

dr inż. Aleksandra Gorączko^{1)*}

ORCID: 0000-0002-1448-9330

dr Marcin Gorączko¹⁾

ORCID: 0000-0002-8866-6645

Application of geometric parameters in texture analysis of traditional stone walls

Wykorzystanie wskaźników geometrycznych w badaniach tekstur tradycyjnych murów kamiennych

DOI: 10.15199/33.2024.11.19

Abstract. The article presents the methodological basis of the proposed typology of façade textures for traditional rural and small-town buildings constructed of natural stone. Such structures can still be found in Poland, mainly in the Kraków-Częstochowa Upland, Lublin, Kielce, and Silesian regions, as well as further north, in the central part of the country. Increasingly, these types of buildings, due to their historical and architectural significance, are being protected by conservation efforts, revitalized, or designated as regional standards for contemporary construction projects. The premise for the undertaken research is the authors' belief that classical classifications of stone walls are too general to reflect their actual typological and regional diversity. The proposed methodology is based on determining geometric parameters, including the size and proportions of stone elements, their distribution in the wall, and the surface ratio of stone to mortar. The research was conducted on walls built of natural stone from the Uniejów area (central Poland). It involved the analysis of four selected textures roughly corresponding to wall types: wild, layered, regular and mosaic.

Keywords: Uniejów; stone masonry buildings; soft limestone; types of stone walls; texture parameters.

The textures of facades on traditional stone buildings found in various regions of Poland display significant diversity and local specificity. The stone elements forming these walls vary greatly in both dimensions and shape. This is due to the variability of the natural stones used in wall construction, as well as the manual shaping and processing of masonry elements. Additionally, the masonry techniques applied depend on regional traditions and often on the level of mastery of stonemasonry by individual craftsmen. The classification in Polish literature [1], which descriptively distinguishes only a few types of walls wild, cyclopean, layered, regular, mosaic and ashlar is too general and often insufficient for capturing their true diversity and attempting systematic categorization. This issue is evident, for example, in the Uniejów region in central Poland. Numerous preserved traditional village and small-town buildings constructed from local stone (a siliceous soft limestone rock) [2, 3] represent the

Streszczenie. W artykule zawarto metodyczne podstawy projektowanej typologii tekstur elewacyjnych w tradycyjnych budynkach wiejskich i małomiasteczkowych murowanych z naturalnego kamienia. Obiekty takie występują w Polsce na wyżynach Krakowsko-Częstochowskiej, Lubelskiej, Kieleckiej i Śląskiej, ale też bardziej na północ od nich, w środkowej części kraju. Coraz częściej tego typu budynki, ze względu na znaczenie historyczne i architektoniczne, są obejmowane ochroną konserwatorską, podlegają rewitalizacji lub są wskazywane jako regionalny wzorzec dla współczesnych realizacji budowlanych. Przesłanką do podjęcia badań była zbyt ogólna, naszym zdaniem, postać klasycznych klasyfikacji murów kamiennych, aby mogły one odzwierciedlać faktyczne ich zróżnicowanie typologiczne i regionalne. Proponowana metoda polega na wyznaczaniu wskaźników geometrycznych, obejmujących wielkość i proporcje elementów kamiennych, ich rozmieszczenie w murze oraz powierzchniowy udział kamienia i zaprawy. Badania przeprowadzono na przykładzie murów wznoszonych z naturalnego kamienia pochodzącego z okolic Uniejowa (centralna Polska). Polegały one na analizie czterech wybranych tekstur w przybliżeniu odpowiadających typom muru dzikiego, warstwowego, rzędowego i mozaikowego.

Słowa kluczowe: Uniejów; budynki murowane z kamienia; opoka; typologia murów kamiennych; wskaźniki tekstur.

tekstury elewacyjne murów tradycyjnych budynków kamiennych, spotykanych w różnych regionach Polski, wykazują znaczną różnorodność i lokalną specyfikę. Elementy kamienne tworzące mury charakteryzują się znaczną zmiennością zarówno wymiarów, jak i kształtu. Powodem jest zróżnicowanie cech samych kamieni naturalnych, wykorzystywanych do wznoszenia ścian, a także ręczne kształtowanie i obróbka elementów murowych. Dodatkowo, zastosowane techniki murowania są uzależnione od regionalnych tradycji, a często od stopnia opanowania rzemiosła kamieniarskiego przez konkretnego wykonawcę.

Przedstawiany dotychczas w polskiej literaturze [1] podział wyróżniający opisowo jedynie kilka typów muru, tzn. dzikie, cyclopowe, warstwowe, rzędowe, mozaikowe oraz ciosowe, jest zdecydowanie zbyt ogólny i często nie wystarcza do oddania ich rzeczywistego zróżnicowania i podjęcia prób systematyzacji. Problem ten ujawnia się np. w rejonie Uniejowa w centralnej części Polski. Zachowane tu licznie tradycyjne budynki wiejskie i małomiasteczkowe wzniesione z miejscowego kamienia (opoki – skały krzemionkowo-wapiennej) [2, 3] reprezentują główne typy kla-

¹⁾ Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich,

Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

* Correspondence address: agora@pbs.edu.pl

main types of classical walls, with layering generally present. In other parts of the world where the tradition and legacy of stone construction are richer, such as Italy, Portugal, and China, efforts are underway to develop parametric descriptions [4 ÷ 8] that can be used both for classification and for assessing wall strength, and are even incorporated into engineering practices through relevant standards [9].

This article proposes a method to determine the quantitative characteristics of stone walls by using geometric indicators of individual masonry elements and their arrangement. The article also discusses their usefulness for the clear description of wall features, for analyzing differences in wall textures, and for developing a typology of stone walls with at least regional applicability.

Method for determining wall characteristics

The research was conducted on traditional farm buildings (three residential and one livestock building), made of natural stone exploited in the village of Roźniatów in the Uniejów commune. Texture parameters were determined for four wall fragments that were visually distinct from each other, approximately representing the basic types of stone walls: wild, layered, regular and mosaic (Table 1). The study was based on photographic documentation showing the current





sycznych murów, przy obecnej w nich warstwowości. Tymczasem w różnych rejonach świata, gdzie tradycja i spuścizna budownictwa kamiennego są bogatsze, m.in. we Włoszech, Portugalii czy w Chinach, dąży się do opracowania opisów parametrycznych [4 ÷ 8], które mogą być zarówno wykorzystywane do celów klasyfikacyjnych, jak i oceny wytrzymałości murów, a nawet wprowadzane są odpowiednimi normami do praktyki inżynierskiej [9].

W artykule zaproponowano metodę określania ilościowej charakterystyki murów kamiennych z wykorzystaniem wskaźników geometrycznych poszczególnych elementów murowych i ich rozmieszczenia. Podjęto również dyskusję nad ich przydatnością do jednoznacznego opisu cech oraz analizy różnicy tekstur murów, a w dalszej kolejności do sporządzenia typologii murów kamiennych o co najmniej regionalnym zasięgu stosowalności.

Metoda określania charakterystyki murów

Przeprowadzono badania tradycyjnych budynków zagrodowych (trzech mieszkalnych i jednego inwentarskiego) murowanych z naturalnego kamienia, eksploatowanego w miejscowości Roźniatów w gminie Uniejów. Określenie parametrów tekstury dotyczyło czterech fragmentów murów, wyraźnie różniących się między sobą wizualnie, w przybliżeniu reprezentujących podstawowe typy murów kamiennych: dzikiego; warstwowego; rzędowego i mozaikowego (tabela 1).

Table 1. Types of soft limestone walls selected for analysis
Tabela 1. Typy murów z kamienia (opoki) wybrane do analizy

Type I: Wild wall/Typ I: Mur dziki	Type II: Layered wall/Typ II: Mur warstwowy
	
$A_p = 0,80 \text{ m}^2$	$A_p = 0,41 \text{ m}^2$
Type III: Regular wall/Typ III: Mur rzędowy	Type IV: Mosaic wall/Typ IV: Mur mozaikowy
	
$A_p = 0,65 \text{ m}^2$	$A_p = 1,27 \text{ m}^2$

state of the facades. Panels with a total area of 0.4 to 1.3 m² were isolated based on the photographs, each containing 40 – 60 fully visible masonry elements, and then their contours were drawn. The outlines were drawn with attention to the original shapes of the elements, omitting later losses and damage where possible. The proposed parametric description includes six indicators that define the size and proportions of stone elements, their arrangement within the wall, and the percentage of stone and mortar on the external surface of the walls. These are:

- **element size parameter** – this is the ratio of the area (A_{Si}) of each stone that fits entirely within the boundaries of the analyzed panel to the reference area ($A_0 = 78 \text{ cm}^2$) which is the side cross-section of a ceramic brick. The reference area was chosen due to the most common type of stone walls in this region, where elements were shaped in the form of ceramic bricks;
- **shape parameter** – the ratio of the largest horizontal dimension (H_i) to the vertical dimension (V_i);
- **shape regularity parameter** – expressed as the ratio of the area of the stone element (A_{Si}) to the area of the rectangle circumscribed around the element (A_{Ri});
- **stone surface parameter** – defines the ratio of the surface area of stone elements ($\sum A_S$) to the surface area of the analyzed panel (A_p);
- **horizontal alignment parameter** – describes the arrangement of stones along horizontal layers, obtained by tracing the shortest possible paths along horizontal joints between the left and right edges of a defined wall section (L_{Hi}) and comparing the length of each path to the section width (L_H);
- **vertical alignment parameter** – reflects the vertical interlocking of wall elements, defined as the shortest possible paths along vertical joints between the top and bottom edges of the wall panel (L_{Vi}), with the length of each path compared to the height of the analyzed panel (L_V).

Results and discussion

The summary of parameter values (description and symbols in the text above) for selected examples of the most typical limestone walls from the studied area is presented in Table 2. For each wall, average values and the median are provided, and the range of variability is characterized using the standard deviation as well as the 0.05 and 0.95 quantiles.

The average values of the individual parameters and their variability, as summarized in Table 2, show significant differences for the four analyzed types of stone walls.

The average values of the element size parameter (column 3) for the analyzed wall panels fall within a broad range of 0.77 – 1.77, which justifies including this fundamental geometric parameter in the analysis. The distribution of this parameter (Fig. 1) also plays an important role in the parametric description of each wall type. In layered and regular walls (Type II, Type III), the distributions are close to normal (Fig. 1b, 1c), whereas in wild and mosaic walls (Type I, Type IV),

Podstawę opracowania stanowiła dokumentacja fotograficzna obrazująca aktualny stan elewacji. Na podstawie wykonanych zdjęć wyodrębniono panele o powierzchni łącznej 0,4 ÷ 1,3 m², zawierające 40 – 60 zobrazowanych w całości elementów murowych, a następnie wykonano ich konturowanie. Obrisy sporządzono z uwzględnieniem pierwotnego kształtu elementów, w miarę możliwości z pominięciem późniejszych ubytków i zniszczeń. Zaproponowany opis parametryczny wykorzystuje sześć wskaźników, określających wielkość i proporcje elementów kamiennych, ich rozmieszczenie w murze oraz procentowy udział kamienia i zaprawy w powierzchni zewnętrznej ścian. Są to:

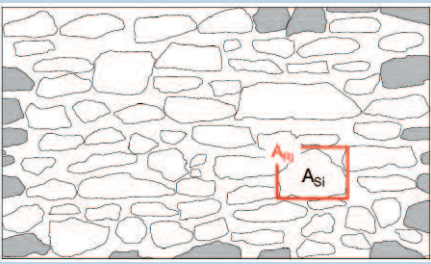
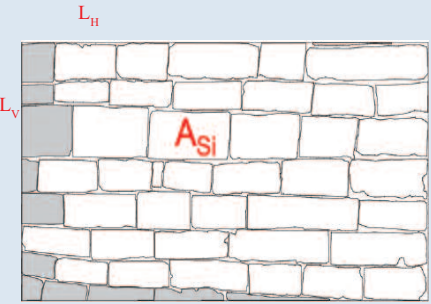
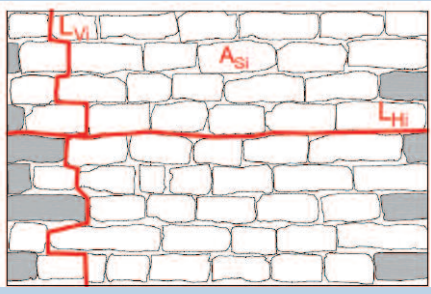
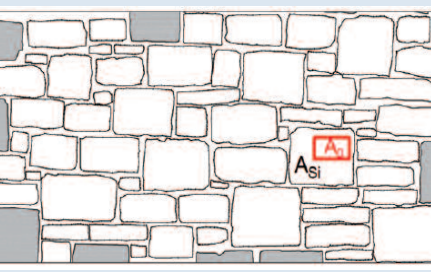
- **wskaźnik wielkości elementów licowych (WW)** – jest to relacja powierzchni (A_{Si}) każdego kamienia, który mieści się całkowicie w granicach analizowanego panelu i pola powierzchni odniesienia ($A_0 = 78 \text{ cm}^2$), tzn. przekroju bocznego cegły ceramicznej; powierzchnia odniesienia została wybrana ze względu na najczęstszy wariant murów kamiennych w tym rejonie, którego elementy kształtowane były na wzór cegły ceramicznej;
- **wskaźnik kształtu** – relacja największego poziomego wymiaru (H_i) do wartości wymiaru w pionie (V_i);
- **wskaźnik regularności kształtu** wyrażony stosunkiem pola elementu kamiennego (A_{Si}) do pola prostokąta opisanego na elemencie (A_{Ri});
- **wskaźnik powierzchni kamienia** określający relację powierzchni elementów kamiennych ($\sum A_S$) w powierzchni analizowanego panelu (A_p);
- **wskaźnik wyrównania poziomego** określający rozmieszczenie kamieni wzdłuż warstw poziomych, uzyskany przez wytyczenie najkrótszych możliwych ścieżek wzdłuż spoin poziomych, pomiędzy lewą i prawą stroną ustalonego wycinka muru (L_{Hi}) oraz porównanie długości każdej ścieżki z szerokością wycinka (L_H);
- **wskaźnik wyrównania pionowego** odzwierciedlający pionowe zazębienie elementów muru, zdefiniowany jako najkrótsze możliwe ścieżki (L_{Vi}) wzdłuż spoin pionowych, pomiędzy górną i dolną krawędzią panelu ściennego i porównanie długości każdej ścieżki z wysokością analizowanego panelu (L_V).

Omówienie wyników

Zestawienie parametrów wybranych najbardziej typowych murów z opoki z badanego rejonu zawiera tabela 2. W przypadku każdego z murów przedstawiono wartości średnie, medianę, a osiągnięty zakres zmienności scharakteryzowano za pomocą odchylenia standardowego oraz 0,05 i 0,95 kwantyla. Podane wartości średnie poszczególnych wskaźników oraz ich zmienność potwierdzają istotne różnice analizowanych czterech typów murów kamiennych.

Średnie wartości wskaźnika wielkości elementów licowych (A_{Si}/A_0) w przypadku analizowanych paneli murowych zawierają się w szerokim przedziale 0,77 – 1,77, co uzasadnia uwzględnienie w analizie tego podstawowego parametru geometrycznego. Duże znaczenie przy opisie parametrycznym poszczególnych typów muru ma także opis rozkładu tego wskaźnika (rysunek 1). W murach warstwowym i rzędownym (typ II, typ III)

Table 2. Texture parameters of various types of soft limestone walls
 Tabela 2. Parametry tekstur poszczególnych typów murów z kamienia (opoki)

Wall type/ Typ muru	Geometric model/Model geometryczny	A_{Si}/A_0	H_i/V_i	A_{Si}/A_{Ri}	$\Sigma A_{Si}/A_p$	L_{Hi}/L_H	L_{Vi}/L_V	Measure/Miara
I		0,77	2,35	0,72	0,69	1,03	1,48	mean/średnia
		–	–	0,06	–	0,002	0,13	standard deviation/ odchylenie standardowe
		0,63	2,26	0,73	–	–	–	median/mediana
		0,24 1,68	1,26 3,52	0,63 0,82	–	–	–	quantiles/kwantyle: 0,05 0,95
II		1,07	2,32	0,90	0,90	1,0	1,38	mean/średnia
		0,40	0,66	0,02	–	–	0,09	standard deviation/ odchylenie standardowe
		0,96	2,21	0,90	–	–	–	median/mediana
		0,58 1,90	1,61 – 3,50	0,83 – 0,95	–	–	–	quantiles/kwantyle: 0,05 0,95
III		1,13	2,08	0,87	0,84	1,01	1,72	mean/średnia
		0,32	0,59	0,04	–	0,003	0,24	standard deviation/ odchylenie standardowe
		1,13	2,02	0,87	–	–	–	median/mediana
		0,69 1,68	1,32 3,03	0,81 0,92	–	–	–	quantiles/kwantyle: 0,05 0,95
IV		1,77	2,16	0,88	0,81	1,09	1,53	mean/średnia
		–	–	0,05	–	0,03	0,16	standard deviation/ odchylenie standardowe
		1,56	1,89	0,89	–	–	–	median/mediana
		0,19 4,36	1,07 3,96	0,83 0,94	–	–	–	quantiles/kwantyle: 0,05 0,95

the distributions are highly skewed and exhibit greater variability (Fig. 1a, 1d).

The average shape parameter (column 4) for the analyzed walls does not show significant variation. However, the distributions of this parameter differ markedly across wall types close to normal (Fig. 2b, 2c) for regular and layered walls (Type II, Type III) and distinctly asymmetrical (Fig. 2a, 2d) for wild and mosaic walls (Type I, Type IV).

The average shape regularity parameter of elements (column 5) is similar across wall types and exceeds 0.87, except for the wild wall (Type I), where it averages 0.72. This can

rozkład jest zbliżony do normalnego (rysunek 1b i 1c), natomiast w dzikim i mozaikowym (typ I, typ IV) jest silnie asymetryczny i cechuje się dużą zmiennością wartości (rysunek 1a, 1d).

Średni wskaźnik kształtu (H_i/V_i) analizowanych murów nie wykazuje znacznego zróżnicowania. Natomiast rozkład wartości tego wskaźnika jest zdecydowanie różny w poszczególnych typach muru – zbliżony do normalnego (rysunek 2b, 2c) w przypadku murów rzędowego i warstwowego (typ II, typ III) oraz wyraźnie asymetryczny (rysunek 2a, 2d) w przypadku dzikiego i mozaikowego (typ I, typ IV).

Średni wskaźnik regularności kształtu elementów (A_{Si}/A_{Ri}), poza murem dzikim (typ I), w przypadku którego osiąga śred-

be attributed to the physical and mechanical properties of the stone material in the studied region, which, due to its relatively low hardness, is easily worked in its fresh state to produce regular masonry elements. The stone surface parameter (column 6) decreases with the shape regularity parameter, within a range of 0.90 to 0.69, indirectly reflecting the visual effect of joint thickness. The horizontal alignment parameter (column 7) shows little variation (ranging from 1.0 for regular walls

to 1.09 for mosaic walls), which may also result from the high regularity of wall types typical of the studied area. However, this parameter may prove useful in broader analyses encompassing other regions where natural stone is used in traditional construction. The vertical alignment parameter (column 8) exhibits greater variability, ranging from 1.38 to 1.72, though without a clear relationship to wall type. It is expected that this parameter will be useful in the detailed description of variations within each major wall type.

Conclusions

For traditional rural and small-town buildings, existing classifications of stone walls often prove too general. To address this issue, it seems worthwhile to develop and validate classification methods based on geometric indicators of masonry elements.

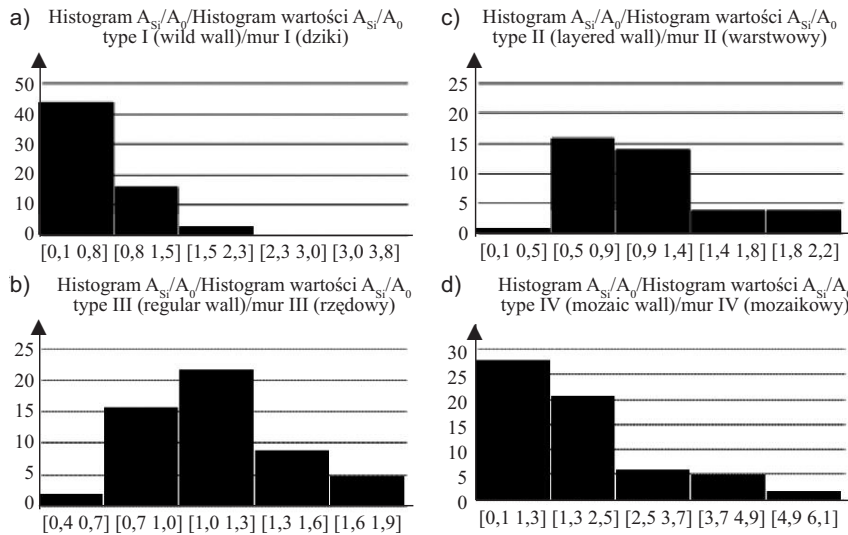


Fig. 1. Distribution of element size parameter values for different types of walls – description in the article

Rys. 1. Rozkład wartości wskaźnika wielkości elementów w przypadku poszczególnych typów muru – opis w artykule

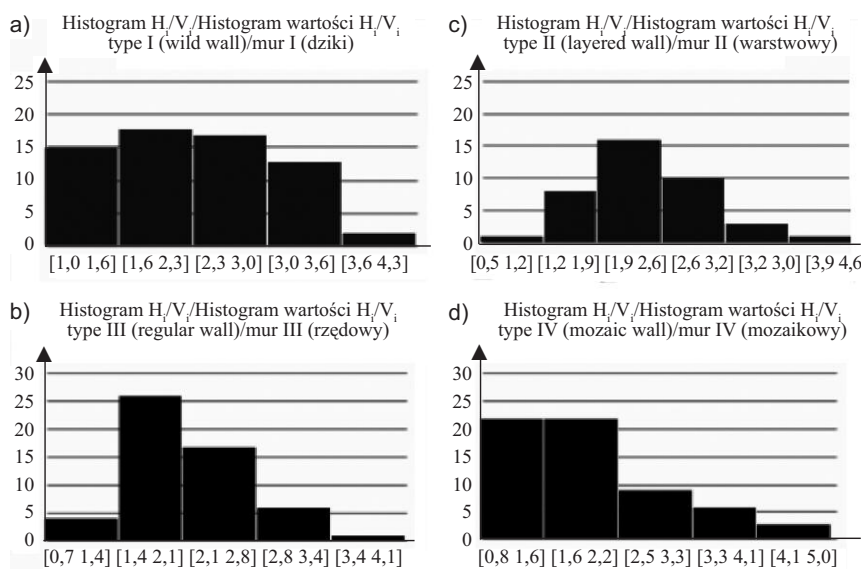


Fig. 2. Distribution of element shape parameter values for different types of walls – description in the article

Rys. 2. Rozkład wartości wskaźnika kształtu elementów w poszczególnych typach muru – opis w artykule

(1,38 – 1,72), wykazuje średni wskaźnik wyrównania pionowego (L_{vi}/L_v), ale bez wyraźniejszego związku z typem muru. Przewiduje się, że jego przydatność będzie ujawniała się przy szczegółowym opisie odmian w obrębie poszczególnych głównych typów murów.

Podsumowanie

Stosowane dotychczas klasyfikacje murów kamiennych w przypadku tradycyjnych budynków wiejskich i małomiasteczkowych często okazują się zbyt ogólne. W poszukiwaniu rozwiązania tego problemu zasadne wydaje się opracowanie i zweryfikowanie metod klasyfikacyjnych polegających na wykorzystaniu wskaźników geometrycznych elementów murowych.

nią wartość 0,72, jest zbliżony i przekracza 0,87. Należy to wiązać z cechami fizycznymi i mechanicznymi surowca skalnego w analizowanym regionie, który ze względu na dosyć małą twardość, w stanie świeżym łatwo poddaje się obróbce w celu uzyskania regularnych elementów murowych. Udział kamienia w powierzchni licowej murów ($\sum A_{si}/A_p$) maleje wraz ze wskaźnikiem regularności kształtu w zakresie 0,90 – 0,69, co pośrednio oddaje wizualny efekt grubości zastosowanej spoiny. Średni wskaźnik wyrównania poziomego (L_{Hi}/L_H) wykazuje niewielkie zróżnicowanie (1,0 w przypadku muru rzędowego do 1,09 – muru mozaikowego), co może być również wynikiem bardzo dużej regularności typów murów w badanym regionie. Wskaźnik ten może być jednak przydatny w analizach o dużym zasięgu, obejmujących inne regiony zastosowania naturalnego kamienia w tradycyjnym budownictwie. Dużą zmienność

The average values of the indicators proposed and analyzed in this study for four selected types of stone walls show varying levels of usefulness for clear categorization. Parameters related to size and shape are the most useful for systematizing wall types, and it is recommended to include a description of value distribution through standard deviation, quantiles, or histograms. For analyses concerning mortar coverage on wall surfaces, introducing an additional parameter that defines the average joint width would be particularly valuable.

The findings encourage further research into the typology of stone wall textures. There is no doubt that future studies should cover a much broader group of structures. The range of geometric indicators tested could also be expanded. This research can continue successfully in the broader Uniejów area, given the large number and variety of existing stone masonry buildings. However, a next step would be to undertake comparative studies across different regions in Poland with a tradition of using local stone in masonry construction.

*Received: 07.05.2024
Revised: 14.07.2024
Published: 25.11.2024*

Średnie wartości przedstawionych w artykule wskaźników dotyczących czterech wybranych typów murów kamiennych wykazują zróżnicowaną przydatność do jednoznacznego opisu. Największą użyteczność przy systematyzacji typów muru mają parametry wielkości i kształtu, przy czym wskazany jest opis rozkładu wartości w postaci odchylenia standardowego, kwantyli lub histogramów. W przypadku analiz związanych z udziałem zaprawy w powierzchni muru użyteczne byłoby wprowadzenie parametru dodatkowo określającego przeciętną szerokość spoiny.

Uzyskane wyniki zachęcają do dalszych badań nad typologizacją tekstur murów kamiennych. Nie ulega wątpliwości, że powinny one objąć znacznie większą grupę obiektów. Poszerzony może zostać również zestaw testowanych wskaźników geometrycznych. Badania mogą być prowadzone w szeroko pojętym rejonie Uniejowa, ze względu na dużą liczbę i różnorodność zachowanych do dziś budynków murowanych z naturalnego kamienia. Warto też podjąć badania porównawcze obejmujące różne regiony w Polsce, w których występowała tradycja stosowania miejscowego kamienia w konstrukcjach murowych.

*Artykuł wpłynął do redakcji: 07.05.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 14.07.2024 r.
Opublikowano: 25.11.2024 r.*

Literature

- [1] Osiecka E. 2010. Materiały budowlane – kamień, ceramika, szkło, OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [2] Gorączko M, Gorączko A. Vernacular architecture and traditional rural landscape in new socio-economic realities – a case study from Central Poland. *Bulletin of Geography. Socio-economic Series*. 2015; 30: 43 – 57.
- [3] Gorączko M, Gorączko A. Disappearance of the Limestone Architectural Heritage in Central Poland – Trends and Challenges, IOP Conference Series – Materials Science and Engineering. 2019; 471: 1 – 8.
- [4] Almeida C, Guedes JP, Arêde A, Costa A. Geometric indices to quantify textures irregularity of stone masonry walls. *Construction and Building Materials*. 2016; 111: 199 – 208.
- [5] Borri A, Corradi M, Castori G, De Maria A. A method for the analysis and classification of historic masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2015; 13: 2647 – 2665.

- [6] Hou X, Cheng B, Yang J. A quantitative study on the exterior wall texture of stone-built dwellings in traditional villages in China: A case study of the Xisuo village in the Jiarong Tibetan area. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42: 102357.
- [7] Zhang S, Hofmann M, Beyer K. A 2D typology generator for historical masonry elements. *Construction and Building Materials*. 2018; 184: 440 – 453.
- [8] Vanin F, Zaganelli D, Penna A, Beyer K. Estimates for the stiffness, strength and drift capacity of stone masonry walls based on 123 quasi-static cyclic tests reported in the literature. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2017; 15: 5435 – 5479.
- [9] Infrastrutture DM. Norme tecniche per le costruzioni. 2008; No. 29, DM 14/01/2008.