dr inż. Maria Tunkiewicz[1)]
ORCID: 0000-0002-7189-5951
mgr inż. Joanna Misiewicz[1)*)]
ORCID: 0000-0003-0613-0167
inż. Kinga Lechowicz[1)]
ORCID: 0009-0002-4037-0420
tech. Hubert Rochalski[1)]
ORCID: 0009-0000-4491-5972
tech. Szymon Olender[1)]
ORCID: 0009-0007-0008-7563

Estimation of the risk of frost damage to historic Gothic walls in places of modern repairs based on the assessment of the size and distribution of pores

Szacowanie ryzyka zniszczeń mrozowych zabytkowych murów gotyckich w miejscach współczesnych napraw na podstawie oceny wielkości i rozkładu porów

DOI: 10.15199/33.2024.08.04

Abstract. The aim of the work was to determine the risk of frost damage in places where historic Gothic walls were supplemented with currently produced bricks. The main experimental material included brick samples from four medieval constructions located in the north-east of Poland. The comparison material were currently produced bricks from brickyards manufacturing handmade bricks. To assess the risk of frost damage for individual bricks tests using mercury porosimetry were carried out. The research made it possible to determine the size and number of pores in tested material. Based on the results obtained, the frost resistance of contemporary manufactured bricks was estimated, materials appropriate to conservation works and ensuring at the same time a homogenous structure of the restored masonry were indicated.

Keywords: clay bricks; historical buildings; resistance to freeze-thaw cycles; MIP.

Streszczenie. Celem pracy było określenie ryzyka powstawania zniszczeń mrozowych w miejscach uzupełnień zabytkowych gotyckich murów przy użyciu współcześnie produkowanych cegieł. Materiał do badań obejmował próbki cegieł pochodzących z czterech gotyckich obiektów zlokalizowanych w północno-wschodniej części Polski, a materiał porównawczy stanowiły współcześnie produkowane wyroby ceramiczne pochodzące z cegielni zajmujących się produkcją cegieł ręcznie formowanych. W celu oceny ryzyka powstawania zniszczeń mrozowych poszczególnych cegieł przeprowadzono badania przy użyciu porozymetrii rtęciowej pozwalające na określenie rozmiarów i liczby porów w badanym materiale. Na podstawie uzyskanych wyników badań oszacowano odporność współcześnie produkowanych cegieł na działanie mrozu oraz wskazano materiały właściwe pod kątem wykonania prac konserwatorskich, zapewniających jednocześnie jednorodną strukturę odrestaurowywanego muru.
Słowa kluczowe: cegły ceramiczne; obiekty zabytkowe; odporność mrozowa; porozymetria rtęciowa.

With the emergence of the Gothic style in Poland (at the turn of the 14th and 15th centuries), the use of ceramic unit became common and the fired brick became an essential building material. Brick buildings are an important part of Polish architecture and the most valuable group among them are constituted by buildings erected in the Middle Ages. As such they are subject to special conservation protection. Consequently, in the process of renovating historical structures, it is crucial to pay attention not only to the quality of the work but also to the selection of appropriate materials in order to ensure the greatest possible homogeneity of the repaired wall.

One of the main causes of brick damage due to atmospheric conditions, particularly in historical buildings lacking moisture protection, is the freezing of water in the material's pores. In the case of bricks, the process of water

Wraz z pojawieniem się w Polsce stylu gotyckiego (na przełomie XIV i XV w.), zastosowanie cegły ceramicznej znacznie się rozpowszechniło. Ceglane obiekty zabytkowe stanowią do dziś znaczącą część polskiej architektury, a wśród nich niezwykle istotną grupę stanowią budowle wzniesione w średniowieczu i jako takie są przedmiotem szczególnej ochrony konserwatorskiej. W związku z tym w procesach renowacji zabytków ogromną uwagę należy zwracać nie tylko na jakość wykonywanych prac, ale przede wszystkim na dobór właściwych materiałów, które pozwolą zapewnić jak największą jednorodność naprawianego muru.

Jedną z głównych przyczyn zniszczenia cegieł poddanych działaniu warunków atmosferycznych, a jednocześnie pozbawionych ochrony przeciwwilgociowej, szczególnie w budynkach historycznych, jest zamarzanie wody w porach materiału. W przypadku cegieł proces zamarzania wody zaczyna się w dużych porach i wraz ze spadkiem temperatury zjawisko to obejmuje pory o mniejszej średnicy. Podczas zamarzania wo-

[1)] Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Wydział Geoinżynierii
[*)] Correspondence address: joanna.misiewicz@uwm.edu.pl

freezing begins in large pores, and with decreasing temperature, it affects pores with smaller diameters. During freezing, the expanding water can cause an increase in internal stresses within the material. If there is no possibility for the freezing water to expand, and the increase in stress exceeds the brick's strength, structural damage to the brick occurs.

The article specifies the properties of historical bricks from Gothic structures and contemporary bricks produced with the aim of finding a correlation between their structure and determining compatibility between materials used in the past and those currently produced for conservation purposes. Mercury porosimetry was used to investigate the distribution and size of pores in order to assess the susceptibility to frost damage relating to data defined in the literature.

Methods for Assessing Susceptibility to Frost Damage

In Poland, the resistance of ceramic masonry elements to freeze-thaw cycles is determined according to the standard PN-B-12012:2022-07 [1], where samples are subjected to direct exposure to a specified number of freeze-thaw cycles. Due to the destructive nature of such tests, many researchers assess the susceptibility of bricks to frost damage based on indirect procedures and/or critical values for each procedure. Various properties of bricks have been considered in the literature, including surface appearance changes, compressive strength, or ultrasonic wave propagation speed through samples, as well as the number, size and structure of pores [2, 3]. The results indicate that after a certain number of freeze-thaw cycles, brick surfaces are damaged, compressive strength decreases and ultrasonic wave propagation through samples is lower. Moreover, each freeze-thaw cycle causes the appearance of new micropores and cracks. However, one of the main parameters responsible for the frost resistance of ceramic elements is the size and distribution of pores [4 ÷ 6].

Literature models for frost resistance assessment primarily focus on pores with diameters larger than 3 µm, whose presence does not cause frost damage [7]. In many studies, the diameter of pores responsible for frost resistance varies. In [8], pores smaller than 1.4 µm are considered harmful, while in [9] pores smaller than 1.0 µm, in [10] smaller than 0.74 µm and 0.5 µm, and in [11] smaller than 0.2 µm are considered problematic. Additionally, there are publications [12] that found no correlation between porosity and frost resistance of masonry elements. One of the most recognized indirect procedures for predicting brick resistance to freeze-thaw cycles is the dimensionless Maage indicator F [-] (1), which determines the linear correlation between frost resistance and the percentage of pores with diameters larger than 3 µm [5]:

$$F = 3{,}2/PV + 2{,}4 \cdot P3 \quad (1)$$

where:
PV – total porosity [%];
P3 – content of pores with a diameter greater than 3,0 [%].

da, zwiększająca swoją objętość, może powodować wzrost naprężeń wewnątrz materiału. W przypadku, gdy nie ma możliwości ekspansji zamarzającej wody, a przyrost naprężeń jest większy niż wytrzymałość cegły, wówczas pojawiają się uszkodzenia struktury cegły.

W artykule określono właściwości cegieł historycznych pochodzących z obiektów gotyckich oraz cegieł współcześnie produkowanych w celu znalezienia związku pomiędzy ich strukturą oraz określenia kompatybilności pomiędzy materiałami stosowanymi w przeszłości a obecnie produkowanymi do wykonywania uzupełnień konserwatorskich. Z zastosowaniem porozymetrii rtęciowej wykonane zostały badania rozkładu i wielkości porów, na podstawie których dokonano oceny podatności na zniszczenia mrozowe, wykorzystując zależności określone w literaturze.

Metody oceny podatności na zniszczenia mrozowe

W Polsce odporność na zamrażanie-odmrażanie ceramicznych elementów murowych określa się zgodnie z normą PN-B-12012:2022-07 [1], gdzie próbki wystawiane są na bezpośrednie działanie odpowiedniej liczby cykli zamrażania-odmrażania. Ze względu na niszczący charakter tego typu badań, wielu naukowców dokonuje jednak oceny podatności cegieł na zniszczenia mrozowe na podstawie procedur pośrednich i/lub wartości granicznych/krytycznych dla każdej procedury. W publikacjach pod uwagę brano różne właściwości cegieł, m.in. zmianę w wyglądzie powierzchni, wytrzymałość na ściskanie lub prędkość propagacji fal ultradźwiękowych przez próbki oraz liczbę, wielkość i strukturę porów [2, 3]. Wyniki tych badań wskazują, że po określonej liczbie cykli zamrażania-odmrażania, powierzchnie cegieł ulegają zniszczeniu, wytrzymałość na ściskanie się zmniejsza, a propagacja fal ultradźwiękowych przez próbki jest również niższa. Ponadto każdy cykl zamrażania i odmrażania powoduje pojawienie się nowych mikroporów oraz pęknięć. Jednym z głównych parametrów odpowiedzialnych za mrozoodporność elementów ceramicznych jest jednak rozmiar i rozmieszczenie porów [4 ÷ 6].

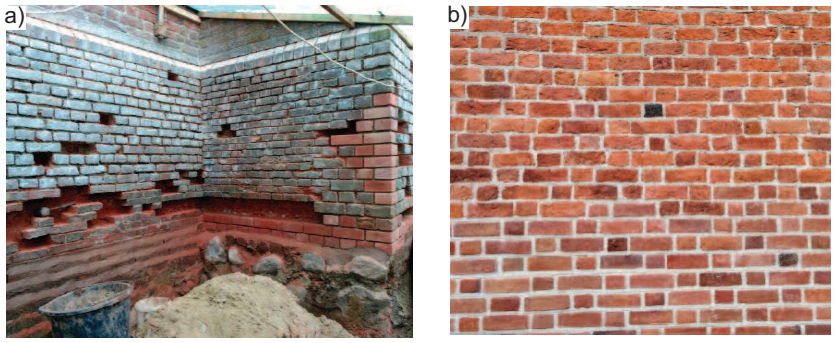
W literaturze modele oceny odporności mrozowej skupiają się przede wszystkim na porach o średnicy większej niż 3 µm, których obecność nie powoduje zniszczeń mrozowych [7]. W wielu badaniach średnica porów odpowiedzialnych za odporność mrozową często jest różna. W [8] pory mniejsze niż 1,4 µm uważane są za szkodliwe, podczas gdy w [9] za takie określa się pory mniejsze niż 1,0 µm, w [10] niż 0,74 µm i 0,5 µm, a w [11] niż 0,2 µm. Ponadto są publikacje [12], w których nie stwierdzono związku pomiędzy porowatością i mrozoodpornością elementów murowych. Jedną z najbardziej uznanych pośrednich procedur przewidywania odporności cegieł na cykle zamrażania-rozmrażania jest jednak bezwymiarowy wskaźnik Maage'a F [-] (1), który określa liniową korelację pomiędzy mrozoodpornością a procentową zawartością porów o średnicy większej niż 3 µm [5]:

$$F = 3{,}2/PV + 2{,}4 \cdot P3 \quad (1)$$

gdzie:
PV – całkowita zawartość porów [%];
P3 – zawartość porów o średnicy większej niż 3,0 µm [%].

Frost-resistant ceramic bricks have an numerical value of F [-] > 70. Due to structural changes over the years, pore distribution can misleadingly indicate frost-resistant characteristics of the tested material. Moreover, the use of materials with small-diameter pores for repairs can also increase frost damage in the wall (photograph). Concerning production methods, authors in [9] and [13] indicate that hand-formed bricks have a higher content of large-diameter pores than machine-produced bricks, suggesting they may be more resistant to frost damage. However, analysis of the main component of historical walls – bricks is certainly the source of knowledge about ceramic materials and helps identify the best solutions in conservation procedures [14].

Ceramika mrozoodporna cechuje się wartością liczbową F > 70 [-]. Ze względu na zmiany strukturalne pojawiające się na przestrzeni lat, dystrybucja porów może myląco wskazywać na mrozoodporną charakterystykę badanego materiału. Ponadto stosowanie do naprawy materiałów z porami o małej średnicy może również powodować wzrost zniszczeń mrozowych w murze (fotografia). W odniesieniu do metody produkcji, autorzy w [9] i [13] wskazują, że cegły ręcznie formowane mają większą zawartość porów o dużej średnicy niż cegły produkowane maszynowo, co może sugerować, że są one bardziej odporne na zniszczenia mrozowe, natomiast analiza głównego komponentu murów zabytkowych – cegieł jest bez wątpienia źródłem wiedzy na temat materiałów ceramicznych i pozwala na wskazanie najlepszych rozwiązań w procedurach konserwatorskich [14].



Fragment of the Gothic wall: a) restoration work by the use of currently produced brick; b) after conservation work

Fragment muru gotyckiego: a) uzupełnienia muru cegłą współczesną; b) po zakończeniu prac

Subject and range of research

The main experimental material included brick samples from four medieval constructions located in the north-east of Poland: St. Nicholas Church in Frombork, the Chapter House on the Cathedral Hill in Frombork, monastic house of the St. Catherine Sisters Convent in Orneta and the defensive walls of the Warmian Bishops' Castle in Lidzbark Warmiński. Historical bricks were carefully extracted from demolished parts of the structure during renovation work. All samples came from external, above-ground parts of homogeneous brick walls. Contemporary comparative material was selected based on previous studies described in [15], which identified currently produced hand-formed bricks as suitable for conservation work on historical tissue. The research was conducted on bricks from local brickworks (from southern Poland and Warmia). The type of bricks was selected based on material declarations from producers.

The porosity of the samples was determined by the use of mercury porosimetry. Three cylindrical samples, approximately 13.0 mm in diameter and 17.0 mm in height, were drilled from each tested element. They were then cleaned of dust using compressed air. Before testing, they were dried to a constant weight at 105°C. During the test, the porosity distribution was determined at a working pressure of up to 33,000 Psi. Penetrometers with a measurement vessel capacity of 3 cm^3 were used. The tests allowed for determining the pore structure, distribution, and average diameter of pores, as well as total porosity. Pores with diameters ranging from 300.00 to 0.006 µm were identified. Mercury porosimetry allows only the determination of the total surface area of open pores, excluding closed pores.

Przedmiot i zakres badań

Przedmiotem oceny były cegły ceramiczne pochodzące z czterech gotyckich obiektów zabytkowych zlokalizowanych na terenie północno-wschodniej Polski: kościoła św. Mikołaja we Fromborku; budynku Kapitularza na Wzgórzu Katedralnym we Fromborku; klasztoru Sióstr św. Katarzyny w Ornecie oraz murów obronnych Zamku Biskupów Warmińskich w Lidzbarku Warmińskim. Cegły historyczne zostały ostrożnie pobrane z rozbieranych części obiektu podczas wykonywanych prac renowacyjnych. Wszystkie próbki pochodzą z zewnętrznych, nadziemnych partii jednorodnego muru ceglanego. Współczesny materiał porównawczy został wyselekcjonowany na podstawie wcześniejszych badań opisanych w [15], w których wskazano współcześnie produkowane ręcznie formowane cegły jako właściwy materiał do wykonywania prac konserwatorskich tkanki zabytkowej. Badania przeprowadzono na cegłach pochodzących z lokalnych cegielni (z południa Polski oraz z Warmii). Rodzaj cegieł został dobrany na podstawie deklaracji materiałowych producentów.

Porowatość badanych próbek została określona przy użyciu porozymetru rtęciowego. Z każdego badanego elementu pobrano, za pomocą wiercenia, 3 próbki w kształcie cylindrycznym o średnicy ok. 13,0 mm i wysokości 17,0 mm. Następnie zostały one oczyszczone z pyłu przy użyciu sprężonego powietrza. Przed badaniem wysuszono je do stałej masy w temperaturze 105°C. Podczas badania określono rozkład porowatości przy ciśnieniu roboczym do 33,000 Psi. Do badań użyto penetrometrów o pojemności naczynia pomiarowego 3 cm^3. Wykonane badania pozwoliły na określenie struktury porowatości, rozkładu i średniej średnicy porów oraz całkowitej porowatości. Zidentyfikowano pory o średnicy od 300,00 do 0,006 µm. Porozymetria rtęciowa pozwala na określenie całkowitej powierzchni jedynie porów otwartych, pomijając pory zamknięte.

Results and Analysis

The analysis performed using a mercury porosimeter allowed for determining the following parameters of the tested materials: total pore area, average pore diameter, density and porosity (Table 1).

The values of total porosity obtained during the tests for Gothic bricks (sample names: C-O, C-LWM, C-FKP) and currently produced bricks (sample names: C-TM, C-RF) oscillate around 30%, but the Gothic brick marked with the abbreviation C-FM indicates a lower porosity value than the other historical bricks. The average pore diameter ranges from 0.1 µm in the historical brick C-O to 3.06 µm in the brick currently produced C-RF. The total pore surface also has a wide range of values from 0.38 m^2/g for the Gothic brick C-FKP to 4.63 m^2/g for the brick C-LWM. The densities specified in kg/m^3 are lower for bricks currently produced, while higher for historical bricks. Porosity distributions for the tested ceramic materials are presented below. Graphs of the dependence of pore diameter on the cumulative volume of mercury intrusion into free open spaces are presented (Figure 1).

Gothic bricks C-FM, C-O and C-LWM (Figure 1.a-c) are characterized by a dominant pore diameter in the range from 10 µm to 0.1 µm, in bricks C-FKP, C-TM and C-RF (Figure 1.d-f) pores in the range from 10 µm to 1.0 µm predominate. In order to estimate the risk of possible frost damage, it was necessary to divide the pores into the ranges presented in the scientific studies presented in the introduction. Due to the fact that there are many different divisions of pore sizes found in the literature, most of the discussed cases are referred to in Table 2. Frost resistance was determined using the following assessment

Table 1. Results of porosimetry analysis
Tabela 1. Wyniki analizy porozymetrycznej

Brick type/ Typ cegły	Designation/ Oznaczenie	Porosity [%]/ Porowatość[%]	Total pore area [m^2/g]/Całkowita powierzchnia porów [m^2/g]	Average pore diameter [µm]/ Średnia średnica porów [µm]	Density [kg/m^3]/ Gęstość [kg/m^3]
Historical/ Historyczna	C-FM	24,60	1,53	0,19	1958,53
	C-O	28,71	3,31	0,10	1838,30
	C-LWM	33,02	4,63	0,12	1720,40
	C-FKP	30,10	0,38	1,56	1837,27
Contemporary/Współczesna	C-TM	32,11	0,55	0,70	1518,03
	C-RF	31,90	0,44	3,06	1567,98

Wyniki badań i ich analiza

Na podstawie przeprowadzonej analizy porozymetrycznej określono następujące parametry badanych materiałów: całkowitą powierzchnię porów; średnią średnicę porów; gęstość oraz porowatość (tabela 1).

Uzyskane podczas badań wartości porowatości całkowitej cegieł gotyckich (oznaczenia: C-O, C-LWM, C-FKP) oraz współczesnych (oznaczenia: C-TM, C-RF) wynoszą ok. 30%, przy czym cegła gotycka C-FM ma najmniejszą porowatość spośród cegieł historycznych. Średnia średnica porów waha się od 0,1 µm w przypadku cegły historycznej C-O do 3,06 µm w przypadku cegły współcześnie produkowanej C-RF. Całkowita powierzchnia porów również ma duży zakres wartości, tj. od 0,38 m^2/g dla cegły gotyckiej C-FKP do 4,63 m^2/g dla cegły C-LWM. Gęstość cegieł obecnie produkowanych [kg/m^3] jest mniejsza niż historycznych. Na rysunku 1 przedstawiono rozkład porowatości w przypadku badanych materiałów ceramicznych.

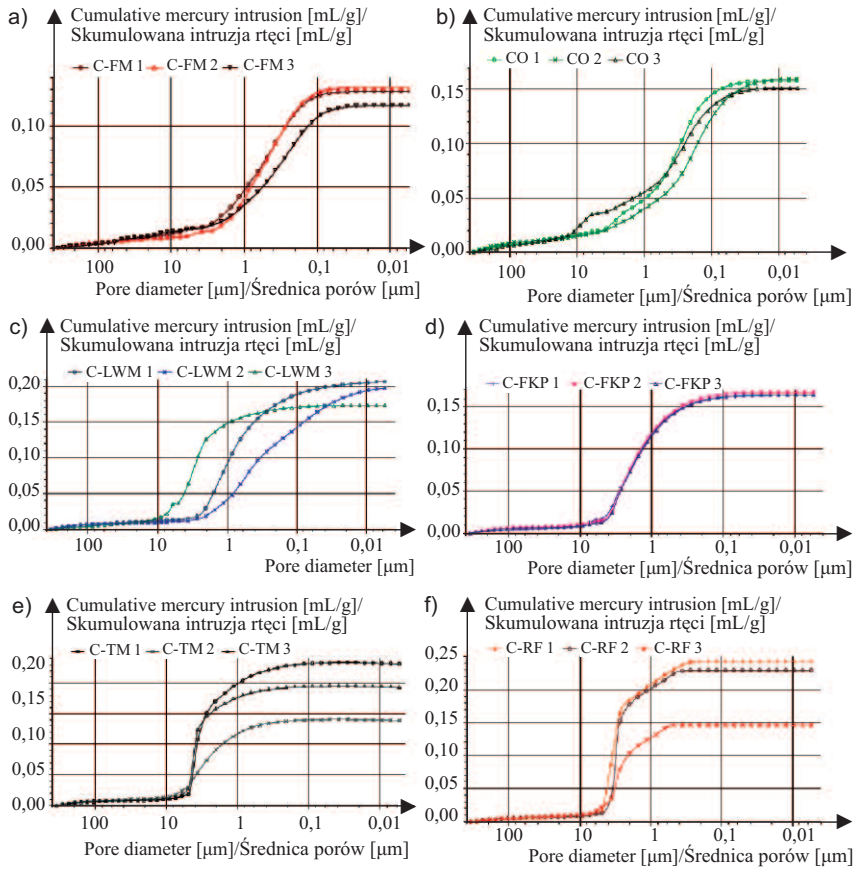


Fig. 1. Porosity distribution: a-d) historic bricks; e-f) currently produced bricks
Rys. 1. Rozkład porowatości: a-d) cegły zabytkowe; e-f) cegły współcześnie produkowane

W cegłach gotyckich C-FM, C-O oraz C-LWM (rysunek 1a-c) przeważają pory o średnicy od 10 do 0,1 µm, a w cegłach C-FKP, C-TM oraz C-RF (rysunek 1d-f) o średnicy od 10 µm do 1,0 µm. W celu oszacowania ryzyka możliwych zniszczeń mrozowych konieczne było podzielenie porów na zakresy przedstawione w opracowaniach naukowych. W tabeli 2 odniesiono się do większości przypadków omawianych w literaturze, a w tabeli 3 przedstawiono pokazane w tabeli 2 średnice porów warunkujące zniszczenia mrozo-

system – Table 2. Table 3 presents the ranges of pore diameters causing frost damage or no damage, as shown in Table 2, and compares them with the corresponding porosity in the analysed ceramic materials. According to the data presented in Table 3, Gothic bricks C-FM, C-O and C-LWM are not frost-resistant, Gothic brick C-FKP has the features of a frost-resistant and non-frost-resistant material, while bricks currently produced according to most predictions should be frostresistant. According to the study [3], the highest frost resistance is characteristic of ceramic materials with a dominance of pores with a diameter ranging from 1.0 to 10.0 µm.

Figure 2 presents a graphical division of the analyzed diameters. The first range includes pores with diameters from 10 to 3.0 µm. The second range includes medium pores 3.0 – 1.0 µm, the next 1.0 – 0.1 µm and the last small pores with a size smaller than 0.1 µm.

we lub ich brak oraz porównano je z analogiczną porowatością w analizowanych materiałach ceramicznych.

Cegły gotyckie C-FM, C-O oraz C-LWM wg danych przedstawionych w tabeli 2 cechują się brakiem mrozoodporności, cegła gotycka C-FKP ma cechy materiału mrozoodpornego i niemrozoodpornego, natomiast cegły współcześnie produkowane powinny charakteryzować się odpornością na działanie mrozu. Z opracowania [3] wynika, że największą mrozoodpornością charakteryzują się materiały ceramiczne, w których dominują pory o średnicy od 1,0 do 10,0 µm.

Na rysunku 2 przedstawiono graficzny podział analizowanych średnic. Pierwszy zakres zawiera pory o średnicy od 10 do 3,0 µm, drugi obejmuje pory średnie 3,0 – 1,0 µm, kolejny 1,0 – 0,1 µm i ostatni pory małe o średnicy mniejszej niż 0,1 µm.

Table 2. Summary of porosity ranges causing/not causing frost damage according to separate studies

Tabela 2. Zestawienie zakresów porowatości powodujących/niepowodujących zniszczenia mrozowe wg odrębnych opracowań

Range/Porowatość	Dominate/ Dominacja	Classification/Klasyfikacja
Range from 1,0 to 10 µm [%]/Zakres 1,0 do 10 µm [%]	if the pores dominate in the range 1,0 – 10,0 µm/jeśli dominują pory o średnicy 1,0 – 10,0 µm	frost-resistant material (FR)/ materiał mrozoodporny (FR)
Range from 1,4 to 0,25 µm [%]/Zakres 1,4 do 0,25 µm [%]	if the pores dominate in the range 1,4 to 0,25 µm/jeśli dominują pory o średnicy 1,4 do 0,25 µm	non-frost resistant material (NFR)/materiał niemrozoodporny (NFR)
Larger than 3,0 µm [%]/ Większa niż 3,0 µm [%]	if pores above the 3,0 µm diameter predominate/jeśli dominują pory o średnicy większej niż 3,0 µm	frost-resistant material (FR)/ materiał mrozoodporny (FR)
Larger than 2,0 µm [%]/ Większa niż 2,0 µm [%]	if pores above the 2,0 µm diameter predominate/jeśli dominują pory o średnicy większej niż 2,0 µm	frost-resistant material (FR)/ materiał mrozoodporny (FR)
Smaller than 1,4 µm [%]/ Mniejsza niż 1,4 µm [%]	if pores beolow 1,4 µm diameter predominate/jeśli dominują pory o średnicy mniejsze niż 1,4 µm	non-frost resistant material (NFR)/materiał niemrozoodporny (NFR)
Smaller than 1,0 µm [%]/ Mniejsza niż 1,0 µm [%]	if pores beolow1,0 µm diameter predominate/jeśli dominują pory o średnicy mniejszej niż 1,0 µm	non-frost resistant material (NFR)/materiał niemrozoodporny (NFR)
Smaller than 0,5 µm [%]/ Mniejsza niż 0,5 µm [%]	if pores below 0,5 µm diameter predominate/jeśli dominują pory o średnicy mniejszej niż 0,5 µm	non-frost resistant material (NFR)/materiał niemrozoodporny (NFR)
Maage factor/ Wskaźnik Maage'a	**if the value is higher than 70/ jeśli wartość jest większa niż 70**	**frost-resistant material (FR)/ materiał mrozoodporny (FR)**

Table 3. Evaluation of the frost resistance of bricks in relation to the analyzed ranges, where FR – material is frost resistant, NFR – material is not frost resistant

Tabela 3. Ocena mrozoodporności cegieł w odniesieniu do analizowanych zakresów, gdzie FR – materiał mrozoodporny, NFR – materiał niemrozoodporny

Range/Porowatość	C-FM		C-O		C-LWM		C-FKP		C-TM		C-RF	
	average value/ wartości średnie	FR/NFR	average value/ wartości średnie	FR/NFR	average value/ wartości średnie	FR/NFR	average value/ wartości średnie	FR/NFR	average value/ wartości średnie	FR/NFR	average value/ wartości średnie	FR/NFR
Range from 1,0 to 10 µm [%]/ Zakres 1,0 – 10 µm [%]	22,44	NFR	26,06	NFR	41,33	NFR	57,34	FR	77,33	FR	88,13	FR
Range from 1,4 to 0,25 µm [%]/ Zakres 1,4 – 0,25 µm [%]	6,05	FR	8,11	FR	18,33	FR	32,78	FR	34,49	FR	15,48	FR
Larger than 3,0 µm [%]/ Większa niż 3,0 µm [%]	13,64	NFR	17,79	NFR	16,56	NFR	14,10	NFR	39,18	NFR	67,29	FR
Larger than 2,0 µm [%]/ Większa niż 2,0 µm [%]	15,04	NFR	20,71	NFR	23,17	NFR	26,88	NFR	60,74	FR	84,43	FR
Smaller than 1,4 µm [%]/ Mniejsza niż 1,4 µm [%]	81,08	NFR	72,74	NFR	65,50	NFR	53,70	FR	26,33	FR	15,57	FR
Smaller than 1,0 µm [%]/ Mniejsza niż 1,0 µm [%]	74,43	NFR	68,70	NFR	55,18	NFR	39,35	FR	18,78	FR	11,70	FR
Smaller than 0,5 µm [%]/ Mniejsza niż 0,5 µm [%]	57,12	NFR	59,88	NFR	36,17	NFR	20,26	FR	9,04	FR	6,14	FR
Maage factor/ Wskaźnik Maage'a	**32,73**	**NFR**	**42,71**	**NFR**	**39,75**	**NFR**	**33,84**	**NFR**	**94,03**	**FR**	**161,59**	**FR**

Summary and Conclusions

The study of the size and distribution of pores in masonry materials undoubtedly provides a lot of information on the possibility of estimating the risk of frost damage. Based on the analysis of the results of the conducted tests, the following conclusions can be drawn:

- despite similar porosity, all tested brick types show significant differences in pore structure confirmed by the average pore diameter or total pore surface. Differences in this area significantly change the material's ability to transport and store moisture;
- almost all indicators regarding pore distribution confirm the assumption that hand-formed bricks are suitable for renovation of historic buildings from the point of view of frost resistance. Uncertainty regarding frost resistance may be indicated only by bricks currently produced marked with the symbol C-TM. Due to the lack of dominance of pores with a diameter in the range above 3 µm, frost resistance tests should be performed to confirm the possibility of using it for renovation purposes;
- in order to clearly determine the possibility of using contemporary bricks for applications in historic buildings, more extensive analyses should be carried out, including additional tests, mainly strength, sorption, as well as material tests of mortars surrounding ceramic materials.

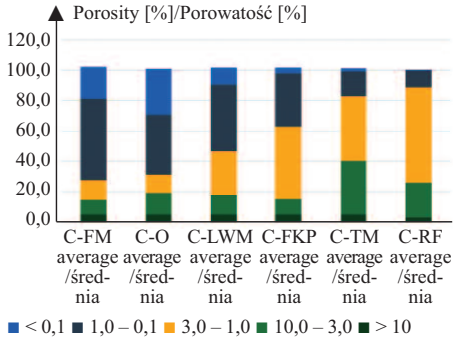


Fig. 2. Summary of the porosity ranges of the tested bricks in relation to frost strength according to [3]
Rys. 2. Zestawienie zakresów porowatości badanych cegieł w odniesieniu do wytrzymałości mrozowej wg [3]

Received: 14.06.2024
Revised: 08.07.2024
Published: 21.08.2024

Podsumowanie i wnioski

Badanie wielkości i rozkładu porów materiałów murowych niewątpliwie dostarcza wielu informacji na temat możliwości szacowania ryzyka zniszczeń mrozowych. Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- pomimo zbliżonej porowatości wszystkie badane typy cegieł wykazują znaczne różnice w strukturze porów potwierdzone przez średnią średnicę porów czy całkowitą powierzchnię porów; różnice te zmieniają możliwości transportu i magazynowania wilgoci przez materiał;
- prawie wszystkie wskaźniki dotyczące rozkładu porów potwierdzają założenie, że ręcznie formowane cegły są właściwe do renowacji obiektów zabytkowych z punktu widzenia odporności mrozowej. Niepewność dotyczącą mrozoodporności budzi jedynie cegła współcześnie produkowana oznaczona symbolem C-TM. W związku z brakiem dominacji w niej porów o średnicy większej niż 3 µm należy wykonać badania mrozoodporności w celu potwierdzenia możliwości wykorzystania tej cegły do celów renowacyjnych;
- w celu jednoznacznego określenia możliwości stosowania współcześnie produkowanych cegieł do zastosowania w obiektach zabytkowych należy przeprowadzić analizy obejmujące dodatkowe badania, w tym przede wszystkim wytrzymałości, sorpcyjności oraz badania materiałowe zapraw wykorzystywanych w murach z materiałów ceramicznych.

Wpłynął do redakcji: 14.06.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 08.07.2024 r.
Opublikowano: 21.08.2024 r.

References

[1] PN-B-12012:2022-07 Metody badań wyrobów budowlanych ceramicznych. Określanie odporności na zamrażanie-odmrażanie metodą badania całych wyrobów.

[2] Netinger Grubeša I, Vračević M, Ducman V, Marković B, Szenti I, and Kukovecz Á. Influence of the Size and Type of Pores on Brick Resistance to Freeze-Thaw Cycles. Materials. 2020; https://doi.org/10.3390/ma13173717.

[3] Stryszewska T, Kańka S. Forms of Damage of Bricks Subjected to Cyclic Freezing and Thawing in Actual Conditions Materials. 2019; https://doi.org/10.3390/ma12071165.

[4] Nieminen P, Romu M. Porosity and Frost Resistance of Clay Bricks. Proceedings of the 8th International Brick and Block Masonry Conference 1988.

[5] Maage M. Frost resistance and pore size distribution in bricks. Matériaux Construction. 1984; https://doi.org/10.1007/BF02478706.

[6] Mallidi SR. Application of mercury intrusion porosimetry on clay bricks to assess freeze-thaw durability – A bibliography with abstracts. Construction and Building Materials. 1996, https://doi.org/10.1016/S0955-2219 (03) 00249-8.

[7] Koroth SR. Evaluation and Improvement of Frost Durability of Clay Bricks. PhD Thesis 1997.

[8] Ravaglioli A. Evaluation of the frost resistance of pressed ceramic products based on the dimensional distribution of pores. Trans. Br. Ceram. Soc. 1976.

[9] Robinson GC. The relationship between pore structure and durability of brick. Am. Ceram. Soc. Bull. 1984.

[10] Madso F. Tegl som byggemateriale, fremstilling og egenskaper. Mur-Sentret 1979.

[11] Nakamura M. Automatic unidirectional freeze-thaw test for frost durability of building materials. Am. Ceram. Soc. Bull. 1988.

[12] Pietrak K, Kubiś M, Cieślikiewicz L, Furmański P, Seredyński M, Wasik M, Wiśniewski T, Łapka P. Measurement of Thermal, Hygric and Physical Properties of Bricks and Mortar Common for the Polish Market. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019; https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012022.

[13] Matysek P, Stryszewska T, Kańka S, and Witkowski M. The influence of water saturation on mechanical properties of ceramic bricks – tests on 19th-century and contemporary bricks. Materiales de Construcción. 2016, http://dx.doi.org/10.3989/mc.2016.07315.

[14] Borusewicz W. Konserwacja zabytków budownictwa murowanego. Warszawa: Arkady; 1985.

[15] Tunkiewicz M, Misiewicz J, Sikora P, Chung SY. Hygric Properties of Machine-Made, Historic Clay Bricks from North-Eastern Poland (Former East Prussia): Characterization and Specification for Replacement Materials. Materials. 2021; https://doi. org/10.3390/ma14216706.