and moisture. Moreover, an ultrasonic non-destructive NDT method calibrated on standard cubic 100 × 100 × 100 mm samples of various densities and moisture, is presented. In addition to the non-destructive ultrasound method, the sclerometric method, calibrated on the entire masonry elements, limited to one nominal density of 600 kg/m<sup>3</sup> with varying moisture, was also used. A practical application of AAC strength assessment in the existing masonry structure, has been presented.

**Keywords:** masonry structures, autoclaved aerated concrete, compressive strength, non-destructive techniques

## 1. Wprowadzenie

Stosując obliczeniową analizę obiektów istniejących, konieczne jest poznanie właściwości zastosowanych materiałów (1). Diagnostowanie konstrukcji murowych jest trudniejsze od rozpoznania betonu zwykłego, w przypadku którego znormalizowano metody badań jak również metody analizy i wnioskowania (2, 3). W odniesieniu do konstrukcji murowych nie ma żadnej normy systematyzującej metody badań, analizy i wnioskowania. Literatura przedmiotu przyjmuje, że metody, w których bezpośrednio uzyskuje

## 1. Introduction

The computational analysis for the existing structures, requires knowing parameters of the materials used (1). Diagnostics of masonry structures is more difficult than that of ordinary concrete, for which the testing methods, and the methodology of analysis and inferences, have been standardized (2, 3). Regarding masonry structures, there are no standards which systematize testing methodologies, and methods of analysis and inferences. According to the available literature, the methods which directly determine

się wytrzymałość muru na ściskanie lub ścinanie, noszą nazwę metod niszczących DT [z ang. Destructive Technique]. Metody te polegają na badaniach pobranych z konstrukcji fragmentów muru (4, 5). W rezultacie wykonanych badań otrzymuje się typową wytrzymałość na ściskanie muru  $f_k$ . Niewątpliwą zaletą metod DT jest wiarygodność określenia badanych właściwości, kosztem dużych uszkodzeń konstrukcji i niewielkiej liczby próbek.

Mniej wiarygodne w zastosowaniach są metody semi-niszczące MDT [z ang. Minor-Destructive Technique], w których z konstrukcji pobiera się niewielkie rdzenie muru lub stosuje technikę poduszki ciśnieniowych [z ang. flat-jack]. Analogicznie jak w metodach DT, także metody MDT nie zostały w Europie znormalizowane. W praktyce, kiedy w badaniach wykorzystuje się technikę flat-jack, stosuje się amerykańskie normy (6-9), a w przypadku badań pobranych z konstrukcji rdzeni stosuje się wytyczne (10), zawierające współczynniki konwersji, w przypadku muru z cegły pełnej. Metody MDT pozwalają także na wyznaczenie wytrzymałości muru na podstawie pobranych z konstrukcji próbek elementów murowych i zaprawy - rdzeni, niewielkich próbek, prostokątno-ściennych. Po określeniu wytrzymałości na ściskanie pobranych próbek dokonuje się konwersji wyników do wytrzymałości otrzymywanych na próbkach normowych [ $f_b$  i  $f_m$ ]. Wytrzymałość na ściskanie muru oblicza się stosując zależność normową  $f_k = f_k(K, f_b, f_m)$ , lub inne wzory empiryczne. Zaletami metod MDT jest duża wiarygodność uzyskiwanych wyników i niewielki stopień uszkodzeń, badanej konstrukcji.

Trzecią grupę badań konstrukcji murowych stanowią metody nieniszczące NDT [z ang. Non-Destructive Technique], które polegają na wykorzystaniu istniejących zależności między liczbą odbicia  $L$  (11-13) lub prędkością fali ultradźwiękowej  $c_p$  (14), a wytrzymałością na ściskanie badanego materiału. Zastosowanie w tym przypadku mają metoda sklerometryczna, metoda ultradźwiękowa oraz metoda pull-out, które nie zostały jeszcze znormalizowane i nie są tak powszechne, jak w badaniach konstrukcji żelbetonowych (15-18). Badania mogą być stosowane do oceny wytrzymałości muru na ściskanie pod warunkiem, że zostanie przeprowadzone skalowanie odpowiedniej normowej, lub innej wiarygodnej krzywej, z uwzględnieniem niszczących badań pobranych z konstrukcji rdzeni albo elementów murowych lub zaprawy. Techniki NDT są na ogół szybsze i mniej kosztowne niż techniki DT lub MDT, a zatem bardziej odpowiednie do zastosowania w obiektach zabytkowych (19), reprezentacyjnych a nawet strategicznych (20, 21). Zaletą metod NDT jest nieznaczny i łatwy do usunięcia stopień uszkodzeń konstrukcji. Jako istotną wadę należy uznać brak znormalizowanych metod badawczych, wiarygodnych krzywych podstawowych pozwalających dokonać stosownego skalowania. Metody NDT i MDT można nazwać metodami pośrednimi, ponieważ rezultatem wykonanych badań nie jest wytrzymałość muru na ściskanie, ale wytrzymałość składnika muru - elementu muru lub zaprawy. Żadna z metod MDT czy NDT nie może być zastosowana do określenia wytrzymałości muru na ściskanie, bez wykonania niszczących badań, mających na celu wyznaczenie odpowiedniej krzywej korelacyjnej, w celu przeliczenia otrzymanych wytrzymałości na poszukiwaną wartość  $f_k$  (22).

compressive or shear strength of a wall, are commonly known as the Destructive Technique [DT]. This technique is based on testing fragments of walls, collected from the structure (4, 5). In this way specific compressive strength  $f_k$  of the wall is determined. The unquestionable advantage of the Destructive Technique is reliability of determining the analysed parameters of the cost of significant damage to the structure and few specimens.

The application of Minor-Destructive Technique [MDT] is less reliable. This technique involves taking small masonry cores or applying the flat-jack method. As in the case of DT, also MDT has not been standardized in Europe. In practice, the American standards are used for techniques involving the flat-jack method (6-9) and recommendations (10), specifying conversion factors for the solid brick wall, are applied for testing cores taken from the structure. The Minor-Destructive Techniques can be also applied for determining the wall strength on the basis of fragments of the masonry units and mortar taken from the structure - cores, small rectangular specimens. When compressive strength of the taken specimens is determined, then the results are converted into strength determined for the standard specimens [ $f_b$  and  $f_m$ ]. The specific compressive strength of the wall, is calculated from the standard relationship  $f_k = f_k(K, f_b, f_m)$ , or other empirical equations. Reliability of the obtained results and relatively minor damage to the tested structures, are advantages of the Minor-Destructive Techniques.

The third group of techniques for masonry structures is the Non-Destructive Technique [NDT], which is based on relationships between the rebound number  $L$  (11-13), or ultrasonic wave velocity  $c_p$  (14) and compressive strength of the material tested. They include the rebound hammer method, the ultrasound method, and the pull-out method, which have not been standardized so far and are more commonly used, for testing reinforced concrete structures (15-18). Such tests can be performed to evaluate compressive strength of the wall providing that the appropriate standard, or another reliable curve will be scaled, taking into account the destructive tests conducted on cores from the structure - or on masonry units or the mortar. Non-Destructive Techniques generally tend to be faster and cheaper than Destructive or Minor-Destructive Techniques. Hence, they are more appropriate to historic buildings (19), representative buildings, and even the strategic ones (20, 21). Minor and easy to eliminate damage to the structure is an advantage of the Non-Destructive Techniques. The substantial defect is a lack of standardized research methods, reliable base curves for performing the appropriate scaling. Non-Destructive and Minor-Destructive Techniques can be classified as the indirect methods because they determine strength of the wall component - masonry unit or mortar, and not the compressive strength of the masonry. Neither NDT nor MDT can be used to determine compressive strength of the wall, without performing destructive tests to scale the suitable correlation curve, to convert the obtained strength values into the requested value  $f_k$  (22).

Walls made of AAC masonry units are usually built with thin joints with or without filled vertical joints. The compressive strength of

Mury z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego [ABK] najczęściej wznosi się stosując spoiny cienkowarstwowe bez lub z wypełnionymi spoinami czołowymi. Wytrzymałość na ściskanie takiego muru wymaga znajomości wytrzymałości na ściskanie elementu murowego  $f_b$ . Jest to cały element o naturalnej wilgotności pozwalający na obliczenie średniej znormalizowanej wytrzymałości na ściskanie  $f_b$ , stosując współczynnik empiryczny  $\eta_w$ , wyrażający wpływ wilgotności i  $\delta$  uwzględniający kształt i wielkość próbki. Znajomość znormalizowanej wytrzymałości elementu murowego na ściskanie pozwala zastosować normą określoną metodą (23) i obliczyć wytrzymałość muru na ściskanie według wzoru:

$$f_k = K f_b^{0,85} = K (\eta_w \delta f_b)^{0,85} \rightarrow K (f_{Bw})^{0,85}, \quad [1]$$

gdzie:  $K = 0,75$  lub  $0,8$ ,  $f_b$  – średnia znormalizowana wytrzymałość elementu murowego na ściskanie wyznaczona na próbkach  $100 \times 100 \times 100$  mm,  $f_b$  – średnia wytrzymałość całego elementu murowego lub próbki pobranej z elementu murowego na ściskanie o wilgotności  $w = 0$ ,  $f_{Bw}$  – wytrzymałość na ściskanie próbek pobranych z muru o rzeczywistej wilgotności.

Współczynniki konwersji  $\delta$  pozwalające przeliczyć wytrzymałość na ściskanie próbki o nienormowych wymiarach i kształtach, otrzymując wynik dla próbki sześcienniej o boku równym 100 mm, zawarto w normie PN-EN 772-1 (24). Norma nie podaje jednak współczynników przeliczeniowych rdzeni lub mikrordzeni, o średnicy  $< 25$  mm]. Literatura (25-27) zawiera szereg współczynników przeliczeniowych, otrzymanych w badaniach betonu oraz ceramicznych elementów murowych (28).

W przypadku autoklawizowanego betonu komórkowego metody przeliczenia wyników wytrzymałości na ściskanie, zawarta została tylko we wcześniejszych publikacjach autorów (29, 30).

W artykule zawarto podsumowanie kilkuletnich badań właściwości mechanicznych autoklawizowanego betonu komórkowego, różnymi technikami. Opracowano zależności umożliwiające wyznaczenie znormalizowanej wytrzymałości na ściskanie autoklawizowanego betonu komórkowego, metodą semi-nieniszcząca MDT. Wykorzystano ogólną postać, znanej z diagnostyki betonu zwykłego krzywej Neville'a (25), którą dostosowano do ABK nominalnych klas gęstości: 400, 500, 600 i 700. Wykonano badania i opracowano dodatkowe zależności empiryczne pozwalające uwzględnić wpływ gęstości i wilgotności.

Przedstawiono ultradźwiękową metodę nieniszcząca NDT, po kalibracji na standardowych próbkach sześciennych  $100 \times 100 \times 100$  mm, różnych gęstościach i wilgotnościach. Oprócz nieniszczącej metody ultradźwiękowej, zastosowano także metodę sklerometryczną, dostosowaną do całych elementów murowych i ograniczoną do jednej nominalnej gęstości, wynoszącej  $600 \text{ kg/m}^3$ , o zróżnicowanej wilgotności. Wyniki analiz zastosowano do wyznaczenia wytrzymałości w istniejącym murze, wykonanym z elementów murowych ABK.

the wall is based on the shear strength of the masonry unit  $f_b$ . It is the whole unit with natural moisture content and calculated average standardized compressive strength  $f_b$ . Using empirical coefficient  $\eta_w$  which expresses the effect of moisture content  $\delta$  and takes into account the shape and size of the specimen. When this standardized compressive strength of the masonry unit is known, the standard procedure (23) can be applied, to calculate the specific compressive strength of the masonry wall, according to the equation:

$$f_k = K f_b^{0,85} = K (\eta_w \delta f_b)^{0,85} \rightarrow K (f_{Bw})^{0,85}, \quad [1]$$

where:  $K = 0.75$  or  $0.8$ ,  $f_b$  – average standardized compressive strength of masonry unit, determined for the specimens  $100 \times 100 \times 100$  mm,  $f_b$  – average compressive strength of the whole masonry unit or the specimen with moisture content  $w = 0$ ,  $f_{Bw}$  – compressive strength of the masonry specimen cut out from the masonry construction with the actual moisture content.

The conversion factor  $\delta$  used to convert compressive strength of the specimen with non-standard sizes and shapes into the cube specimen with a side of 100 mm in length, is specified in the standard PN-EN 772-1 (24). However, the standard does not specify conversion factors for cores or micro-cores, with a diameter  $< 25$  mm. The papers (25-27) describe a series of conversion factors obtained from testing concrete and ceramic masonry units (28).

For autoclaved aerated concrete, the methods for converting the compressive strength results was only presented in our previous papers (29, 30).

This paper summarizes several years of research on mechanical parameters of autoclaved aerated concrete, performed with various techniques. Some relationships were developed to determine the standardized compressive strength of autoclaved aerated concrete, using the Minor Destructive Technique. The applied Neville's curve (25), in the form commonly known from diagnosing ordinary concrete, was calibrated to the nominal density classes of AAC: 400, 500, 600 and 700. The tests performed and developed additional empirical relationships, included the effect of density and moisture content.

Also, the ultrasonic Non-Destructive Technique, calibrated against standard cube specimens, with the size of  $100 \times 100 \times 100$  mm, various densities and moisture content, was described in this paper. Apart from this ultrasonic NDT, the rebound hammer method was also applied, calibrated against the whole masonry units, restrained to one nominal density  $600 \text{ kg/m}^3$  and various moisture contents. The results of the analyses were used to determine the strength in the existing wall, made of AAC masonry units.

## 2. Wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie autoklawizowanego betonu komórkowego metodą semi-nieniszczącą MDT

### 2.1. Podstawy teoretyczne i wyniki badań

W ABK, analogicznie jak w betonie kruszywowym o wytrzymałości materiałów decydują występujące w materiale pory, pustki i wtrącenia. Próbkki różnych kształtów i wymiarów różnią się wytrzymałością. Analitycznym opisem tego rodzaju zjawisk zajmuje się statystyczna teoria wytrzymałości Weibulla (19,31) według której, przy jednakowym prawdopodobieństwie zniszczenia, wytrzymałość danego materiału zależy odwrotnie, od objętości badanej próbki. Wykorzystując postulaty Weibulla oraz wyniki badań własnych (25), uwzględniono smukłość próbek i sformułowano podobną relację, umożliwiającą określenie wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach różniących się kształtem i wymiarami, od próbek normowych - kostki 150×150×150 mm. Empiryczna krzywa stosowana w betonach zwykłych, ma postać:

$$\frac{f_c}{f_{c,cube\ 150}} = 0,56 + \frac{0,697}{\frac{V}{152hd} + \frac{h}{d}}, \quad [2]$$

w której: V – objętość próbki, h – wysokość próbki, d – najmniejszy wymiar boczny próbki.

Przyjmując w miejsce wytrzymałości  $f_{c,cube150}$ , otrzymywanej na próbkach normowych 150×150×150 mm wytrzymałość  $f_B$ , uzyskiwaną na próbkach 100×100×100 mm, pobranych z elementów murowych. Iloraz 152hd w stosunku do objętości próbki standardowej 100hd, zależność [2] można przedstawić następująco:

$$\frac{f_c}{f_B} = b + \frac{a}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}} \rightarrow y = b + \frac{a}{x}, \quad [3]$$

w której:  $f_B$  – wytrzymałość na ściskanie znormalizowanej próbki 100×100×100 mm, wilgotności  $w = 0$ ,  $f_c$  – wytrzymałość na ściskanie próbki dowolnego kształtu i wilgotności  $w = 0$ , a i b – stałe współczynniki krzywej,  $y = f_c/f_B$  – iloraz wytrzymałości na ściskanie,  $x = V/100hd+h/d$  – bezwymiarowy współczynnik wyrażający wpływ objętości i smukłości próbki.

Na podstawie wyników badań 494 próbek walcowych i prostokątnych (29, 30), w stanie powietrzno suchym o wilgotności  $w = 0$ , opracowano równania krzywych korelacyjnych – rys. 1.

Uzyskane współczynniki a i b krzywych podano w tabelicy 1. Porównanie uzyskanych wyników badań ze wspólną krzywą, pokazano na rys. 2.

Zauważyć można, że stosując próbki 100×100×100 mm, wartość mianownika krzywych wynosi  $V/100hd+h/d = 2$ , a obliczone według wzorów podanych w tabelicy 1 ilorazy wytrzymałości -  $f_c/f_B \neq 1$ . Aby przy znormalizowanych próbkach uzyskać iloraz  $f_c/f_B = 1$ , należy dokonać translacji krzywych równoległe do osi odciętych,

## 2. Minor-Destructive Technique for determining compressive strength of autoclaved aerated concrete

### 2.1. Theoretical basis and research results

In autoclaved aerated concrete, the strength of as in the aggregate concrete, material is determined by pores, voids, and defects. Strength of specimens with various shapes and sizes differs. This aspect is analytically described by Weibull's statistical theory of material strength (19-31), which states that strength of the material is reversely proportional to the volume of the tested specimen, at the same probability of failure. Based on the Weibull postulates and the results from own research (25), slenderness of the specimens was taken into account and the similar relationship was developed, to determine compressive strength of concrete in the specimens with shape and dimensions different from those of the standard specimens - the cubes 150 × 150 × 150 mm. The empirical curve for standard concrete is expressed as:

$$\frac{f_c}{f_{c,cube\ 150}} = 0,56 + \frac{0,697}{\frac{V}{152hd} + \frac{h}{d}}, \quad [2]$$

where: V – specimen volume, h – specimen height, d – the smallest side dimension of the specimen.

Replacing strength  $f_{c,cube150}$ , obtained from the standard specimens 150 × 150 × 150 mm with strength  $f_B$  for specimens 100 × 100 × 100 mm, drilled from the masonry units. The ratio 152hd with volume of the standard specimen 100hd, the relationship(2) can be expressed as:

$$\frac{f_c}{f_B} = b + \frac{a}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}} \rightarrow y = b + \frac{a}{x}, \quad [3]$$

where:  $f_B$  – compressive strength of the standardized specimen 100 × 100 × 100 mm with moisture content  $w = 0$ ,  $f_c$  – compressive strength of the specimen with any shape and moisture content  $w = 0$ , a and b – constant coefficients for the curve,  $y = f_c/f_B$  – ratio of compressive strength,  $x = V/100hd+h/d$  – dimensionless coefficient representing the effect of specimen volume and slenderness.

Equations for curve correlations were written on the basis of the results from testing 494 cylindrical and rectangular specimens (29, 30) in the air-dry state - moisture  $w = 0$ , Fig. 1.

Obtained values of curve coefficients a and b are compared in Table 1. Comparison of test results and the common curve, is shown in Fig. 2.

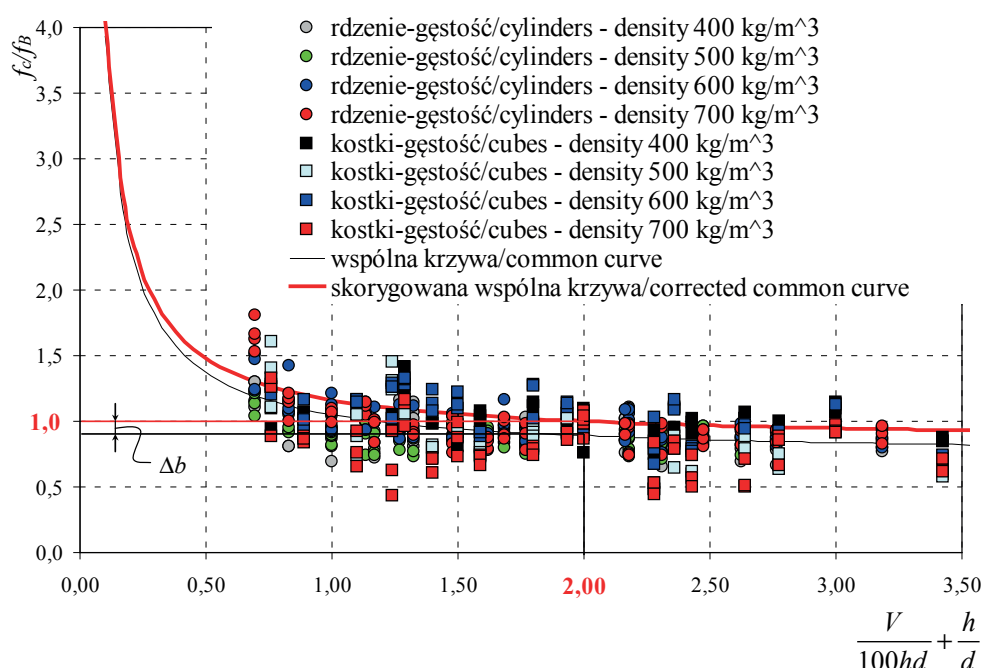
When the specimens 100 × 100 × 100 mm were used, the value of the curves dominator was  $V/100hd + h/d = 2$ , and strength ratios calculated according to the equations from Table 1 were  $f_c/f_B \neq 1$ . To obtain the ratio  $f_c/f_B = 1$  for the standardized specimens, the curves required translation which was parallel to the intercept axes, using the additive correction factor  $\Delta b$ , which led to the common curve:





Rys. 1. Widok próbek wykorzystanych w badaniach wpływu kształtu: a) próbki prostokątne w trakcie suszenia, b) próbki walcowe, przygotowane do suszenia

Fig. 1. Specimens tested for the effect of their shape: a) rectangular specimens during drying, b) cylindrical specimens ready for drying



Rys. 2. Wyniki badań wszystkich próbek rdzeniowych i próbek sześciennych, wraz z wyznaczoną krzywą korelacyjną

Fig. 2. Test results for all core and cube specimens and determined curve of correlation

stosując addytywny współczynnik poprawkowy  $\Delta b$ , uzyskując wzór wspólnej krzywej:

$$\frac{f_c}{f_B} = b + \Delta b + \frac{a}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}} \rightarrow \Delta b = 1 - b - \frac{a}{2} \quad [4]$$

$$\frac{f_c}{f_B} = b + \Delta b + \frac{a}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}} \rightarrow \Delta b = 1 - b - \frac{a}{2} \quad [4]$$

## 2.2. Kalibracja krzywej w stanie powietrzno-suchym

W praktyce zamiast wielu krzywych, prawidłowych tylko w zakresie gęstości, korzystniej jest operować tylko jedną uniwersalną krzywą wyrażającą związek wytrzymałości ABK z gęstością. Wykorzystując zawarte w tabelcy 1 wartości współczynników  $a$  i  $b$  betonów komórkowych, o gęstościach zawartych w podanych przedziałach oraz współczynniki  $a_w$  i  $b_w$  wspólnej krzywej, zbudowano zależności korelacyjne, pokazane na rys. 3.

Na podstawie pokazanych na rys. 3 wyników, metodą najmniejszych kwadratów określono następujące zależności opisujące

## 2.2. Curve calibration in air-dry state

In practice, it is more advantageous to use only one universal curve, expressing the relationship between AAC and density instead of many curves, satisfactory only in the range of densities. Coefficients  $a$  and  $b$  determined for autoclaved aerated concrete with specific density within the defined ranges and presented in Table 1 as well as coefficients  $a_w$  and  $b_w$  of the common curve, were used to develop correlation relationships, illustrated in Fig. 3.

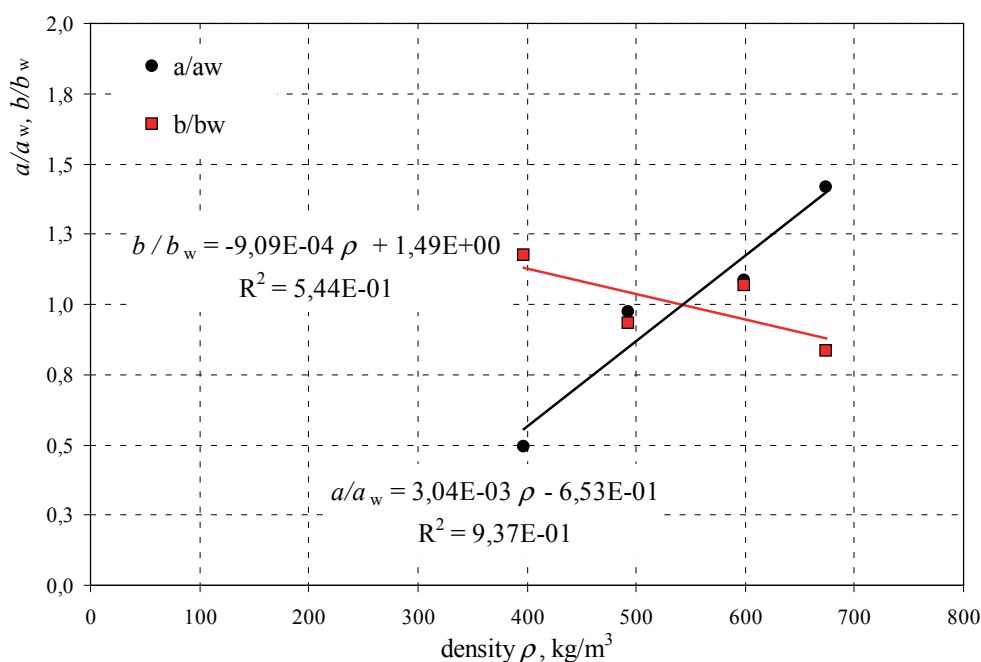
The following relationships describing the curve coefficients as a function of AAC densities, were developed on the basis of the results shown in Fig. 3 and in Table 1, using the method of the least squares:

Tablica 1 / Table 1

ZESTAWIENIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKÓW ORAZ RÓWNAŃ KRZYWYCH EMPIRYCZNYCH (29, 30)

COMPARISON OF COEFFICIENTS AND EQUATIONS FOR EMPIRICAL CURVES (29, 30)

Przedział gęstości betonu komórkowego Density range of AAC, średnia gęstość / average density $\rho$ , nominalna klasa gęstości / nominal class of density, kg/m <sup>3</sup>	Współczynnik krzywej Curve coefficient		R	Addytywny współczynnik poprawkowy Additive correction factor, $\Delta b$	Skorygowany współczynnik krzywej Corrected coefficient for curve, $b_{kor}$	Równanie krzywej Curve equation
	a	b				
375 - 446, 397, (400)	0.159	0.857	0.324	0.06	0.921	$\frac{f_c}{f_B} = 0,921 + \frac{0,159}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}}$
462 - 532, 492, (500)	0.312	0.682	0.533	0.16	0.844	$\frac{f_c}{f_B} = 0,844 + \frac{0,312}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}}$
562 - 619, 599, (600)	0.349	0.779	0.612	0.05	0.826	$\frac{f_c}{f_B} = 0,826 + \frac{0,349}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}}$
655 - 725, 674, (700)	0.454	0.608	0.614	0.16	0.773	$\frac{f_c}{f_B} = 0,773 + \frac{0,454}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}}$
Wspólna krzywa / Common curve	$a_w = 0.321$	$b_w = 0.730$	0.262	0.11	0.840	$\frac{f_c}{f_B} = 0,840 + \frac{0,321}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}}$



Rys. 3. Względne wartości współczynników krzywych

Fig. 3. Relative values of curve coefficients

współczynniki krzywych - por. tablica 1, w funkcji gęstości ABK:

$$a = a_w \cdot (3,044 \cdot 10^{-3} \rho - 0,653) = 0,321 \cdot (3,044 \cdot 10^{-3} \rho - 0,653), \quad [5]$$

$$b = b_w \cdot (9,09 \cdot 10^{-4} \rho - 1,49) = -0,730 \cdot (9,09 \cdot 10^{-4} \rho - 1,49), \quad [6]$$

$$a = a_w \cdot (3,044 \cdot 10^{-3} \rho - 0,653) = 0,321 \cdot (3,044 \cdot 10^{-3} \rho - 0,653), \quad [5]$$

$$b = b_w \cdot (9,09 \cdot 10^{-4} \rho - 1,49) = -0,730 \cdot (9,09 \cdot 10^{-4} \rho - 1,49), \quad [6]$$

The formation of AAC curve of the arbitrary density, after determining a and b values, required a correction of the coefficient b

Budując krzywą ABK o dowolnej gęstości, po wyznaczeniu wartości  $a$  i  $b$ , konieczna jest stosowna korekta współczynnika  $b$  tak, aby z krzywej [4] przy  $V/100hd + h/d = 2$ , otrzymać iloraz wytrzymałości  $f_c/f_B = 1$ .

### 2.3. Kalibracja krzywej w stanie wilgotnym

Wzrost wilgotności ABK (32-36) powoduje wyraźne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie oraz pogorszenie właściwości izolacyjnych. Wpływ zmian wytrzymałości na ściskanie ABK określono w funkcji zmian wilgotności, wyrażonej jako iloraz masy zaabsorbowanej wody i masy suchego materiału:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad [7]$$

gdzie:  $m_w$  – masa próbki wilgotnej,  $m_s$  – masa próbki wysuszonej do stałej masy.

Wykorzystując normowe próbki sześciennie 100x100x100 mm wyznaczono maksymalną wilgotność  $w_{max}$  ABK - nasiąkliwość, która odpowiadała takiemu nasyceniu wodą, w którym nie obserwowano dalszego wzrostu masy  $m_w$ , w skutek kapilarnego podciągania. Wilgotność względną obliczano, jako iloraz aktualnej wilgotności i maksymalnej wilgotności  $w/w_{max}$ . Badania wytrzymałości wykonano przy względnych wilgotnościach wynoszących:  $w/w_{max} = 100\%$ ;  $67\%$ ;  $33\%$ ;  $23\%$ ,  $10\%$  i  $0\%$ . Szczegóły wyników badań zawarto w publikacji (30). Wykazano, że przy wzroście gęstości od  $\rho = 397 \text{ kg/m}^3$  do  $674 \text{ kg/m}^3$ , maksymalna wilgotność zmieniła się w granicach  $w_{max} = 89,9\% - 53,3\%$ , co pozwoliło wyznaczyć prostą najmniejszych kwadratów w postaci:

$$w_{max} = -1,23 \frac{\rho}{1000} + 1,34, \text{ gdy } 397 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho \leq 674 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad [8]$$

Przy każdej wilgotności wykonano badania niszczące, określając wytrzymałość betonu wilgotnego  $f_{Bw}$  a wyniki przedstawiono na rys. 4a w funkcji wilgotności  $w$ . Natomiast na rys. 4b otrzymane wytrzymałości odniesiono do wytrzymałości  $f_B$  suchego ( $w=0$ ) ABK i przedstawiono w funkcji wilgotności względnej  $w/w_{max}$ .

Na podstawie otrzymanych wyników badań określono dwie proste empiryczne, umożliwiające wyznaczenie względnej wytrzymałości ABK, w funkcji względnej wilgotności w postaci:

$$\frac{f_{Bw}}{f_B} = -0,96 \frac{w}{w_{max}} + 1 \rightarrow f_{Bw} = f_B \left( -0,97 \frac{w}{w_{max}} + 1 \right) \quad \text{gdy } 0 \leq \frac{w}{w_{max}} \leq 0,31, \quad [9]$$

$$\frac{f_{Bw}}{f_B} = -0,15 \frac{w}{w_{max}} + 0,74 \rightarrow f_{Bw} = f_B \left( -0,15 \frac{w}{w_{max}} + 0,74 \right) \quad \text{gdy } 0,31 < \frac{w}{w_{max}} \leq 1,0, \quad [10]$$

which resulted in the strength ratio  $f_c/f_B = 1$  obtained from the curve (4), at  $V/100hd + h/d = 2$ .

### 2.3. Curve calibration in wet state

The increased moisture content in AAC (32-36) evidently reduces compressive and tensile strengths, and degradation of insulating parameters. The effect of the changed compressive strength of AAC was presented as the function of the changes in the moisture content, expressed as the ratio of the mass absorbed of water and mass of dry material:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad [7]$$

where:  $m_w$  – mass of wet specimen,  $m_s$  – mass of specimen dried until constant weight.

Based on the standard cube specimens 100 x 100 x 100 mm, the maximum moisture content - absorbability  $w_{max}$  in AAC was determined, which corresponded to the level of water, at which no further increase in mass  $m_w$  was observed, as the effect of capillary water absorption. Relative moisture was calculated as the ratio of current and maximum moisture content  $w/w_{max}$ . Strength tests were carried out under the following conditions of relative moisture content:  $w / w_{max} = 100\%$ ;  $67\%$ ;  $33\%$ ;  $23\%$ ,  $10\%$  and  $0\%$ . Detailed information of the test results was described in the paper (30). At the density increase in the range from  $\rho = 397 \text{ kg/m}^3$  to  $674 \text{ kg/m}^3$ , the maximum moisture content was varying within  $w_{max} = 89.9\% - 53.3\%$ . Hence, a straight line was determined with the method of the least square, in the following form:

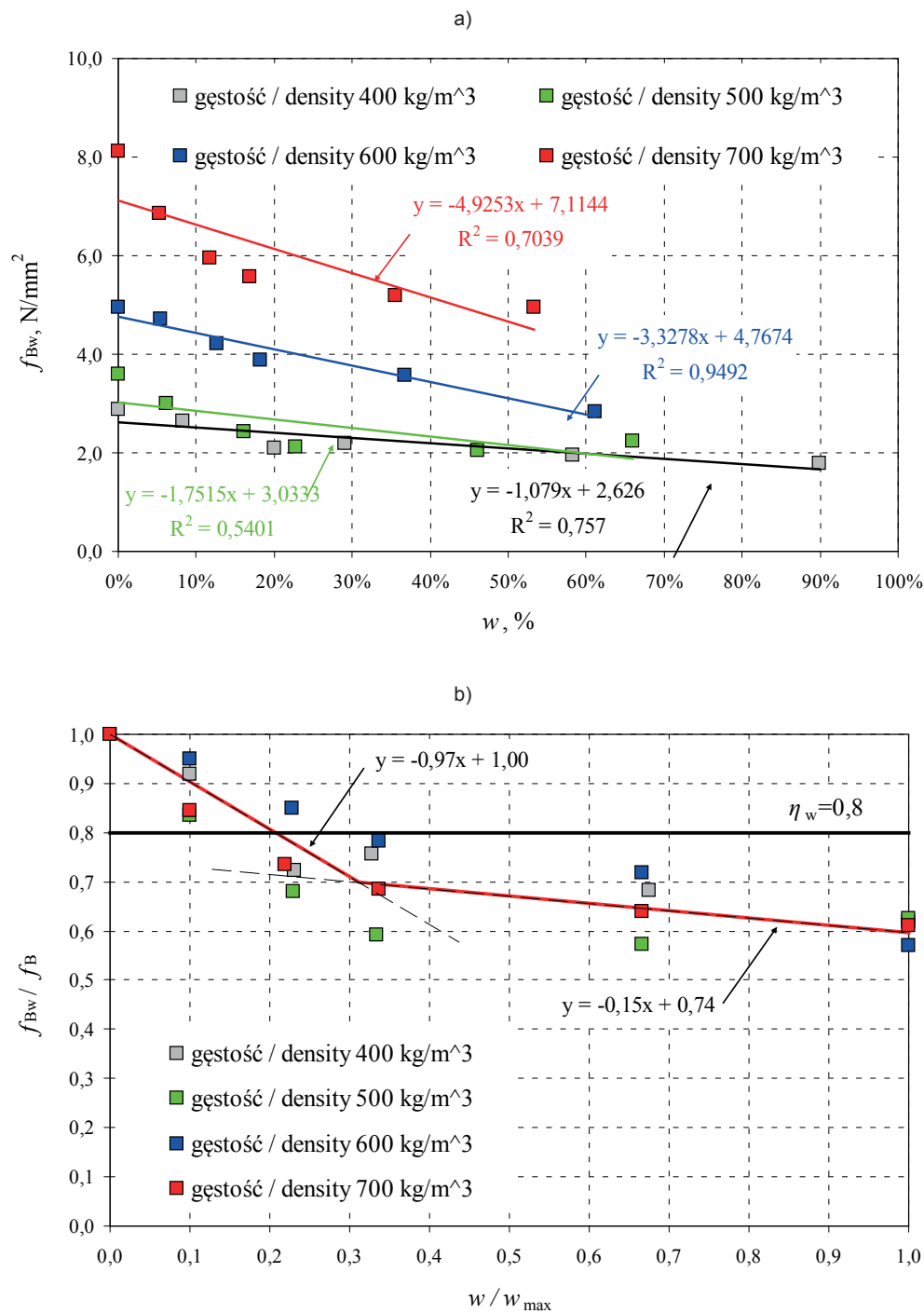
$$w_{max} = -1,23 \frac{\rho}{1000} + 1,34, \text{ gdy } 397 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho \leq 674 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad [8]$$

At each moisture level, the destructive tests were performed, to determine the strength of the wet concrete  $f_{Bw}$ , and the results are shown in Fig. 4a as a function of moisture  $w$ . Fig. 4b presents the obtained strength values with respect to the strength  $f_B$  of dry AAC [ $w = 0$ ] as a function of relative moisture  $w/w_{max}$ .

Two empirical lines were drawn on the basis of obtained results and used to determine the relative strength of AAC as a function of relative moisture in the following form:

$$\frac{f_{Bw}}{f_B} = -0,96 \frac{w}{w_{max}} + 1 \rightarrow f_{Bw} = f_B \left( -0,97 \frac{w}{w_{max}} + 1 \right) \quad \text{when } 0 \leq \frac{w}{w_{max}} \leq 0,31, \quad [9]$$

$$\frac{f_{Bw}}{f_B} = -0,15 \frac{w}{w_{max}} + 0,74 \rightarrow f_{Bw} = f_B \left( -0,15 \frac{w}{w_{max}} + 0,74 \right) \quad \text{when } 0,31 < \frac{w}{w_{max}} \leq 1,0, \quad [10]$$



Rys. 4. Wyniki badań wytrzymałość ABK z uwzględnieniem wilgotności: a) wytrzymałość  $f_{Bw}$  w funkcji wilgotności  $w$ , b) względne wytrzymałości ABK  $f_{Bw} / f_B$  w funkcji  $w / w_{max}$

Fig. 4. Test results of AAC strength, taking into account the moisture content : a) strength  $f_{Bw}$  as a function of moisture  $w$ , b) relative strength of AAC as a function  $w/w_{max}$

### 3. Wyznaczanie wytrzymałości na ściskanie nieniszcząca [NDT] metodą ultradźwiękową

#### 3.1. Wyniki badań

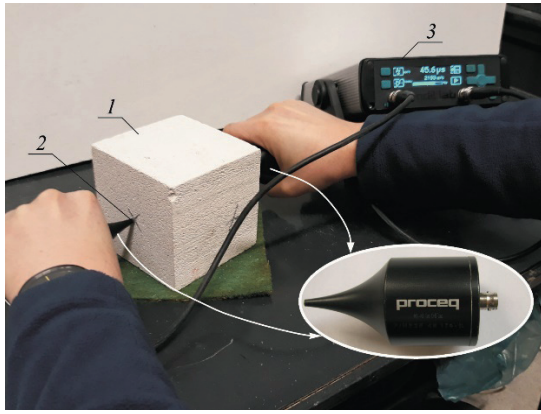
Parametry podstawowych krzywych w metodzie ultradźwiękowej, wykonano na próbkach w formie kostek 100×100×100 mm – rys. 5. Do badań posłużyły próbki nawilżane wodą, do wilgotności względnych wynoszących  $w/w_{max} = 100\%$ , 67%, 33%, 23% i 10% oraz próbki wysuszone do stałej masy  $w/w_{max} = 0\%$ . Do

### 3. Determination of compressive strength with the ultrasonic, non-destructive technique

#### 3.1. Tests results

Parameters of the fundamental curves were tested on the cube specimens 100 x 100 x 100 mm, using the ultrasonic method units – Fig. 5. The wet specimens with moisture content  $w/w_{max} = 100\%$ , 67%, 33%, 23%, and 10%, and the specimens dried until constant weight  $w/w_{max} = 0\%$  were used in the tests. PUNDIT LAB





Rys. 5. Stanowisko do pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych; 1 – badana próbka z ABK 100×100×100 mm, 2 – głowice eksponencjalne, 3 – urządzenie PANDIT LAB PLUS

Fig. 5. The test stand for measuring velocity of ultrasonic waves; 1 – the tested AAC specimen 100 x 100 x 100 mm, 2 – exponential transducers, 3 – PANDIT LAB PLUS instrument

badani wykorzystano urządzenie PUNDIT LAB PLUS [Proceq SA, Schwerzenbach, Switzerland] z głowicami eksponencjalnymi, o częstotliwości 54 kHz. Zastosowano metodę przepuszczania, przy przeciwnym i osiowym położeniu głowic (37, 38).

### 3.2. Kalibracja krzywej w stanie powietrzno-suchym

Na wstępie wyznaczono krzywą korelacyjną, wiążącą prędkość fali ultradźwiękowej  $c_p$  w próbkach ABK w stanie powietrzno-suchym w funkcji uzyskanej wytrzymałości na ściskanie  $f_B$  – rys. 6.

Wykazano, że betony o większych gęstościach i większych wytrzymałościach na ściskanie posiadały większe prędkości ultradźwięków. Operując wartościami średnimi, uzyskanymi w ramach każdej nominalnej gęstości ABK opracowano metodą najmniejszych kwadratów zależność  $c_p - f_B$  przy  $[w/w_{\max} = 0\%]$  w postaci:

$$f_B = a(c_p)^2 + bc_p + c \rightarrow f_B = 5,73 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 + 1,43 \cdot 10^{-2}c_p + 10,3, \quad \text{gdy } 1847 \frac{\text{m}}{\text{s}} < c_p \leq 2379 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad [11]$$

### 3.3. Kalibracja krzywej w stanie wilgotnym

Do zastosowań praktycznych konieczne jest opracowanie wspólnej krzywej, uwzględniającej zarówno zmienność gęstości ABK jak i wpływ wilgotności. W tym celu, w pierwszej kolejności wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów wspólną krzywą uwzględniającą wszystkie wilgotności  $w/w_{\max}$  oraz gęstości – rys. 7a. Uzyskane równanie wspólnej krzywej miało postać:

$$f_{Bw} = a_w(c_p)^2 + b_w c_p + c_w \rightarrow f_{Bw} = 5,33 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,39 \cdot 10^{-2}c_p + 10,9, \quad \text{gdy } 1315 \frac{\text{m}}{\text{s}} < C_L \leq 2379 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad [12]$$

Następnie wyznaczono równania dla poszczególnych krzywych, w zależności od gęstości ABK. Uzyskane wyniki zamieszczono w tablicy 2. Otrzymane wartości współczynników odniesiono do

PLUS [Proceq SA, Schwerzenbach, Switzerland] instrument with exponential transducers with the frequency of 54 kHz were employed in the tests. Ultrasonic tomography was the method used at the opposite and axial arrangement of the transducers (37, 38).

### 3.2. Curve calibration in air-dry state

At first the correlation curve was determined which represented ultrasonic wave velocity  $c_p$  in the AAC specimens in the air-dry state, as the function of obtained compressive strength  $f_B$  – Fig. 6.

Higher ultrasonic velocities were found in concrete with greater density and the compressive strength. Using the average values obtained at each nominal density of AAC, the following relationship  $c_p - f_B$  at  $[w/w_{\max} = 0\%]$  was developed with the least squares method and expressed as:

$$f_B = a(c_p)^2 + bc_p + c \rightarrow f_B = 5,73 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 + 1,43 \cdot 10^{-2}c_p + 10,3, \quad \text{when } 1847 \frac{\text{m}}{\text{s}} < c_p \leq 2379 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad [11]$$

### 3.3. Curve calibration in the wet state

The practical application of the obtained test result required the development of the common curve which included both - the varying density of AAC and the moisture impact. For this purpose, the common curve including all moisture levels  $w/w_{\max}$  and densities, was found by the least square method – Fig. 7a. The equation for the common curve was:

$$f_{Bw} = a_w(c_p)^2 + b_w c_p + c_w \rightarrow f_{Bw} = 5,33 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,39 \cdot 10^{-2}c_p + 10,9, \quad \text{when } 1315 \frac{\text{m}}{\text{s}} < C_L \leq 2379 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad [12]$$

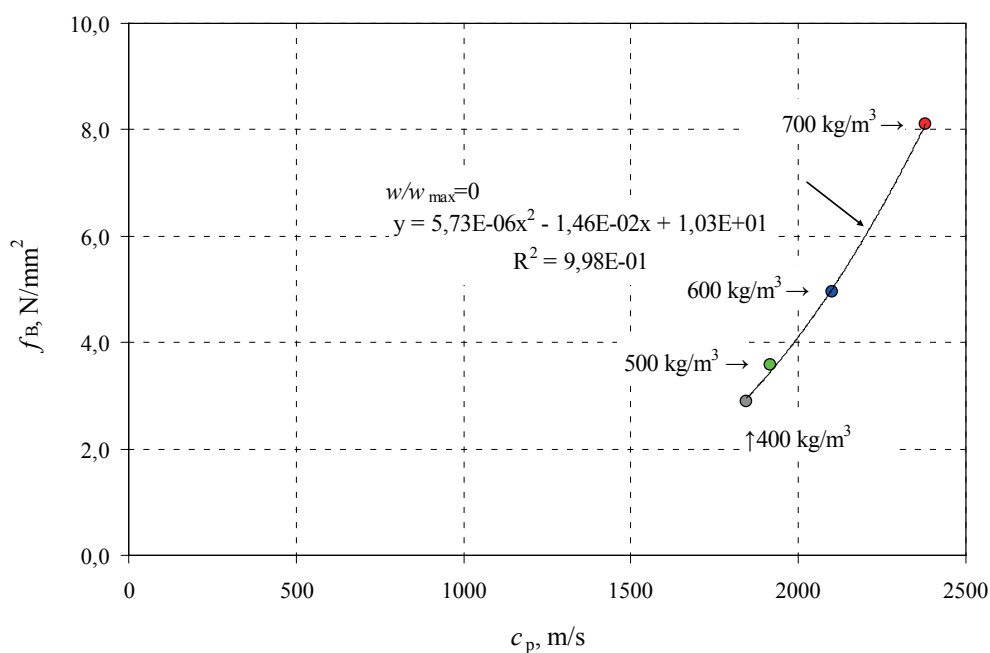
Then, the equations for individual curves were developed, with the reference to AAC density. Test results are presented in Table 2. The obtained coefficient values were compared to the coefficients  $a_w$ ,  $b_w$ , and  $c_w$  for the common curve, and then marked on the graph in Fig. 7b.

Test results for ultrasonic velocity: a) common curve  $f_{Bw} - c_p$  for all AAC densities and moisture levels, b) equations for curve coefficients at varying moisture content in AAC  $f_{Bw}$

The parabolic relation of the compressive strength of wet AAC  $f_{Bw} - c_p$  illustrated in Fig. 7a was the same as for ordinary concrete (2). Linear and parabolic relations were obtained for solid brick (26, 31).

The method of the least squares gave the following forms of empirical curves used to determine coefficients of the relationship  $f_{Bw} - c_p$  for AAC with any moisture level and density:

$$\frac{a}{a_w} = 1,99 \left( \frac{w}{w_{\max}} \right)^2 - 1,89 \frac{w}{w_{\max}} + 1,05, \quad R^2 = 0,96, \quad [13]$$



Rys. 6. Wyniki badań prędkości ultradźwięków  $c_p$ , z uwzględnieniem klas gęstości w stanie całkowicie suchym  $f_B$

Fig. 6. The results obtained from measuring ultrasonic velocity  $c_p$ , regarding density classes in the completely dry state  $f_B$

współczynników  $a_w$ ,  $b_w$  i  $c_w$  wspólnej krzywej, a następnie nanie-siono na wykresie - rys. 7b.

Uzyskaną paraboliczną krzywą zależności wiążącej wytrzymałość na ściskanie wilgotnego ABK  $f_{Bw} - c_p$  przedstawioną na rys. 7a była identyczna jak w przypadku betonu zwykłego (2), a w przypadku cegły pełnej, uzyskuje się relacje liniowe i paraboliczne (26, 31).

Stosując metodę najmniejszych kwadratów uzyskano następujące postacie krzywych empirycznych, pozwalających na określenie współczynników zależności  $f_{Bw} - c_p$  ABK, o dowolnej wilgotności i gęstości:

$$\frac{a}{a_w} = 1,99 \left( \frac{w}{w_{\max}} \right)^2 - 1,89 \frac{w}{w_{\max}} + 1,05, \quad R^2 = 0,96, \quad [13]$$

$$\frac{b}{b_w} = 2,77 \left( \frac{w}{w_{\max}} \right)^2 - 2,56 \frac{w}{w_{\max}} + 1,03, \quad R^2 = 0,97, \quad [14]$$

$$\frac{c}{c_w} = 2,89 \left( \frac{w}{w_{\max}} \right)^2 - 2,56 \frac{w}{w_{\max}} + 0,94, \quad R^2 = 0,98. \quad [15]$$

Obliczone współczynniki  $a$ ,  $b$  i  $c$  należy wprowadzić do równania:

$$f_{Bw,C} = a(c_p)^2 + bc_p + c, \quad \text{gdy } 1315 \frac{m}{s} < c_p \leq 2379 \frac{m}{s}. \quad [16]$$

które określa ogólną postać podstawowej krzywej, stosowanej w przypadku ABK. W praktyce, badaniom ultradźwiękowym towarzyszyć muszą zawsze badania niszczące, służące skalowaniu. W tym przypadku dalsze postępowanie może być analogiczne do

$$\frac{b}{b_w} = 2,77 \left( \frac{w}{w_{\max}} \right)^2 - 2,56 \frac{w}{w_{\max}} + 1,03, \quad R^2 = 0,97, \quad [14]$$

$$\frac{c}{c_w} = 2,89 \left( \frac{w}{w_{\max}} \right)^2 - 2,56 \frac{w}{w_{\max}} + 0,94, \quad R^2 = 0,98. \quad [15]$$

Calculated coefficients  $a$ ,  $b$  and  $c$  should be put into the equation:

$$f_{Bw,C} = a(c_p)^2 + bc_p + c, \quad \text{when } 1315 \frac{m}{s} < c_p \leq 2379 \frac{m}{s}. \quad [16]$$

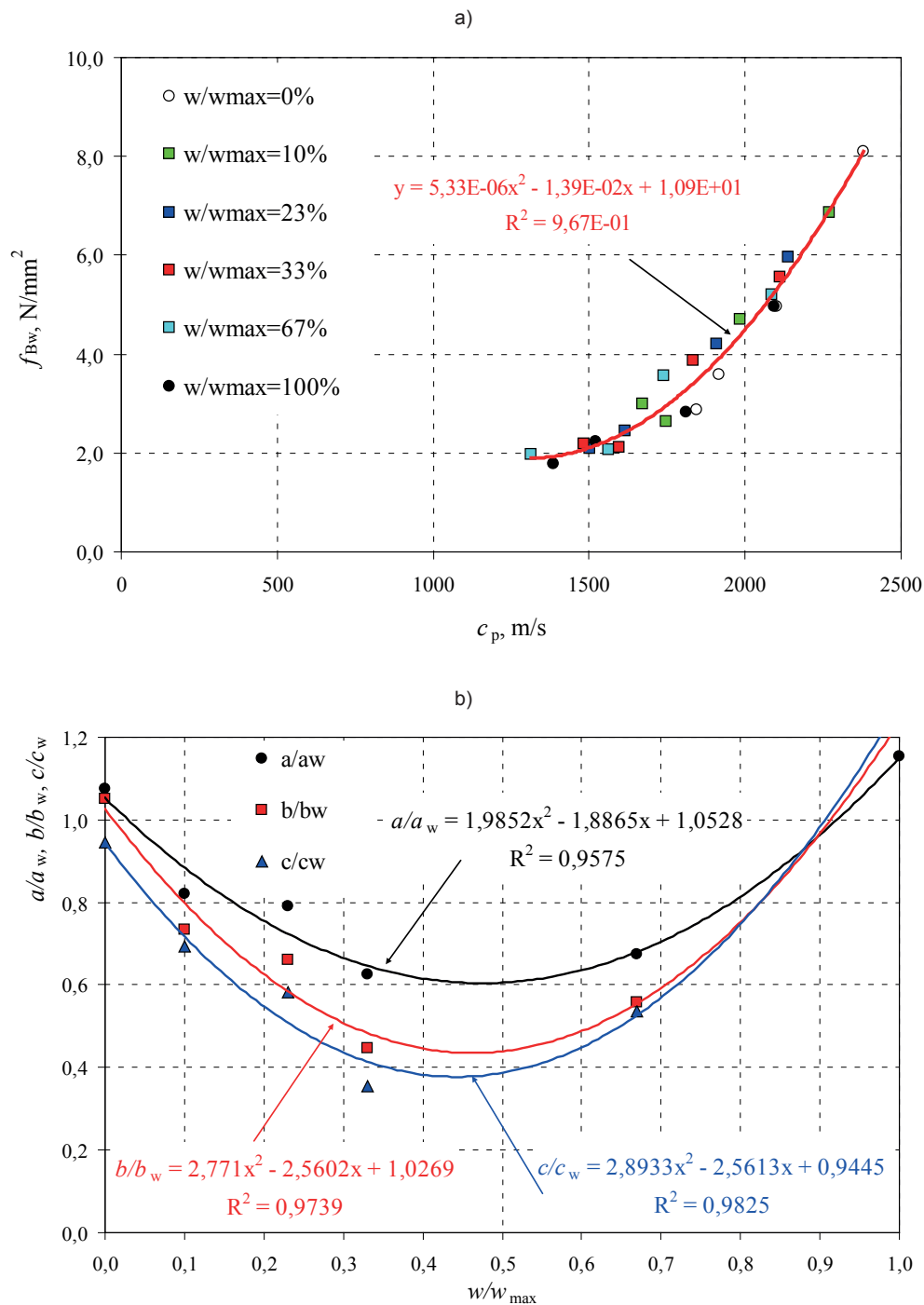
which gives the general form of the basic curve for AAC. In practice, ultrasonic testing should be associated with destructive tests for scaling. In this case, further steps can follow the rules specified in the European standard EN 13791 (2), adjusted to the ordinary concrete.

Taking into account the method of curve calibration using the ultrasonic tomography, the coaxial position of ultrasonic transducers is required in practice. Therefore, arrangement of the transducers or measurements for the taken specimens should be performed with the greatest care.

#### 4. Determination of compression strength with the non-destructive technique of rebound hammer method

##### 4.1. Research method

The non-destructive tests using the Schmidt hammer are the most common non-destructive technique applied for testing the



Rys. 7. Wyniki badań prędkości ultradźwięków: a) wspólna krzywa  $f_{Bw} - c_p$  wszystkich gęstości ABK i wszystkich wilgotności, b) równania współczynników krzywych różnych wilgotności ABK  $f_{Bw}$

Fig. 7. Test results for ultrasonic velocity: a) common curve  $f_{Bw} - c_p$  for all AAC densities and moisture levels, b) equations for curve coefficients at varying moisture content in AAC  $f_{Bw}$

zasad podanych w europejskiej normie EN 13791 (2), stosowanej w przypadku betonu zwykłego.

Ze względu na metodę przepuszczenia stosowaną do kalibracji krzywych, w praktyce wymagane jest współosiowe ułożenie głowic ultradźwiękowych. Dlatego największą staranność należy stosować do ustalenia głowic, lub prowadzić pomiary na pobranych próbkach.

structures (11-13). Because in the masonry structures this method can be used only for masonry units - bricks, cubes, natural or cut stone - the range of its application is more limited than in case of the ultrasonic technique. The tests are performed to measure surface hardness of the material, which is based on the principle that energy of the hammer or pendulum hit, is absorbed by the material.

Parameters of the fundamental base curves were tested with the rebound hammer method, on the specimens trimmed from whole masonry units with dimensions of 180 x 240 x 560 mm – Fig. 8a. Based on the national experience and analyses, considering the

Tablica 2 / Table 2

## ZESTAWIENIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKÓW ORAZ RÓWNAŃ KRZYWYCH EMPIRYCZNYCH

## COMPARISON OF COEFFICIENTS AND EQUATIONS FOR EMPIRICAL CURVES

$w/w_{\max}$	Współczynnik krzywej / Curve coefficient			$R^2$	Równanie krzywej / Curve equation
	a	b	c		
0	$5.73 \cdot 10^{-6}$	$-1.46 \cdot 10^{-2}$	10.30	0.99	$f_{Bw} = 5,73 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,46 \cdot 10^{-2}c_p + 10,3$
0.1	$4.37 \cdot 10^{-6}$	$-1.02 \cdot 10^{-2}$	7.56	0.97	$f_{Bw} = 4,37 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,02 \cdot 10^{-2}c_p + 7,56$
0.23	$4.22 \cdot 10^{-6}$	$-9.19 \cdot 10^{-3}$	6.35	0.99	$f_{Bw} = 4,22 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 9,19 \cdot 10^{-3}c_p + 6,35$
0.33	$3.33 \cdot 10^{-6}$	$-6.21 \cdot 10^{-3}$	3.88	0.98	$f_{Bw} = 3,33 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 6,21 \cdot 10^{-3}c_p + 3,88$
0.67	$3.59 \cdot 10^{-6}$	$-7.75 \cdot 10^{-3}$	5.84	0.95	$f_{Bw} = 3,59 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 7,75 \cdot 10^{-3}c_p + 5,84$
1	$6.15 \cdot 10^{-6}$	$-1.72 \cdot 10^{-2}$	13.90	0.98	$f_{Bw} = 6,15 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,72 \cdot 10^{-3}c_p + 13,90$
Wspólna krzywa/ Common curve	$a_w = 5.33 \cdot 10^{-6}$	$b_w = -1.39 \cdot 10^{-2}$	$c_w = 10.90$	0.97	$f_{Bw} = 5,33 \cdot 10^{-6}(c_p)^2 - 1,39 \cdot 10^{-2}c_p + 10,9$

#### 4. Wyznaczanie wytrzymałości na ściskanie nieniszcząca [NDT] metodą sklerometryczną

##### 4.1. Metoda badań

Badania nieniszczące młotkiem Schmidta są jedną z najczęściej stosowanych technik NDT, do badań konstrukcji (11-13). W przypadku konstrukcji murowych może ona dotyczyć tylko elementów murowych - cegieł, bloczków, kamienia naturalnego lub ciętego, dlatego możliwość zastosowań jest bardziej ograniczona od metody ultradźwiękowej. Wynikiem badania jest pomiar twardości powierzchniowej materiału, która opiera się na zasadzie, że energia uderzenia bijaka lub wahadła, jest pochłaniana przez materiał.

Parametry podstawowych krzywych w metodzie sklerometrycznej wykonano na próbkach wyciętych z całych elementów murowych, o wymiarach 180×240×560 mm – rys. 8a. Wykorzystując krajowe doświadczenia i analizy wpływu różnych czynników na wyniki badań sklerometrycznych (13, 39), pomiary wykonano przy różnych naprężeniach ściskających (40) i różnych wilgotnościach. Do badań posłużyły próbki odmiany 600 kg/m<sup>3</sup> nawilżane wodą do wilgotności względnych wynoszących  $w = 64\%$ ,  $53\%$ ,  $34\%$  oraz próbki wysuszone do stałej masy  $w/w_{\max} = 0\%$ . Do badań wykorzystano wahadłowy młotek Schmidta OS-120PT [Proceq SA, Schwerzenbach, Switzerland], o energii uderzeniowej 0,833 J i odbiciu na kowadło kontrolnym, wynoszącym  $176 \pm 3$  – rys. 9. Badania wykonano w maszynie wytrzymałościowej, w której elementy ustawiono pionowo i wywołano wstępne naprężenia ściskające. Zwiększając naprężenia skokowo co 0,01 N/mm<sup>2</sup>, ustalono wartość naprężeń, przy których liczba odbicia nie ulegała zmianom spowodowanym możliwymi przemieszczeniami elementów (40). Wstępne naprężenia ściskające, przy których wykonano badania wyniosły 0,05 N/mm<sup>2</sup> – rys. 8b.

effect of various factors on results of rebound hammer tests (13, 39), these tests were performed at various compressive strengths (40) and various moisture contents. The specimens with density of 600 kg/m<sup>3</sup> were moistened with water until reaching relative moisture content  $w = 64\%$ ,  $53\%$ , and  $34\%$ , and the specimens dried until constant mass  $w/w_{\max} = 0\%$  were used in tests. The pendulum Schmidt hammer OS-120PT [Proceq SA, Schwerzenbach, Switzerland] with impact energy 0.833 J and rebound on the test anvil  $176 \pm 3$  – Fig. 9. The tests were carried out using the testing machine, in which the elements were placed vertically and then initial compressive stresses were imparted. By gradually increasing stresses every 0.01 N/mm<sup>2</sup>, the stresses were determined at which the rebound number was not affected by potential displacements of the elements (40). The initial compressive stress, at which the tests were performed, was equal to 0.05 N/mm<sup>2</sup> – Fig. 8b.

##### 4.2. Preliminary results from tests in air-dry state

The tests in the air-dry state were conducted on two opposite surfaces of the elements. Six measurements were performed for each surface. The results are presented in Table 3.

At moisture content  $w = 0\%$ , the average rebound number was 58.7, and compressive strength of the standard specimens 100 x 100 x 100 mm was  $f_b = 4.95$  N/mm<sup>2</sup>. The obtained ratio of the average strength and the rebound number equal to 0.084 can be used in the range of densities from 562 to 619 kg/m<sup>3</sup>.

##### 4.3. Preliminary results from tests in wet state

The relationship (8) was used to determine the maximum moisture content of the specimens  $w_{\max} = 64\%$ , and relative moisture levels, at which the tests were performed, were  $w/w_{\max} = 100\%$ ,  $82\%$ ,  $53\%$ . The rebound hammer tests were carried out for each relative moisture content. Their results are compared in Table 3 and in Fig. 10.





Rys. 8. Badania sklerometryczne ABK: a) widok próbek z ABK – 180×240×560 mm w trakcie suszenia, b) badania liczby odbicia w maszynie wytrzymałościowej; 1 – badana próbka z ABK, 2 – głowice maszyny wytrzymałościowej, 3 – wahadłowy młotek Schmitda typu OS-120PT

Fig. 8. Rebound hammer tests on AAC: a) AAC specimens 180 × 240 × 560 mm during drying, b) tests of rebound number in the testing machine; 1 – AAC specimen tested 2 – heads of the testing machine, 3 – pendulum Schmidt hammer OS-120PT

#### 4.2. Wstępne wyniki badań w stanie powietrzno-suchym

Badania wykonano w stanie powietrzno-suchym na dwóch przeciwległych powierzchniach elementów. Na każdej powierzchni wykonano po 6 pomiarów. Wyniki podano w tabelicy 3.

Przy wilgotności wynoszącej  $w = 0\%$  otrzymano średnią liczbę odbicia wynoszącą 58,7, a wytrzymałość na ściskanie normowych próbek 100x100x100 mm wynosiła  $f_b = 4,95 \text{ N/mm}^2$ . Otrzymał iloraz średniej wytrzymałości i liczby odbicia wynosił 0,084, który może być wykorzystywany w zakresie gęstości od 562 do 619  $\text{kg/m}^3$ .

#### 4.3. Wstępne wyniki badań w stanie wilgotnym

Wykorzystując zależność [8] określono maksymalną wilgotność próbek wynoszącą  $w_{\max} = 64\%$ , a wilgotności względne, przy których przeprowadzono badania, wynosiły  $w/w_{\max} = 100\%$ , 82%, 53%. Przy każdej ze względnych wilgotności wykonano badania sklerometryczne, a wyniki zestawiono w tabelicy 3 i na rys. 10.

Ze wzrostem wilgotności stwierdzono wyraźny spadek liczby odbicia, maksymalnie rzędu 43%. Zarówno w formacie bezwzględnym jak i względnym, empiryczna zależność opisująca zmiany liczby odbicia może być opisana liniowo w postaci:

$$L_{mv} = -28,6w + 58, R^2 = 0,96 \quad [17]$$

$$L_{mv} = -18,4 \left( \frac{w}{w_{\max}} \right) + 58, R^2 = 0,96 \quad [18]$$

Wykorzystując zależność [10] obliczono wytrzymałość betonu wilgotnego, które zestawiono w tabelicy 3 i pokazano na rys. 11.

Wzrost wilgotności wywołał wyraźny spadek wytrzymałości na ściskanie. W zasadzie do wilgotności względnej 82% stwierdzono tendencję liniową. Wzrost wilgotności do wartości maksymalnej spowodował niemal skokowy spadek wytrzymałości. Wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów prosta podstawa, może być opisana w następujący sposób:

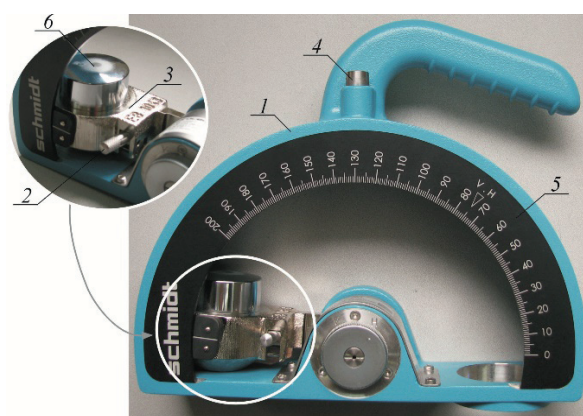
A clear drop in the rebound number by no more than 43% was found, served at an increasing moisture content. The empirical relationship expressing changes in the rebound number, can be described linearly in both absolute and relative form as:

$$L_{mv} = -28,6w + 58, R^2 = 0,96 \quad [17]$$

$$L_{mv} = -18,4 \left( \frac{w}{w_{\max}} \right) + 58, R^2 = 0,96 \quad [18]$$

Based on the relationship [10], strength was calculated for wet concrete. These values are presented in Table 3 and in Fig. 11.

An increase in moisture content caused a clear drop in compressive strength. The linear trend was generally observed until the moisture level of 82%. An increase in moisture content to the maximum value, caused nearly abrupt drop in strength. The base line determined with the method of the least squares can be described in the following way:



Rys. 9. Budowa wahadłowego młotka Schmitda typu OS-120PT: 1 – obudowa, 2 – przełącznik pozycji pracy młotka, 3 – masa uderzeniowa, 4 – przycisk zwalnający, 5 – skala, 6 – trzpień uderzeniowy

Fig. 9. Design of the pendulum hammer Schmidt OS-120PT: 1 – housing, 2 – reset lever, 3 – hammer complete, 4 – trigger button, 5 – scale, 6 – hammer head

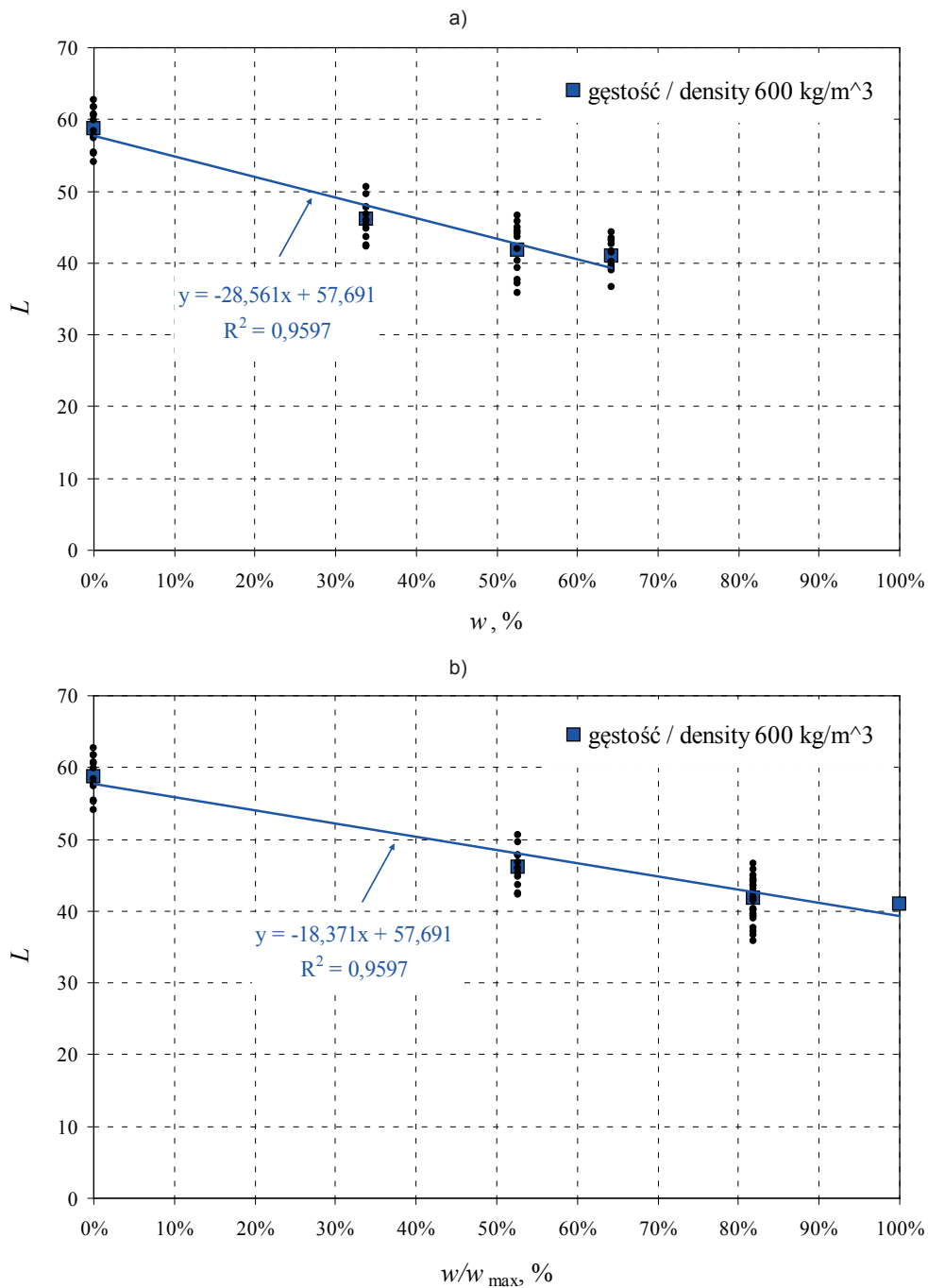


Tablica 3 / Table 3

WYNIKI POMIARÓW SKLEROMETRYCZNYCH

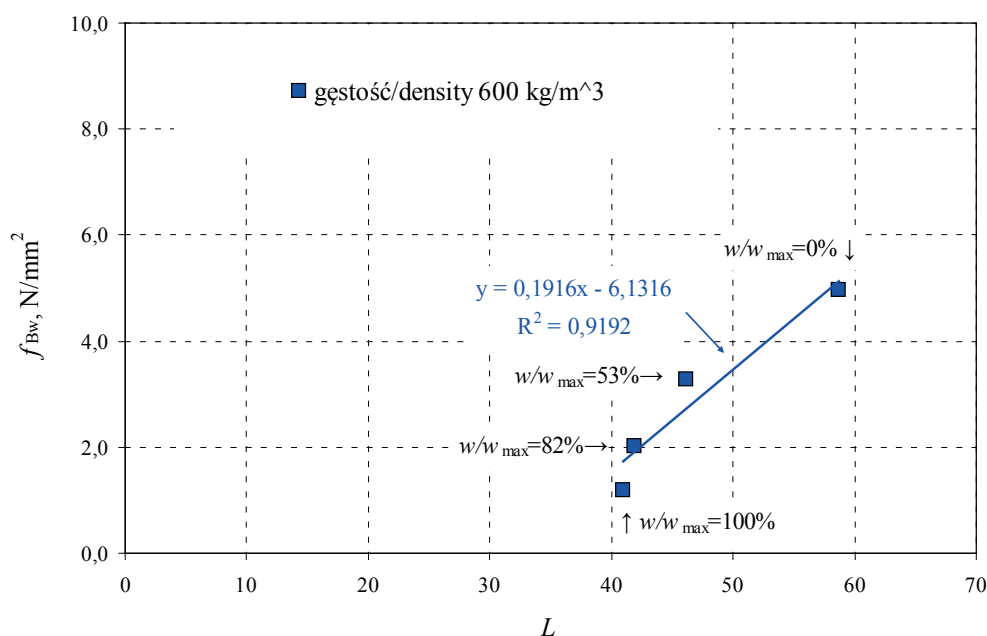
RESULTS FROM REBOUND HAMMER TESTS

Wilgotność / Moisture, %	$w/w_{max}$	Liczba odbicia/ Rebound numer, $L_i$												$L_{mv}$	$f_{Bw}$ , N/mm <sup>2</sup> , wg (10)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
0	0	61	62	55	60	58	55	61	63	54	62	58	57	58.7	4.95
34%	0.53	50	44	48	47	46	45	48	43	45	51	42	46	46.1	3.27
53%	0.82	47	37	36	45	42	45	46	38	39	44	40	44	41.8	2.02
64%	1.0	44	42	39	42	40	40	44	43	37	43	40	39	41.0	1.19



Rys. 10. Wyniki badań sklerometrycznych ABK odmiany 600 kg/m<sup>3</sup>: a) liczba odbicia w funkcji wilgotności w, b) liczba odbicia w funkcji względnej wilgotności  $w/w_{max}$

Fig. 10. Test results for AAC with density of 600 kg/m<sup>3</sup>: a) rebound number as a function of moisture content w, b) rebound number as a function of relative moisture  $w/w_{max}$



Rys. 11. Wyniki badań sklerometrycznych ABK odmiany 600 kg/m<sup>3</sup> w funkcji wytrzymałości na ściskanie

Fig. 11. Results from rebound hammer tests on AAC of type 600 kg/m<sup>3</sup> as a function of compressive strength

$$f_{Bw,L} = 0,20L - 6,14, R^2 = 0,91. \quad [19]$$

$$f_{Bw,L} = 0,20L - 6,14, R^2 = 0,91. \quad [19]$$

Duża wartość współczynnika  $R^2$  wskazuje, że korelacja jest istotna, na poziomie nie mniejszym niż 5%. Do określania kompletnej metody potrzebne są badania pozostałych gęstości ABK, w stanie powietrzno-suchym oraz wilgotny, W ten sposób opracowana zostanie uniwersalna krzywa pozwalająca wyznaczyć wytrzymałość na ściskanie ABK, z uwzględnieniem gęstości i wilgotności.

High value of coefficient  $R^2$  indicates that the correlation was significant, at the level not lower than 5%. The complete method requires tests on other densities of AAC, in dry-air and wet states. They will be used to develop the universal curve, to determine compressive strength of AAC, with taking into account of density and moisture content.

## 5. Przykład

Z nieotynkowanej, zawilgoconej ściany budynku, wykonanej z elementów murowych z ABK, pobrano 9 rdzeni wiertnicą o nominalnej średnicy 65 mm. W każdym miejscu, w którym pobierano rdzenie, wykonano pomiar wilgotności  $w$  metodą elektrooporową, pomiar prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej  $c_p$  głowicami stożkowymi częstotliwości 54 kHz oraz badania liczby odbicia  $L$  wahadłowego młotka, typu P. Następnie próbki docięto do długości odpowiadającej w przybliżeniu wysokości i wysuszono do stałej masy, zważono i otrzymano gęstość  $P$ , w stanie powietrzno-suchym. Po usunięciu wszystkich niezwiązanych ziaren kruszywa, próbki zbadano na ściskanie odczytując wytrzymałość  $f_c$ . Do wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie w stanie zawilgoconym  $f_{Bw}$  obliczono współczynniki  $a$ ,  $b$ ,  $c$  oraz współczynnik korekcyjny  $\Delta b$  krzywej empirycznej. Po określeniu równania krzywej obliczono wytrzymałość na ściskanie próbek normowych 100x100x100 mm w stanie powietrzno-suchym  $f_B$ , a następnie poszukiwaną wytrzymałość  $f_{Bw}$  z uwzględnieniem wilgotności materiału. Wyniki badań podano w tablicy 4.

W każdym punkcie przed pobraniem rdzeni wykonano co najmniej trzy pomiary prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej, aż do chwili ustabilizowania się odczytu czasu przejścia. Następnie wyznaczono prędkość fali  $c_p$ . Uwzględniając podstawową krzywą

## 5. Example

Nine cores were drilled with a bit with a nominal diameter of 65 mm, from the unplastered and wet AAC wall in the building. For each point, from which the core was drilled, the following measurements were taken: moisture content  $w$  with the electro-resistant method, velocity of longitudinal ultrasonic wave  $c_p$  with conical transducers 54 kHz, and the rebound number  $L$  of the pendulum hammer, of P type. The specimens were cut to the length corresponding to approximate height and dried until constant weight, and then they were weighed. The obtained density  $P$  was referred to the air-dry state. After removing all uncompacted aggregate particles, the specimens were tested. The coefficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$  and the correction factor  $\Delta b$  of the empirical curve were calculated, to determine compressive strength in the wet state  $f_{Bw}$ . After developing an equation for the curve, compressive strength of the standard specimens 100 x 100 x 100 mm was determined in the air-dry state  $f_B$ , and then the strength  $f_{Bw}$ , including material moisture was determined. The test results are presented in Table 4.

Prior to drilling the specimens, at each point at least three measurements of velocity of the longitudinal ultrasonic wave were taken, until reading of the passing time was stabilized. Then, the wave velocity  $c_p$  was determined. Taking into account the fundamental

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI BADAŃ NISZCZĄCYCH PRÓBEK POBRANYCH Z KONSTRUKCJI

RESULTS FROM NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THE SPECIMENS TAKEN FROM THE STRUCTURE

Lp.	d, mm	h, mm	$f_c$ , N/mm <sup>2</sup>	w, % [7]	P, kg/m <sup>3</sup>	a [5]	b [6]	$\Delta b$ [4]	$f_B$ , N/mm <sup>2</sup> [4]	$w_{max}$ , % [8]	$f_{Bw}$ , N/mm <sup>2</sup> [9] lub [10]
1	65	65	4.20	10%	552	0.329	0.722	0.114	3.99	66%	3.40
2	66	64	4.80	9%	598	0.375	0.691	0.122	4.51	60%	3.85
3	64	64	3.90	7%	597	0.374	0.691	0.122	3.67	61%	3.24
4	65	65	4.20	2%	566	0.343	0.712	0.116	3.98	64%	3.83
5	67	63	4.60	4%	563	0.340	0.714	0.116	4.33	65%	4.07
6	65	65	4.80	23%	617	0.393	0.679	0.125	4.51	58%	2.81
7	65	64	4.80	12%	556	0.333	0.719	0.114	4.53	66%	3.74
8	64	65	4.80	7%	598	0.374	0.691	0.122	4.56	60%	4.03
9	65	64	4.80	11%	574	0.352	0.707	0.118	4.51	63%	3.72
										$f_{Bw,mv} = 3.63 \text{ N/mm}^2$	
										$f_k = 2.24 \text{ N/mm}^2$	

bazową wiążącą prędkość ultradźwięku z wilgotnością obliczono współczynniki a, b i c a następnie wyznaczono poszukiwaną wytrzymałość  $f_{Bw}$ . Wyniki pomiarów zamieszczono w tablicy 5.

Po wykonaniu pomiarów ultradźwiękowych przeprowadzono pomiary liczby odbicia młotkiem wahadłowym. W każdym punkcie wykonano, co najmniej 12 pomiarów, a następnie wyznaczono medianę wyników. Ponieważ gęstość badanego ABK wynosiła 552 – 617 kg/m<sup>3</sup> i odpowiadała ABK odmiany 600 wykorzystano opracowaną zależność empiryczną i w każdym punkcie obliczono wytrzymałość na ściskanie wilgotnego ABK -  $f_{Bw}$ .

Stosując metodę zawartą w poradniku (13) wykorzystującym na projekt normy (3) - znowelizowanej normy (2), w każdym punkcie pomiarowym obliczono różnicę wytrzymałości ABK na ściskanie, uzyskaną z badań próbek odwiertów - tablica 4, a wyznaczonymi

Tablica 5 / Table 5

WYNIKI BADAŃ NIENISZCZĄCYCH METODĄ ULTRADŹWIEKOWĄ

RESULTS FROM NON-DESTRUCTIVE TESTS WITH ULTRASONIC METHOD

Lp.	$c_p$ , m/s	a [13]	b [14]	c [15]	$f_{Bw,C}$ , N/mm <sup>2</sup> [16]	$\delta f_i = f_{Bw} - f_{Bw,C}$ N/mm <sup>2</sup>
1	2046	4,31E-06	-9,79E-03	6.72	4.73	-1.34
2	1993	4,31E-06	-9,81E-03	6.74	4.33	-0.48
3	1899	4,53E-06	-1,06E-02	7.33	3.60	-0.35
4	1903	5,23E-06	-1,30E-02	9.23	3.39	0.44
5	1796	5,01E-06	-1,23E-02	8.64	2.79	1.29
6	1781	3,28E-06	-6,31E-03	4.16	3.35	-0.53
7	1783	4,12E-06	-9,14E-03	6.23	3.03	0.71
8	1902	4,55E-06	-1,06E-02	7.37	3.61	0.42
9	1995	4,12E-06	-9,13E-03	6.22	4.40	-0.68
	1900	4,39E-06	-1,01E-02	6.96	$f_{Bw,mv} = 3.70 \text{ N/mm}^2$	$\delta f_{m(n)} = -0.06$
					Odchylenie standardowe próby Standard deviation of the specimen, $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (\delta f_i - \delta f_{m(n)})^2}{n - 1}} =$	0.82

z podstawowych krzywych regresji - tablice 5 i 6. Następnie obliczono wartość średnią różnic  $\delta f_{m(n)}$ , z  $n$  pomiarów. Na podstawie podstawowych krzywych podstawowych obliczono parametr przesunięcia podstawowych krzywych:

- metoda ultradźwiękowa:

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - t_p \sqrt{\frac{n-1}{n(n-2)}} s = -0,06 - 1,41 \cdot \sqrt{\frac{9-1}{9(9-2)}} 0,82 = -0,47 \text{ N/mm}^2,$$

- metoda sklerometryczna:

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - t_p \sqrt{\frac{n-1}{n(n-2)}} s = 0,25 - 1,41 \cdot \sqrt{\frac{9-1}{9(9-2)}} \cdot 0,59 = -0,05 \text{ N/mm}^2,$$

gdzie:

$t_p$  – statystyka rozkładu t-Studenta, przyjęta dla liczby stopni swobody  $n-2$  i założonym poziomie istotności  $\alpha$  – prawdopodobieństwo  $p$  określonym jako  $\alpha/2 = 1-p$ .

Po uwzględnieniu parametrów przesunięcia, skorygowane krzywe podstawowe przyjęły postać:

- metoda ultradźwiękowa:

$$f_{Bw} = 4,39 \cdot 10^{-6} (c_p)^2 - 1,01 \cdot 10^{-2} c_p + 6,96 - \underbrace{0,47}_{\Delta f}, \quad [20]$$

- metoda sklerometryczna:

$$f_{Bw} = 0,20L - 6,14 - \underbrace{0,05}_{\Delta f}. \quad [21]$$

Wykorzystując metodę MDT uzyskano dla próbek ABK, pobranych z konstrukcji, wytrzymałość na ściskanie wynoszącą  $3,63 \text{ N/mm}^2$ , a wyznaczona na tej podstawie typowa wytrzymałość na ściskanie muru z ABK wyniosła  $f_k = 0,75 \cdot 3,63^{0,85} = 2,25 \text{ N/mm}^2$ . Stosując nieniszczące metody badań, według skorygowanych krzywych [20] i [21] otrzymano wytrzymałości na ściskanie wynoszące:

- metoda ultradźwiękowa:

$$f_{Bw} = 4,39 \cdot 10^{-6} (1900)^2 - 1,01 \cdot 10^{-2} (1900) + 6,96 - 0,47 = 3,18 \text{ N/mm}^2, \quad [22]$$

- metoda sklerometryczna:

$$f_{Bw} = 0,20 \cdot 47,6 - 6,14 - 0,05 = 3,34 \text{ N/mm}^2. \quad [23]$$

Stosując dwie metody NDT, można w sposób racjonalny wyznaczyć wytrzymałość na ściskanie wilgotnego ABK  $f_{Bw}$ , a na tej podstawie typową wytrzymałość na ściskanie muru. W tym celu zastosowano następującą metodę. Na podstawie wyników badań ultradźwiękowych wyznaczono wartość średnią i wartości ekstremalne wynoszące:

Tablica 6 / Table 6

WYNIKI BADAŃ NIENISZCZĄCYCH METODĄ SKLEROMETRYCZNA  
RESULTS FROM NON-DESTRUCTIVE TESTS WITH REBOUND HAMMER METHOD

Lp.	L	$f_{Bw,L}$ , N/mm <sup>2</sup> [19]	$\delta f_i = f_{Bw} - f_{Bw,L}$ N/mm <sup>2</sup>
1	45	2.86	0.54
2	46	3.06	0.79
3	46	3.00	0.24
4	52	4.26	-0.43
5	48	3.46	0.61
6	49	3.66	-0.85
7	50	3.86	-0.12
8	47	3.26	0.77
9	46	3.06	0.66
	47.6	$f_{Bw,mv} = 3.39 \text{ N/mm}^2$	$\delta f_{m(n)} = 0.25$
		Odchylenie standardowe próby Standard deviation of the specimen, s=	0.59

determined from the fundamental regression curves [Tables 5 and 6]. Then, the average difference  $\delta f_{m(n)}$  was calculated from  $n$  measurements. The shift parameter was calculated on the basis of the fundamental curves:

- with the ultrasonic method:

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - t_p \sqrt{\frac{n-1}{n(n-2)}} s = -0,06 - 1,41 \cdot \sqrt{\frac{9-1}{9(9-2)}} 0,82 = -0,47 \text{ N/mm}^2,$$

- with the rebound hammer method:

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - t_p \sqrt{\frac{n-1}{n(n-2)}} s = 0,25 - 1,41 \cdot \sqrt{\frac{9-1}{9(9-2)}} \cdot 0,59 = -0,05 \text{ N/mm}^2,$$

where:

$t_p$  – statistics with the Student's t-distribution at  $n-2$  degrees of freedom and the assumed statistical significance  $\alpha$  – the probability  $p$ , specified as  $\alpha/2 = 1-p$ .

Taking into account the shift parameters, the corrected base curves took the following form:

- with the ultrasonic method:

$$f_{Bw} = 4,39 \cdot 10^{-6} (c_p)^2 - 1,01 \cdot 10^{-2} c_p + 6,96 - \underbrace{0,47}_{\Delta f}, \quad [20]$$

- with the rebound hammer method:

$$f_{Bw} = 0,20L - 6,14 - \underbrace{0,05}_{\Delta f}. \quad [21]$$

$$f_{1m} = 3,18 \text{ N/mm}^2,$$

$$f_{1min} = 2,46 \text{ N/mm}^2,$$

$$f_{1max} = 4,24 \text{ N/mm}^2.$$

Podobnie określono wytrzymałości uzyskane metodą sklerometryczną:

$$f_{2m} = 3,34 \text{ N/mm}^2,$$

$$f_{2min} = 2,81 \text{ N/mm}^2,$$

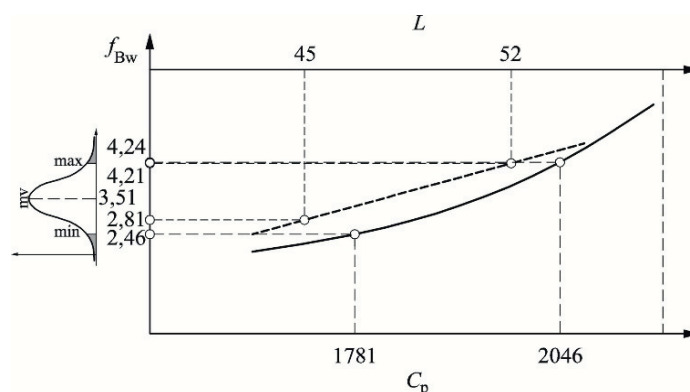
$$f_{2max} = 4,21 \text{ N/mm}^2.$$

Uwzględniając, że  $f_{min} = f_{2min} = 2,81 \text{ N/mm}^2$  oraz  $f_{max} = f_{2max} = 4,21 \text{ N/mm}^2$  i zakładając normalny rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa wytrzymałości na ściskanie [13] – rys. 12 wyznaczono średnią wytrzymałość betonu wynoszącą  $f_{Bw} = (2,81 + 4,21)/2 = 3,51 \text{ N/mm}^2$ . Typowa wytrzymałość tego muru na ściskanie wynosiła  $2,18 \text{ N/mm}^2$ , a więc >5% mniejsza od wytrzymałości wyznaczonej metodą DT.

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzono badania ABK w celu potencjalnego wykorzystania do badań diagnostycznych, konstrukcji murowych. Wykazano, że maksymalna wilgotność rośnie odwrotnie proporcjonalnie do gęstości ABK oraz, że wilgotność wyraźnie zmniejsza wytrzymałość w stosunku do wytrzymałości ABK, badanego w stanie powietrzno - suchym. Największe bo ponad 30% zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie uzyskano przy wilgotnościach rzędu  $w = 0 - 30\%$ . Ma to szczególne znaczenie, ponieważ wilgotność eksploatacyjna murów wynosi około 10% – 15%. Większe wilgotności wywoływały zmniejszenie wytrzymałości, o około 10%. Stosując nieniszczącą metodę ultradźwiękową, wykazano wyraźny wpływ gęstości, jak i wilgotności. Prędkość ultradźwięków rosła proporcjonalnie do gęstości ABK: maksymalna prędkość wynosiła 2379 m/s w betonie gęstości  $700 \text{ kg/m}^3$ , minimalna prędkość była równa 1847 m/s w betonie gęstości  $400 \text{ kg/m}^3$ . Wzrost wilgotności ABK powodował, że prędkość wyraźnie malała. Opracowano uniwersalne krzywe podstawowe, pozwalające wyznaczyć wytrzymałość ABK w funkcji gęstości, w zakresie  $397 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho \leq 674 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Istotną wadą zaproponowanej metody jest konieczność wykonywania badań metodą skrośną powierzchniową, co wymaga zachowania współosiowości głowic. W związku z tym, skalowanie podstawowej krzywej powinno być wykonane na pobranych z konstrukcji próbkach rdzeniowych.

Rozpoczęto także prace na opracowaniu podobnej krzywej, z wykorzystaniem nieniszczącej metody sklerometrycznej, młotkiem Schmidta typu P. Na wstępie zbadano ABK o nominalnej gęstości  $600 \text{ kg/m}^3$ . Wykazano, że wzrost wilgotności powodował spadek liczby odbicia. Opracowano liniowe korelacje, wiążące wytrzymałość na ściskanie  $f_{Bw}$  – L. Wstępne badania nie upoważniają jeszcze do sformułowania krzywych, analogicznych do metody ultradźwiękowej.



Rys. 11. Ocena wytrzymałości ABK, z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej i sklerometrycznej

Fig. 11. Evaluation of AAC strength, using the ultrasonic and rebound hammer methods.

Using the Minor-Destructive Testing, compressive strength of ACC determined from the specimens taken from the structure was  $3.63 \text{ N/mm}^2$ , and the derived typical compressive strength of the AAC wall was  $f_k = 0.75 \cdot 3.63^{0.85} = 2.25 \text{ N/mm}^2$ . Using the non-destructive methods for the corrected curves [20] and [21], the following compressive strength was obtained:

- with the ultrasonic method:

$$f_{Bw} = 4,39 \cdot 10^{-6} (1900)^2 - 1,01 \cdot 10^{-2} (1900) + 6,96 - 0,47 = 3,18 \text{ N/mm}^2, \quad [22]$$

- with the rebound hammer method:

$$f_{Bw} = 0,20 \cdot 47,6 - 6,14 - 0,05 = 3,34 \text{ N/mm}^2. \quad [23]$$

When two non-destructive methods were employed, the determined compressive strength of wet AAC  $f_{Bw}$  was rational and used to determine typical compressive strength, of the masonry wall. Therefore, the following procedure was followed. Based on the ultrasonic test results, the following average and extreme values were determined:

$$f_{1m} = 3.18 \text{ N/mm}^2,$$

$$f_{1min} = 2.46 \text{ N/mm}^2,$$

$$f_{1max} = 4.24 \text{ N/mm}^2.$$

Strength obtained from the rebound hammer method was calculated in the similar way:

$$f_{2m} = 3.34 \text{ N/mm}^2,$$

$$f_{2min} = 2.81 \text{ N/mm}^2,$$

$$f_{2max} = 4.21 \text{ N/mm}^2.$$

Taking into account that  $f_{min} = f_{2min} = 2.81 \text{ N/mm}^2$  and  $f_{max} = f_{2max} = 4.21 \text{ N/mm}^2$  and assuming the normal distribution of the probability density function for compressive strength (13), the average strength of concrete was determined as  $f_{Bw} = (2.81 + 4.21)/2 = 3.51 \text{ N/mm}^2$ . The corresponding typical compressive strength of the wall was equal to  $2.18 \text{ N/mm}^2$ , thus > 5% lower than the strength determined with the destructive technique.



## Literatura / References

1. W. Kurdowski, *Chemia cementu i betonu*, Stowarzyszenie Producentów cementu. Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków-Warszawa 2013.
2. EN 13791:2008 Assessment of in-situ compressive strength in structures and pre-cast concrete components.
3. CEN/TR 17086 Further guidance on the application of EN 13791:2019 and background to the provisions. June 2020.
4. D. Łątka, P. Matysek, The estimation of compressive stress level in brick masonry using the flat-jack method. *Procedia Eng.* **193**, 266–272 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.213>.
5. M. Corradi, A. Borri, A. Vignoli, Experimental study on the determination of strength of masonry walls. *Constr. Build. Mater.* **11**, 325–337 (2003). [https://doi:10.1016/S0950-0618\(03\)00007-2](https://doi:10.1016/S0950-0618(03)00007-2)
6. ASTM Standard C1196-91 In-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1991.
7. ASTM Standard C1196-14a Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
8. RILEM Recommendation MDT.D.4, In-situ stress tests based on the flat-jack. 2004.
9. RILEM Recommendation MDT.D.5 In situ stress-strain behaviour tests based on the flat-jack. 2004.
10. UIC Code Recommendations for the inspection, assessment and maintenance arch bridges. Final draft. 2008.
11. G. Vasconcelos, P. B. Lourenço, C. A. Alves, J. Pamplona, Prediction of the mechanical properties of granites by ultrasonic pulse velocity and Schmidt hammer hardness. *Ultrasonics*, **48**(5), 453-466 (2008).
12. M. Roknuzzaman, M. B. Hossain, M. I. Mostazid, M. R. Haque, Application of rebound hammer method for estimating compressive strength of bricks. *J. of Civil Eng. Research*, **7**(3), 99-104 (2017). <https://doi.org/10.5923/j.jce.20170703.02>.
13. L. Runkiewicz, J. Sieczkowski, Ocena wytrzymałości betonu w konstrukcjach na podstawie badań sklerometrycznych. *Poradnik. Instytut Techniki Budowlanej*. Warszawa 2022.
14. M. R. Valluzzi, E. Cescatti, G. Cardani, L. Cantini, L. Zanzi, C. Colia, F. Casarin: Calibration of sonic pulse velocity tests for detection of variable conditions in masonry walls. *Constr. Build. Mater.* **192**, 272-286 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.073>
15. B.A. Suprenant, M.P. Schuller, *Nondestr. Eval. & Test. of Masonry Struct.* Hanley Wood Inc., USA, 1994, ISBN 978-0924659577.
16. J. Noland, R. Atkinson, J. Baur, An investigation into methods of non-destructive evaluation of masonry structures. National Science Foundation. National Technical Information Service report No. PB 82218074. 1982.
17. M.P. Schuller, *Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures*. 2006, NSF/FILEM Workshop. In-Situ Evaluation of Historic Wood and Masonry Structures, July 10-16, 2006, Prague, Czech Republic, 67 – 86.
18. D.M. McCann; M.C. Forde, Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT E Int.* **34**, 71 – 84 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00032-3)
19. L. Binda, M. Lualdi, A. Saisi, Non-destructive testing techniques applied for diagnostic investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy. *Int. J. of Archit. Heritage*, **1**(4), 380-402 (2007). <https://doi.org/10.1080/15583050701386029>

## 6. Conclusions

The tests on AAC were conducted with reference to their potential application for diagnostic tests, of the masonry structures. Maximum moisture content was found to increase reversely proportional to AAC density, and moisture significantly reduced strength with reference to the strength of AAC, tested in the air-dry state. The highest 30% reduction in compressive strength was observed at moisture content  $w = 0 - 30\%$ . This observation was particularly important because moisture content of the masonry walls is ca. 10%-15%. Higher moisture levels caused a drop in strength by 10%. The non-destructive ultrasonic testing demonstrated the profound effect of density and moisture. An increase in ultrasonic velocity was proportional to density of AAC - maximum velocity was 2379 m/s in concrete with density of 700 kg/m<sup>3</sup>, minimum velocity was 1847 m/s in concrete with density of 400 kg/m<sup>3</sup>. An increasing moisture content in AAC, caused a significant reduction of the velocity. The universal base curves were developed to determine AAC strength, as the function of density, within the range of  $397 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho \leq 674 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Using the vertical method to conduct the tests, which required the coaxiality of the heads, is the significant drawback of the proposed method. Hence, scaling of the fundamental base curve should be performed for the core specimens, drilled from the structure.

Also the works began on developing the similar curve using the non-destructive technique, with the method of rebound Schmidt hammer of P type. At first, AAC units with a nominal density of 600 kg/m<sup>3</sup> were tested. An increase in moisture content was demonstrated, to reduce the rebound number. The linear correlations for compressive strength  $f_{Bw} - L$  were developed. As these tests were of preliminary nature, they should not be used to elaborate the curves, as in the ultrasonic method.

20. M.C. Forde: International practice using NDE for the inspection of concrete and masonry arch bridges. *Bridge Struct.* **6**(1), 25-34 (2010). <https://doi.org/10.3233/BRS-2010-004>
21. B. Conde, L.F. Ramos, D.V. Oliveira, B. Riveiro, M. Solla, Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: Application to Vilanova bridge. *Eng. Struc.*, **148**, 621-638 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.011>
22. P. Matysek, Compressive strength of brick masonry in existing buildings – research on samples cut from the structures. In *Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges*, 3rd ed; Modena, da Porto & Valluzzi, Eds; © 2016 Taylor & Francis Group, Great Britain, London, ISBN 978-1-138-02999-6, 1741 – 1747.
23. PN-EN 1996-1-1:2010+A1:2013-05P, Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Zasady ogólne dla niezbrojonych i zbrojonych konstrukcji murowych.
24. PN-EN 772-1:2011 Metody badań elementów murowych. Określenie wytrzymałości na ściskanie.
25. A.M. Neville, Właściwości betonu. V edycja. Stowarzyszenie Producentów Cementu. Kraków 2012.
26. K. Kadir, A.O. Celik, M. Tuncan, A. Tuncan, The Effect of Diameter and Length-to-Diameter Ratio on the Compressive Strength of Concrete Cores, *Proc. of Intern. Scientific Conference People, Buildings and Environment 2012*, 219 – 229. ISSN: 1805-6784.
27. F.M. Bartlett, J.G. Macgregor, Effect of Core Diameter on Concrete Core Strengths, 1994, *ACI Mat. J.*, 91(5, Sept.-Oct.), 460 – 470.
28. K. Kirtsching, The Present Idea on the Compressive Strength of Masonry in the Latest Drafts of International Specifications. *Proc. of the 26<sup>th</sup> Meeting of CIB-W23, Darmstadt, September, 1989.*
29. W. Mazur, Ł. Drobiec, R. Jasiński, Effects of specimen dimensions and shape on compressive strength of specific autoclaved aerated concrete. *Ce/Pepers*, **4**(2), 541-556 (2018).
30. R. Jasiński, Ł. Drobiec, W. Mazur, Validation of selected non-destructive methods for determining the compressive strength of masonry units made of autoclaved aerated concrete. *Materials*, **12**(3), 389, 1-21 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12030389>.
31. L. Binda: Learning from failure – Long-term behaviour of heavy masonry structures. In *Structural Analysis of Historic Construction*, ed; D'Ayala & Fodde, 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46872-5, 1345–1355.
32. G. Zapotoczna-Sytek, S. Balkovic: Autoklawizowany beton komórkowy. *Technologia, właściwości, zastosowanie*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
33. T Rybarczyk.: Wilgotność elementów i konstrukcji z betonu komórkowego. *Mat. Bud.*, 2019, 2, 26-27.
34. P. Gębarowski; K. Łaskawiec: Correlations between physicochemical properties and AAC porosity structure, *Mat. Bud.*, **2015**(11), 214–216 (2015).
35. F.M. Bartlett, J.G. Macgregor, Effect of Moisture Condition on Concrete Core Strengths. *ACI Mat. J.* **91**(3), 227–236 (1993).
36. R. Jasiński, Determination of AAC masonry compressive strength by semi destructive method. *Nondestructive Testing and Diagnostics*, **2018**(3), 81–85 (2018). <https://doi.org/10.26357/BNiD.2018.029>.
37. V.G. Haach, F.C. Ramirez, Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography. *Constr. Build. Mater.* **119**, 61–70 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.056>.
38. K. Schabowicz, Ultrasonic tomography — The latest nondestructive technique for testing concrete members — Description, test methodology, application example. *Arch. Civ. Mech. Eng.* **14**, 295–303 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.10.006>
39. L. Runkiewicz, Wpływ wybranych czynników na wyniki badań sklerometrycznych betonu. Wydawnictwo ITB, Warszawa 1991.
40. L. Runkiewicz, Wpływ naprężenia w betonie na ocenę jego wytrzymałości i jednorodności młotkiem Schmidta. *Mat. I. Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących w budownictwie*, Wydawnictwo ITB, Warszawa 1974.