

dr inż. Aleksander Byrdy^{1*)}

ORCID: 0000-0003-0565-0275

dr hab. Marek Rembiś, prof AGH²⁾

ORCID: 0000-0003-2879-3949

Changes in the strength of sandstone cladding panels under environmental influences

Zmiana wytrzymałości płyt elewacyjnych z piaskowca pod wpływem oddziaływania środowiska

DOI: 10.15199/33.2025.11.07

Abstract. Nevertheless, no comprehensive studies have been conducted thus far to evaluate the influence of environmental factors on the mechanical performance of sandstones quarried and used as façade materials in Poland. Experimental investigations carried out on sandstones from Śmiłów, Żerkowice, and Skała, extracted from existing building façades, revealed substantial degradation in their mechanical strength. The findings also highlighted deficiencies in current evaluation protocols for natural stone materials intended for use in ventilated façade systems. Petrographic and microscopic analyses demonstrated that the loss of structural integrity in the examined sandstones is primarily due to the development of multidirectional microcracks propagating through mineral grains, and, in near-surface zones, the breakdown of grain-to-grain contacts leading to granular disintegration. These deterioration mechanisms were initiated and accelerated by repeated freeze-thaw cycles associated with the infiltration of meteoric water. The ingress of water was facilitated by the high total porosity of the material, exceeding 20%, as well as by the presence of an interconnected pore network, which significantly enhanced water permeability and retention within the stone matrix.

Keywords: durability of ventilated façades; natural stone cladding; degradation of cladding panels; sandstone; petrography

Stone cladding is commonly accepted as the most aesthetic and durable material for exterior wall finishing. In Poland, given the high availability of its deposits and a relatively low price of this material, sandstone is the leading natural stone in facade construction. The most widely used method of installing stone cladding on external walls is the so-called dry fixing method, applied in the layered system typical of ventilated façades. Stone wall panels are fastened to the supporting structure using flat bar anchors made of stainless steel. Sandstone facade panels are typically 4 cm thick and supported at 4 points using steel anchoring pins embedded in the side surfaces of the panels.

The selection of stone material for façades is determined by the requirements of standard [1]. The material is expected to resist at least 14 freeze-thaw cycles performed according to standard [2]. The requirements [3] regarding the authorization to use advanced ventilated facade fixing techniques recommend

Streszczenie. Dotychczas nie przeprowadzono badań wpływu środowiska na parametry wytrzymałościowe piaskowców wydobywanych i stosowanych na elewacje w Polsce. Wyniki badań piaskowców Śmiłów, Żerkowice i Skała, pochodzących z elewacji budynków, wykazały znaczne zmniejszenie ich wytrzymałości na zginanie oraz braki w stosowanych metodach weryfikacji materiałów kamiennych, stanowiących podstawę do ich stosowania jako materiału okładzinowego w elewacjach wentylowanych. Badania mikroskopowe wykazały, że powodem obniżenia zwięzłości piaskowców jest powstanie w ich wnętrzu wielokierunkowych spękań obejmujących ziarna, a w ich zewnętrznej części, zerwanie połączeń między zianami i ich wykruszanie się. Zmiany te zostały wywołane cyklicznym zamarzaniem i rozmarzaniem wody pochodzącej z opadów atmosferycznych. Jej wnikaniiu w głąb kamieni sprzyjała ich znaczna porowatość, wynosząca ponad 20% oraz system połączonych porów.

Słowa kluczowe: trwałość elewacji wentylowanych; okładziny z kamienia naturalnego; uszkodzenia płyt elewacyjnych; piaskowiec; petrografia

Okładziny kamienne są powszechnie uznawane za najbardziej estetyczny i trwały materiał stosowany do wykańczania ścian zewnętrznych. W Polsce, ze względu na dużą dostępność złóż oraz relatywnie niską cenę tego materiału, piaskowiec jest najbardziej popularnym materiałem do wykonywania fasad z kamienia naturalnego. Najbardziej rozpowszechnionym sposobem montażu okładzin kamiennych na ścianach zewnętrznych jest tzw. montaż na sucho, stosowany w układzie warstw typowym dla fasad wentylowanych. Kamienne okładziny ściennie przymocowuje się elementami kotwiącymi z płaskownika, wykonanymi ze stali nierdzewnej, do konstrukcji stanowiącej podłoże. Płyty elewacyjne z piaskowca najczęściej mają grubość 4 cm i są podpierane czteropunktowo za pomocą trzpieni zakotwionych osadzanych w bocznych powierzchniach płyt.

Dobór materiału kamiennego na elewacje wynika z wymagań normy [1]. Powinien być on odporny na minimum 14 cykli zamrażania i rozmrażania realizowanych wg normy [2]. Wymagania te [3] dotyczące dopuszczenia do stosowania zaawansowanych technik montażu elewacji wentylowanych, zalecają realizację 25–50 cykli zamrażania i rozmrażania, realizowanych

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

*) Correspondence address: abyrdy@pk.edu.pl

the realization of 25–50 freeze-thaw cycles following standard [4]. Standard [1] does not include other requirements concerning stone panels, except for the necessity to declare individual physical and strength properties, and the requirements related to panel geometry and the dimensions of panel anchoring holes.

Cladding panels are subjected to static loads, such as their own weight as well as wind pressure and suction. Environmental impacts (frost, effect of salt) and thermal stresses [5–7] are also important for panel durability. Moreover, biological, chemical and physical factors affecting stone in an urban agglomeration environment may play a vital role [8–11].

Changes in facade stone strength properties should be taken into account in the process of designing stone facades. Unfortunately, the domestic literature does not offer relevant guidelines in this matter. Strength reduction of stone cladding panels may be significant [12] and ought to be taken into consideration when selecting facade-dedicated materials, as well as in computational models of the limit states of facade panels. In order to assess operational durability, models of strength reduction for locally-sourced stone materials have been developed in many countries based on studies on the strength of stone cladding specimens exposed to operational stresses in a given region [5], as well as based on probabilistic models [13], or computational analyses [14]. The aim of the present article is to verify strength changes of three examples of Polish sandstones applied in facade cladding in different regions of Poland, and a root cause analysis of the observed changes.

Methodology

The studies focused on a verification of facade cladding made of sandstones extracted from the Skała and Żerkowice deposits in the Lower Silesian Voivodeship, as well as from one of the deposits in Śmiłów in the Masovian Voivodeship. Buildings completed in similar time periods in Kraków (facade made of Śmiłów sandstone), Szczecin (facade made of Skała sandstone) and Gdańsk (facade made of Żerkowice sandstone) were selected for the investigation. Reference data concerning sandstone strength were obtained from the as-built documentation of building facades. Before its installation on the facade, the stone material was tested in accordance with standard [2] in order to assess its suitability for use. Samples of Skała sandstone were initially subjected to 25 freeze-thaw cycles, while the other sandstone samples underwent 48 test cycles in line with the standard procedures described in [2]. All the stone facades under verification had been fixed using a dry-mounting technology.

The results obtained for the reference samples were treated as the basis for the evaluation of the sandstone flexural strength changes. The studies were conducted during technical inspections of the building facades. In the case of the facades made of Śmiłów and Skała sandstones, the studies spanned 10 years, whereas in the case of the facades made of Żerkowice sandstone, from the tenth to the seventeenth year of service life. The samples were taken from randomly selected cladding panels retrieved from upper facade fragments (zones corresponding to category II usage according to [3]). Bending strength tests

wg normy [4]. Innych wymagań dotyczących płyt kamiennych, poza koniecznością deklaracji poszczególnych cech fizycznych i wytrzymałościowych oraz wymaganiami odnoszącymi się do geometrii płyt i wymiarów otworów na zakotwienia płyt, norma [1] nie obejmuje.

Płyty elewacyjne poddawane są obciążeniom statycznym, takim jak ciężar własny czy parcie i ssanie wiatru. Istotne ze względu na trwałość płyt są również oddziaływania środowiska, (zamróz, wpływ soli), a także obciążenia termiczne [5–7]. Duże znaczenie mają również czynniki biologiczne, a także chemiczne i fizyczne, powszechnie działające na kamień w środowisku aglomeracji miejskiej [8–11].

Zmiany parametrów wytrzymałościowych kamienia elewacyjnego powinny być uwzględniane w procesie projektowania elewacji kamiennych, niestety w literaturze krajowej brakuje odpowiednich wytycznych. Redukcja wytrzymałości elewacyjnych płyt kamiennych może być znaczna [12] i należy ją uwzględnić w doborze materiałów na elewacje oraz w modelach obliczeniowych stanów granicznych płyt elewacyjnych. W celu oszacowania trwałości eksploatacyjnej opracowano w wielu krajach modele redukcji wytrzymałości lokalnych materiałów kamiennych na podstawie badania wytrzymałości próbek okładzin kamiennych poddanych oddziaływaniom eksploatacyjnym w danym regionie [5], a także modele probabilistyczne [13] lub analizy obliczeniowe [14]. Celem artykułu jest weryfikacja zmian wytrzymałości trzech przykładowych polskich piaskowców, zastosowanych na okładziny elewacyjne w różnych regionach Polski i analiza przyczyn zaobserwowanych zmian.

Metoda badań

W ramach badań weryfikowano okładziny elewacyjne z piaskowców pochodzących ze złóż Skała i Żerkowice w województwie dolnośląskim oraz z jednego ze złóż w Śmiłowie, w województwie mazowieckim. Do badań wytypowano budynki zrealizowane w zbliżonym okresie w Krakowie (elewacja z piaskowca Śmiłów), Szczecinie (elewacja z piaskowca Skała) i w Gdańsku (elewacja z piaskowca Żerkowice). Dane referencyjne wytrzymałości piaskowców uzyskano z dokumentacji powykonawczej elewacji budynków. Materiał kamienny przed instalacją na elewacji został poddany badaniom zgodnie z normą [2] w celu oceny jego przydatności do stosowania. Próbkę piaskowca Skała poddano wstępnie 25 cyklom zamrażania i rozmrażania, natomiast pozostałe piaskowce próbie 48 cykli badań zgodnie z procedurami badawczymi opisanymi w [2]. Wszystkie weryfikowane elewacje kamienne zostały zamocowane w technologii montażu „na sucho”.

Wyniki badań próbek referencyjnych przyjęto jako podstawę do oceny zmian wytrzymałości na zginanie piaskowców. Badania realizowano w ramach prowadzonych przeglądów technicznych elewacji. W przypadku elewacji z piaskowca Śmiłów i Skała prowadzono je przez dziesięć lat, natomiast elewacji z piaskowca Żerkowice od dziesiątego do siedemnastego roku eksploatacji. Próbkę do badań pochodziły z losowo wybranych płyt okładzinowych pobranych z wysokich fragmentów elewacji (strefy odpowiadające II kategorii użytkowania wg [3]). W ramach badań weryfikowano wytrzymałość na zginanie próbek o wymiarach

were conducted on samples having dimensions 250 x 100 x 40 mm, cut from the collected facade panels subjected to concentrated load in accordance with the procedures described in [15]. The samples were placed in such a way that the stone layers, exposed during operation to direct environmental influences, experienced tensile stresses. Each series of tests involved six samples.

The stone samples corresponding to the last testing series were also used in petrographic analyses. The observation results of the sandstones unaffected by environmental factors coming from the deposits in Śmiłów, Skała and Żerkowice were used for comparison (as reference samples). Twenty five microscopic preparations were examined under a petrographic polarizing optical microscope with transmitted light.

Results

The bending strength test results for the reference samples and the samples after freeze-thaw cycles across different sandstone types are presented in Figure 1.

According to [16], if the strength reduction of natural stone after 25 standardized freeze-thaw cycles exceeds 20%, the material should be excluded from use in cold climate zones. Among the analyzed materials, only the Skała sandstone exhibited a significant reduction of flexural strength, by about 43% on average. The strength of the other sandstones after 48 freeze-thaw cycles declined, on average, by 12–16% (Figure 1).

The test results obtained for the sandstone samples taken from facade panels that had operated in natural conditions for 10 years differ considerably from the outcomes based on the standard procedures [2]. The results are presented in Tables 1–3 and in Figures 2–4. High values of the coefficient of determination R^2 indicate a strong dependency (correlation) between the strength changes over time. It should be noted, however, that a greater number of observations will be necessary in future studies to confirm the validity of this hypothesis.

The most pronounced decrease in flexural strength was recorded for the samples of Śmiłów sandstone (by ca. 75%), followed by Żerkowice sandstone (by ca. 55%). The samples of Skała sandstone exhibited a strength reduction of about 40%. In the following years, when there was no access to facades made of Skała and Śmiłów sandstones, the studies focused on facades made of sandstone originating from Żerkowice. The results are shown in Figure 3. After 17 years of service life, further strength deterioration of Żerkowice sandstone down to a level of 65% was observed.

The main mineral component of sandstones constituting their grain framework is quartz. The remaining components play a minor role (Table 1). The natural cement of sandstones is made of microcrystalline silica, iron oxides and hydroxides,

250×100×40 mm, wyciętych z pobranych płyt elewacyjnych, badanych pod obciążeniem skupionym zgodnie z procedurami opisanymi w [15]. Próbkę do badań układano w taki sposób, aby warstwy kamienia, narażone w fazie eksploatacji na bezpośrednie oddziaływanie wpływów środowiska, były poddawane naprężeniom rozciągającym. W każdej serii badano po 6 próbek.

Próbki kamienia z ostatnich serii badawczych poddano również badaniom petrograficznym. Jako poziom odniesienia (próbki referencyjne) przyjęto wyniki obserwacji piaskowców, niepoddanych oddziaływaniu środowiska, pochodzących ze złóż Śmiłów, Skała i Żerkowice. Wykonano badania 25 preparatów mikroskopowych przy użyciu petrograficznego, polaryzacyjnego mikroskopu optycznego do światła przechodzącego.

Wyniki badań

Wytrzymałość na zginanie próbek referencyjnych i próbek po cyklach zamrażania i rozmrażania, poszczególnych rodzajów piaskowca, przedstawiono na rysunku 1.

Zgodnie z [16], w przypadku gdy zmniejszenie wytrzymałości kamienia naturalnego pod wpływem normowych 25 cykli zamrażania i rozmrażania przekracza 20%, to badany materiał powinien

być wykluczony ze stosowania w strefach klimatu chłodnego. Z grupy analizowanych, tylko piaskowiec Skała wykazał się dużym spadkiem wytrzymałości na zginanie, wynoszącym średnio ok 43%. Wytrzymałość pozostałych piaskowców, po 48 cyklach zamrażania i rozmrażania, zmniejszyła się średnio o 12–16% (rysunek 1).

Wyniki badania próbek piaskowców pobranych z płyt elewacyjnych, eksploatowanych w warunkach naturalnych przez 10 lat, znacznie różniły się od wyników badań wg procedur normowych [2]. Wyniki tych badań pokazano w tabelach 1–3 oraz na rysunkach 2–4. Duże wartości współczynnika determinacji R^2 świadczą o dużej zależności (korelacji) pomiędzy zmianami wytrzymałości z upływem czasu. Należy jednak zwrócić uwagę, że

konieczne jest zwiększenie liczby obserwacji w przyszłości w celu potwierdzenia słuszności tezy o występujących zależnościach.

Największy zaobserwowany spadek wytrzymałości na zginanie odnotowano w przypadku próbek z piaskowca Śmiłów (o ok. 75%), a następnie w przypadku próbek z piaskowca Żerkowice (o ok. 55%). Próbkę z piaskowca Skała wykazały natomiast zmniejszenie wytrzymałości (o ok. 40%). Ze względu na brak dostępu do elewacji z piaskowca Skała i Śmiłów, w kolejnych latach badania realizowano na elewacji z piaskowca Żerkowice. Wyniki tych badań pokazano na rysunku 3. Po siedemnastu latach eksploatacji odnotowano dalsze zmniejszenie wytrzymałości piaskowca Żerkowice do poziomu 65%.

Głównym składnikiem mineralnym piaskowców, tworzącym ich szkielet ziarnowy, jest kwarc. Pozostałe składniki mają znaczenie podrzędne (tabela 1). Spoiwo piaskowców jest złożone

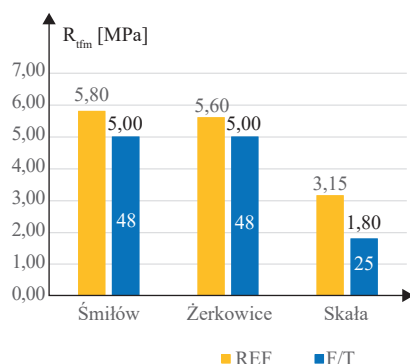


Fig. 1. Mean flexural strength of various sandstones tested as reference specimens and after exposure to freeze-thaw cycles

Rys. 1. Średnia wytrzymałość na zginanie poszczególnych piaskowców badanych jako próbki referencyjne i próbki po cyklach zamrażania i rozmrażania

Table 1. Estimators of the distribution of test results for changes in flexural strength of Śmiałów sandstone samples

Tabela 1. Estymatory rozkładu wyników badań zmiany wytrzymałości na zginanie próbek z piaskowca Śmiałów

Parameters/Parametry	Exposure time [years]/ Czas ekspozycji [lata]		
	0	4	10
Mean flexural strength [MPa]/ Średnia wytrzymałość na zginanie [MPa]	5.7	3.8	1.5
Standard deviation [MPa]/ Odchylenie standardowe [MPa]	0.2	0.4	0.1
Coefficient of variation/ Współczynnik zmienności	0.03	0.11	0.05

Table 2. Estimators of the distribution of test results for changes in flexural strength of Skala sandstone samples

Tabela 2. Estymatory rozkładu wyników badań zmiany wytrzymałości na zginanie próbek z piaskowca Skala

Parameters/ Parametry	Exposure time [years]/ Czas ekspozycji [lata]		
	0	2	10
Mean flexural strength [MPa]/ Średnia wytrzymałość na zginanie [MPa]	3.1	2.7	1.9
Standard deviation [MPa]/ Odchylenie standardowe [MPa]	0.2	0.3	0.2
Coefficient of variation/ Współczynnik zmienności	0.06	0.12	0.09

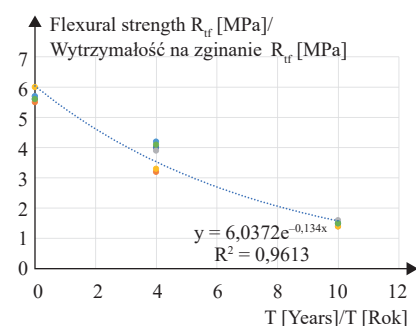
as well as clay minerals (kaolinite and illite). In Śmiałów sandstone, the share of cement is low, about 6.4% by volume (Table 1), and it is insufficient to bind all the framework grains. What plays a decisive role in stone cohesion, expressed by an average flexural strength of about 5.7 MPa, is the presence of quartz overgrowths. In Żerkowice sandstone, where the number of such grain rims is lower than in Śmiałów sandstone but the share of natural cement is almost twice as high (11.7% by volume), the flexural strength is comparable at 5.6 MPa (Table 4). In both sandstones the cement components and quartz rims are distributed between the framework grains in an irregular and non-uniform manner. As a result, zones are observed

Table 3. Estimators of the distribution of test results for changes in flexural strength of Żerkowice sandstone samples

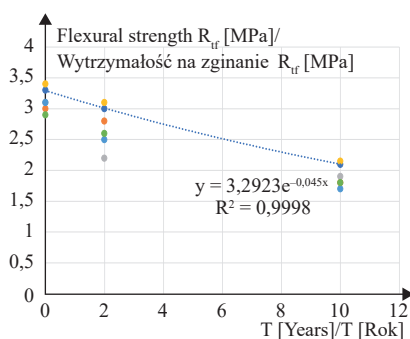
Tabela 3. Estymatory rozkładu wyników badań zmiany wytrzymałości na zginanie próbek z piaskowca Żerkowice

Parameters/Parametry	Exposure time [years]/ Czas ekspozycji [lata]				
	0	10	13	14	17
Mean flexural strength [MPa]/ Średnia wytrzymałość na zginanie [MPa]	5.6	2.6	2.2	2.1	2.0
Standard deviation [MPa]/ Odchylenie standardowe [MPa]	0.1	0.2	0.4	0.4	0.3
Coefficient of variation/ Współczynnik zmienności	0.02	0.09	0.18	0.20	0.16

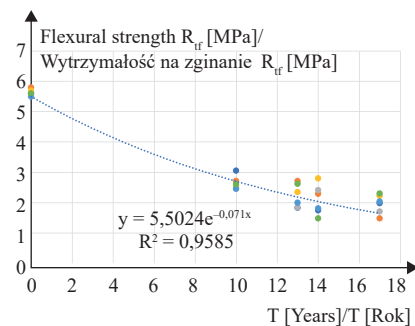
z mikrokrystalicznej krzemionki, tlenków i wodorotlenków żelaza oraz minerałów ilastych (kaolinitu i illitu). W piaskowcu Śmiałów udział spoiwa występuje w niewielkim udziale, wynoszącym łącznie 6,4% obj. (tabela 1) i z tego względu nie może ono w sposób wystarczający wiązać wszystkich ziaren szkieletu. Elementem decydującym o zwięzłości tej skały, wyrażanej wartością wytrzymałości na zginanie wynoszącą średnio 5,7 MPa, jest obecność kwarcowych obwódek. W piaskowcu Żerkowice o mniejszej liczbie obwódek, niż w piaskowcu Śmiałów, ale jednocześnie o niemal dwukrotnie większym udziale spoiwa (11,7% obj.), wartość wytrzymałości na zginanie jest podobna i wynosi średnio 5,6 MPa (tabela 4). W obu piaskowcach składniki spoiwa oraz kwarcowe obwódki rozmieszczone są między ziarnami szkieletu nieregularnie i nierównomiernie. W związku z tym obserwowane są strefy, w których ziarna przylegają do siebie prostymi ścianami lub wzajemnie się zazębiają. Takie strefy charakteryzują się znaczną zwięzłością i małą porowatością. W innych, znacznie liczniejszych miejscach skały, wierzchołki ziaren stykają się punktowo ze sobą lub ze ścianami innych ziaren (fotografia a). Takie ułożenie składników mineralnych sprawia, że piaskowce mają dużą porowatość, wynoszącą 23,4% – Żerkowice i 20,5% – Śmiałów. Pory charakteryzują się różnym, najczęściej nieregularnym kształtem i zróżnicowaną wielkością, wynoszącą w piaskowcu Śmiałów

**Fig. 2. Variation in flexural strength of Śmiałów sandstone specimens as a function of exposure time to external environmental conditions**

Rys. 2. Zmiana wytrzymałości na zginanie próbek z piaskowca Śmiałów w zależności od czasu ekspozycji na czynniki klimatu zewnętrznego

**Fig. 3. Variation in flexural strength of Skala sandstone specimens as a function of exposure time to external environmental conditions**

Rys. 3. Zmiana wytrzymałości na zginanie próbek z piaskowca Skala w zależności od czasu ekspozycji na czynniki klimatu zewnętrznego

**Fig. 4. Variation in flexural strength of Żerkowice sandstone specimens as a function of exposure time to external environmental conditions**

Rys. 4. Zmiana wytrzymałości na zginanie próbek z piaskowca Żerkowice w zależności od czasu ekspozycji na czynniki klimatu zewnętrznego

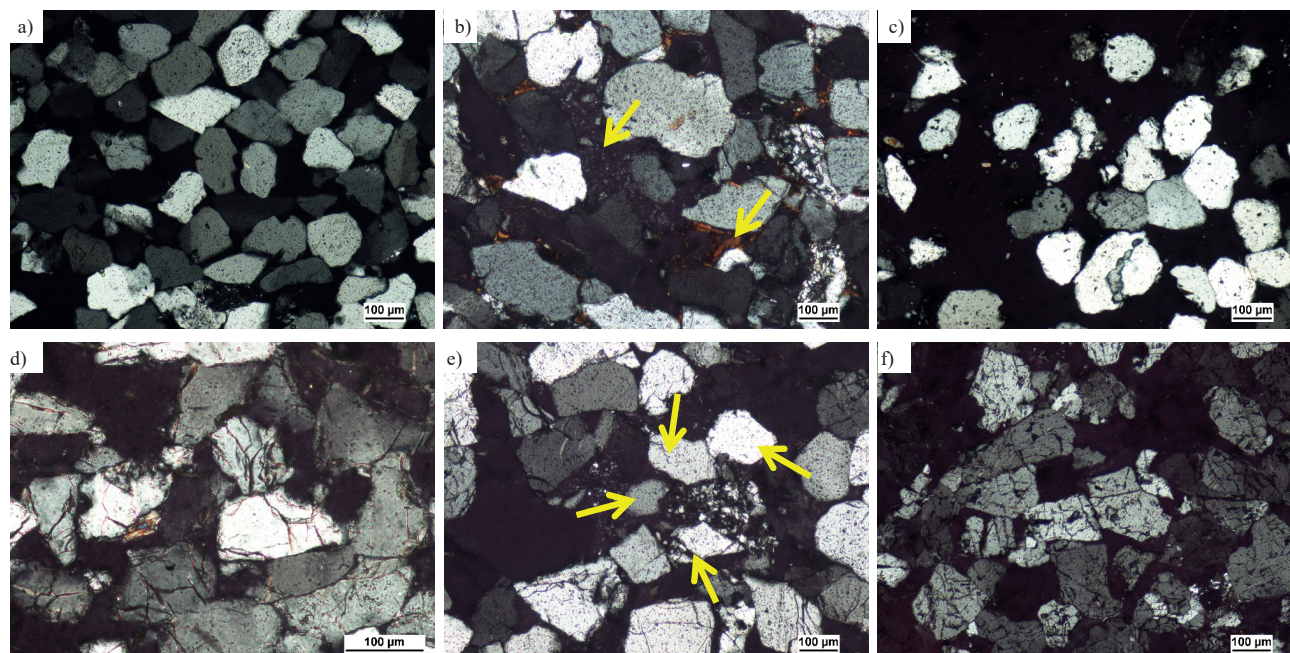
Table 4. Mineralogical composition and pore structure in sandstones
Tabela 4. Skład mineralny i udział porów w piaskowcach

Sandstone origin (deposit)/ Pochodzenie piaskowca (złoże)	Grain framework/Szkielet ziarnowy					Cement/Spoiwo			Share of pores [%]/ Udział porów [%]
	Quartz/Kware	Feldspars/Skalenie	Micas/Lyszczyki	Siliceous rock fragments/ Okruchy skał krzemionkowych	Other/Inne	Siliceous / krzemionkowe	Clayey/ilaste	Ferruginous/żelaziste	
	Mean component share [% by volume]/ Średnia zawartość składnika [% obj.]								
Śmiłów	84.9	5.3	1.8	1.1	0.5	2.4	2.9	1.1	20.5
Żerkowice	81.3	0.9	1.2	2.9	2.0	3.2	6.9	1.6	23.4
Skała	70.3	0.8	1.6	2.0	0.1	12.4	5.1	7.7	24.5

in which grains are in contact along their flat walls or they interlock. Such zones are characterized by high cohesion and low porosity. In other, more widespread regions of the stone, grain tips touch each other at single points or they touch walls of other grains (Photo a). This kind of alignment of mineral components leads to high porosity of the sandstones of about 23.4% – Żerkowice, and 20.5% – Śmół. Pores are characterized by different but most often irregular shapes and varying

od kilku mikrometrów do 0,2 mm, a w piaskowcu Żerkowice maksymalnie 0,7 mm.

Odmierna sytuacja występuje w piaskowcu Skąła. Przy niemal zupełnym braku w nim kwarcowych obwódek, duży udział spoiwa (25,2% obj.) powoduje, że to ono pełni główną rolę w wiązaniu ziaren (fotografia b). Spoiwo jest jednak bardzo nierównomiernie rozmieszczone, co sprawia, że wiele ziaren nie jest nim połączonych, a piaskowiec charakteryzuje się dużą



Microphotographs of the sandstones. Transmitted light, crossed polarizers: a) – Śmół sandstone, the grains are connected by corners and walls; b) Skąła sandstone, cement between grains (arrows); c) Śmół sandstone, spaced and uncracked grains on the outer surface of the stone; d) Śmół sandstone, cracked grains inside the stone; e) Żerkowice sandstone, uncracked grains, bound together by cement (arrows); around them, cracked grains, bound together by walls; f) Skąła sandstone, significantly cracked grains on the outer surface of the stone

Obrazy mikroskopowe piaskowców – polaryzatory skrzyżowane: a) piaskowiec Śmół, ziarna połączone są ze sobą narożami i ścianami; b) piaskowiec Skąła, spoiwo między ziarnami (strzałki); c) piaskowiec Śmół, porozuwane i niespękane ziarna przy zewnętrznej powierzchni kamienia; d) piaskowiec Śmół, spękane ziarna we wnętrzu kamienia; e) piaskowiec Żerkowice, ziarna bez spękań połączone spoiwem (strzałki), a wokół nich ziarna spękane, stykające się ścianami; f) piaskowiec Skąła, znacznie spękane ziarna przy zewnętrznej powierzchni kamienia

sizes – from a few micrometers to 0.2 mm in Śmiłów sandstone, and up to 0.7 mm in Żerkowice sandstone.

The situation is different in the sandstone from Skała. With an almost complete absence of quartz overgrowths, a high share of cement (25.2% by volume) makes it play a major role in grain binding (Photo b). The cementing material is distributed in a very non-uniform manner, leaving many grains unbound, and the sandstone is characterized by high porosity of 24.5%. Pores have irregular, often elongated shape and a size ranging from a few micrometers to 0.9 mm. Altogether, this leads to a much lower flexural strength averaging 3.1 MPa as compared to that of the other sandstones.

In all three sandstone types, pores are interconnected, which affects their permeability, facilitating the water penetration and movement within them.

The sandstones discussed here were subjected to years-long influences of environmental factors under urban conditions, corresponding to the medium atmospheric corrosivity category C3 according to [17]. It concerns urban and industrial environments, as well as coastal regions with low salinity, where there is moderate pollution with sulfur oxides SO_3 and a limited impact of atmospheric factors. Microscopic studies of all the sandstones revealed structural changes of varying range and intensity, depending on the sandstone type. In the sandstone from Śmiłów, after 10 years of service life, there was a clear and significant grain separation in the zone stretching from the surface of the stone down to a depth of 1.2 mm. In consequence, the grains lost partially or fully their original, mutual connections (Photo c). The outermost quartz grains and feldspars, as well as rock particles, experienced loss of cohesion, which led to surface defects. The pores existing between the remaining grains, situated slightly deeper (down to about 2.3 mm from the surface) increased up to 0.6 mm. The disintegration has an intergranular character, typically along contact surfaces between grains. As a result, the grains kept their original shape and suffered only minor cracking. With an increasing distance from the stone surface, the spacing between the displaced framework grains gradually decreases, while the grains themselves become more cracked. At a depth of 7.8 mm from the stone surface, almost all grains exhibit numerous cracks with an irregular pattern (Photo d). As we look deeper into the stone, cracks become less frequent, and beyond 8.2 mm the sandstone structure is intact and resembles the reference sandstone presented in the petrographic description.

In the case of the sandstone from Żerkowice, the 17-year service life of the structure resulted in significant structural changes similar to those seen in the Śmiłów sandstone specimens. In the outer stone layer (down to a depth of 1.8 mm) most of the grain-to-grain connections in the form of quartz overgrowths are broken along their contact planes. In the expanded pore space of such a loosened structure, some clayey and ferruginous particles of the natural cement migrated, disturbing the original grain bonding system and closing some smaller pores. Other particles located on the stone surface crumbled away, including the detached grains of the stone framework. As a result, the distribution of such cement components in this

porowatością równą 24,5%. Pory mają nieregularny, często wydłużony, kształt i wielkość od kilku mikrometrów do 0,9 mm. Wszystko to skutkuje łącznie wyraźnie mniejszą wytrzymałością na zginanie od pozostałych piaskowców, wynoszącą średnio 3,1 MPa.

We wszystkich trzech piaskowcach, pory są połączone. To wpływa na nasiąkliwość, sprzyjającą wnikaniu wody i przemieszczaniu się w ich obrębie.

Badane piaskowce poddane były wieloletniemu działaniu czynników w miejskich warunkach środowiskowych, którym wg [17] przypisana jest średnia kategoria korozyjności atmosfery C3. Obejmuje ona środowisko miejskie i przemysłowe, a także obszary przybrzeżne o małym zasoleniu, gdzie występuje średnie zanieczyszczenie tlenkami siarki SO_3 oraz umiarkowany wpływ czynników atmosferycznych. Badania mikroskopowe piaskowców wykazały, że we wszystkich z nich doszło do zmian strukturalnych o zróżnicowanym zasięgu i nasileniu, uzależnionym od rodzaju piaskowca. W piaskowcu Śmiłów, po dziesięciu latach użytkowania obiektu, doszło w strefie sięgającej od zewnętrznej powierzchni kamienia do głębokości 1,2 mm do wyraźnego i znacznego porozsuwania ziaren względem siebie. W efekcie utraciły one częściowo lub nawet całkowicie, wzajemne, pierwotne połączenia (fotografia c). Najbardziej zewnętrzne ziarna kwarcu i skaleni oraz okruszki skalne uległy wykruszeniu, co doprowadziło do powstania powierzchniowych ubytków. Pory istniejące pomiędzy pozostałymi ziarnami, położonymi nieco głębiej (do ok. 2,3 mm od powierzchni), uległy powiększeniu do 0,6 mm. Rozpad ma charakter międzyziarnowy, zwykle wzdłuż powierzchni wzajemnego styku ziaren. Dzięki temu zachowały one swój pierwotny kształt i uległy tylko nieznacznemu spękananiu. W miarę oddalania się od powierzchni kamienia, odległości między przemieszczonymi ziarnami szkieletu skały są coraz mniejsze, ale jednocześnie są one coraz bardziej spękanne. Na głębokości 7,8 mm od powierzchni kamienia, niemal wszystkie ziarna zawierają liczne pęknięcia o nieregularnym przebiegu (fotografia d). W głębszej części kamienia spękania są coraz rzadsze, a od głębokości 8,2 mm piaskowiec ma nienaruszoną strukturę i wykształcony jest jak piaskowiec referencyjny, przedstawiony w opisie petrograficznym.

W piaskowcu Żerkowice, siedemnastoletni okres użytkowania obiektu doprowadził do równie istotnych zmian struktury, jak w piaskowcu Śmiłów. W zewnętrznej części kamienia (do głębokości 1,8 mm) doszło do zerwania większości połączeń międzyziarnowych, o charakterze obwódek kwarcowych, wzdłuż płaszczyzn ich wzajemnego kontaktu. W powiększonej przestrzeni porowej takiej rozluźnionej struktury, niektóre ilaste i żelaziste cząstki spoiwa przemieściły się, naruszając pierwotny układ wiązania ziaren i zamykając część małych porów. Inne, znajdujące się na powierzchni kamienia, wykruszyły się, łącznie z odspojonymi ziarnami szkieletu. W efekcie, rozmieszczenie tych składników spoiwa w tej części kamienia jest bardzo nierównomierne, a ich udział jest wyraźnie mniejszy niż w jego wnętrzu.

Odminną sytuację stwierdzono w przypadku mikrokryształicznej krzemionki. Ten składnik spoiwa zachował się stabilnie, utrzymując pierwotne, trwałe wiązanie ziaren szkieletu

stone part is strongly non-uniform, and their proportion is visibly lower than inside the stone.

A different situation was revealed in the case of microcrystalline silica. This natural cement component behaved in a stable manner, maintaining the original, durable bonding of grains in the rock framework. Such contrasting behaviors of cement components led to visible and quite dense silica-bound grain clusters, located in the sandstone at a depth of about 2.5 mm, next to regions with enlarged pores reaching 1.0 mm. In the outer stone layer discussed here, grains retained their original shape and suffered only minor cracking. Deeper in the stone, the number of cracked grains is higher, and those are mostly grains in direct wall-to-wall or corner-to-corner contacts, surrounded by pores. There is also quite a large number of crack-free grains or those with only individual cracks. They are characterized by being cemented to other grains, regardless of cement type (Photo e). Such a zone of co-existing grains with varying degree of preservation reaches a depth of 12.7 mm below the stone surface. Deeper, the sandstone exhibits an intact structure, resembling unaltered rock.

In the studied Skała sandstone, in its surface layer, the symptoms of structural damage after a decade of environmental impact were different than in the Śmiłów and Żerkowice sandstones. Down to a depth of 1.9 mm, all mineral grains are covered with a dense system of cracks (Photo f). Widespread grain fragment displacements are visible, indicating that they lost their mutual cohesion and partially disintegrated. Yet, the original bonding was preserved between the remaining grain fragments and numerous, ruptured cement particles adhering to them (mostly silica). Therefore, the deterioration of this stone part has primarily an intragranular character as a result of cracking and fragmentation of grains, as well as an intergranular character by disrupting cement particles and their detachment from the other rock components together with cracked grains. The mutual detachment of grains along their contact surfaces, widespread in the Śmiłów and Żerkowice sandstones, plays a negligible role in the Skała sandstone. In deeper stone fragments the intensity of destruction and the number of cracked grains gradually decrease. At a depth of 6–8 mm from the surface, the shares of cracked and intact grains are similar. At a depth of 9.8 mm, well preserved grains dominate, resembling those in unaffected rocks.

The petrographic studies of the sandstones from Śmiłów, Żerkowice and Skała did not reveal any presence of hydrophobic coating particles on their surfaces, nor in the near-surface zone. What is more, no secondary mineral phases (e.g. sulfates, chlorides, carbonates, nitrates) were found, whose precipitation would indicate the presence of supersaturated aqueous salt solutions in the stone pores.

Summary

The studies demonstrate that sandstone subjected to long-term operation of environmental factors suffers from structural damage and in consequence reduced cohesion manifesting itself by a lower flexural strength. The main symptom of the existing structural changes is the formation of multidirectional cracks between grains and/or inside them. The alignment and

skwały. Takie niejednakowe zachowanie się składników spoiwa spowodowało, że w piaskowcu na głębokości ok. 2,5 mm, obok miejsc o powiększonych porach osiagających 1,0 mm, widoczne są dość zwarte skupienia obejmujące kilka ziaren połączonych krzemionką. W omawianej zewnętrznej części kamienia, ziarna zachowały swój pierwotny kształt i uległy tylko nieznaczniemu spękaniu. W głębszej części kamienia liczba spękanych ziaren jest wyraźnie większa i są to przede wszystkim ziarna stykające się ze sobą bezpośrednio ścianami lub narożami i otoczone porami. Dość liczne są także ziarna bez spękań lub tylko z pojedynczymi szczelinami. Charakteryzują się one tym, że są połączone z innymi ziarnami spoiwem, niezależnie od jego rodzaju (fotografia e). Taka strefa współwystępujących ziaren, o różnym stanie zachowania, sięga do głębokości 12,7 mm od zewnętrznej powierzchni kamienia. Głębiej, piaskowiec wykazuje nienaruszoną strukturę, jak w przypadku skały niezmienionej.

W piaskowcu Skała, w przypowierzchniowej części kamienia, stwierdzono odmienne niż w piaskowcach Śmiłów i Żerkowice przejawy destrukcji, wywołanej dziesięcioletnim działaniem czynników środowiskowych. Do głębokości 1,9 mm od zewnętrznej powierzchni kamienia, wszystkie ziarna mineralne pokryte są gęstą siecią spękań (fotografia f). W wielu miejscach ich fragmenty zostały porozsuwane i utraciły wzajemną spójność, a część uległa wykruszeniu. Jednocześnie zachowane zostało połączenie pozostałych fragmentów ziaren z przylegającymi do nich, dość licznymi, porozrywanyimi cząstkami spoiwa, głównie krzemionkowego. Rozpad tej części kamienia ma zatem charakter głównie wewnątrzziarnowy, w wyniku pęknięcia i rozdrabniania ziaren, a także międzyziarnowy przez rozrywanie cząstek spoiwa i odpajanie ich wraz z fragmentami pękniętych ziaren od pozostałych składników skały. Wzajemne odpajanie ziaren wzdłuż ich powierzchni kontaktowych, powszechne w piaskowcach Śmiłów i Żerkowice, ma w piaskowcu Skała znikome znaczenie. W głębiej położonych fragmentach kamienia intensywność przejawów destrukcyjnych oraz liczba spękanych ziaren stopniowo się zmniejsza. Na głębokości 6–8 mm od powierzchni płyt, ziarna spękane mają porównywalny udział, jak ziarna niespękane. Na głębokości 9,8 mm występują już przede wszystkim ziarna niespękane, tak jak w niezmienionej skale.

Badania petrograficzne piaskowców Śmiłów, Żerkowice i Skała nie wykazały w żadnym z nich obecności cząstek powłoki hydrofobowej na powierzchni, ani też w strefie przypowierzchniowej. Nie wykazano także obecności żadnej z wtórnych faz mineralnych (np. siarczanów, chlorków, węglanów, azotanów), które wytrącając się, świadczyłyby o obecności przesyconych roztworów wodnych soli w porach kamienia.

Podsumowanie

Badania wykazały, że w piaskowcach poddanych wieloletniemu działaniu czynników środowiskowych doszło do naruszenia ich struktury, a w ślad za tym, do zmniejszenia wytrzymałości, wyrażającej się zmniejszeniem wytrzymałości na zginanie. Głównym przejawem zaistniałych zmian strukturalnych jest powstanie wielokierunkowych spękań między ziarnami

distribution of cracks indicate a complex stress-strain condition of the stone [18, 19] under the influence of likely cyclic, differently oriented, concentrated or distributed loads. The intensity and range of the changes differ across the sandstones, which could be associated with their slightly different internal structures, but also varying time of their exposure to destructive environmental factors acting with unequal forces. At the same time, in all the sandstones, there is a noticeable zoning in the intensity of changes – with the greatest zoning in the outer stone part and a gradual decrease towards the inner part.

Microscopic studies reveal that all the sandstones experienced partial saturation by precipitation water, which underwent freezing and thawing in periods of lower temperature varying around 0°C. The water penetration was facilitated by the high porosity of the sandstones. The destructive impact of freezing water was the highest in the case of **Śmiałów sandstone**. Although the depth of the cracking zone of 8.2 mm is not the greatest among the stones, the changes were the most intense there, because down to a depth of 7.8 mm from the stone surface almost all grains had cracked.

In **Żerkowice** sandstone, the depth of the weather-induced changes is 12.7 mm, but the cracked grains are not dominant despite 17 years of the stone exposure. There are also numerous grains without cracks or with only individual fissures separated from the other grains with natural cement. Therefore, the presence of the cement, predominantly of clayey and ferruginous composition, most probably influenced the relaxation of stresses occurring in the surrounding grains. Nevertheless, it did not prevent granular sandstone disintegration in the surface layer. Similarly to Śmiałów sandstone, the observations revealed the presence of a 2.5-mm-thick layer with clear separation and detachment of entire grains, and also expansion of pores reaching up to 1 mm in size.

In **Skala** sandstone, with a high share of pores having substantial sizes (up to 0.9 mm), periodically freezing water affected the grain cohesion down to a depth of 9.8 mm. In that stone, given that the proportion of cement was several times higher than in the other stones, a large number of grains were bound by clayey, ferruginous or siliceous particles. The pressure exerted on the grains by the freezing water was transferred onto the cement particles, which behaved quite plastically and together with mica packages suffered minor deformations. In the surface layer of the stone (down to a depth of 1.9 mm), instead of the intergranular disintegration taking place in the other sandstones, consolidation of a large number of grains with the natural cement caused strong cracking, followed by grain fragmentation and spalling of grain fragments.

None of the sandstones studied were found to exhibit signs of environmentally-induced chemical pollution or the effects of biological agents on structural changes. However, it cannot be excluded that such factors had some insignificant, synergistic influence on the observed changes.

Substantial differences were observed between the flexural strength of the sandstones exposed to standard-compliant freeze-thaw cycles and the flexural strength of the sandstones that had experienced such cyclic temperature

i/lub wewnątrz nich. Ułożenie i rozmieszczenie spękań wskazują na złożony stan naprężeń i odkształceń kamienia [18, 19], pod wpływem prawdopodobnie cyklicznych, różnie ukierunkowanych, punktowych i rozproszonych obciążeń. Intensywność oraz zasięg powstałych zmian są różne w poszczególnych piaskowcach, co można wiązać przede wszystkim z ich nieco inną budową wewnętrzną, ale także z różnym czasem ekspozycji na czynniki niszczące środowiska oraz niejednakową siłą działania tych czynników. Jednocześnie, we wszystkich piaskowcach, zauważalna jest strefowość natężenia tych zmian – największa występuje w zewnętrznej części kamienia i stopniowo zmniejsza się do wnętrza.

Na podstawie wyników badań mikroskopowych stwierdzono, że wszystkie badane piaskowce ulegały częściowemu nasyceniu wodą pochodzącą z opadów atmosferycznych, która w okresach obniżonej temperatury, podczas przechodzenia przez 0°C, ulegała cyklicznemu zamarzaniu i rozmarzaniu. Wnikaniu wody sprzyjała znaczna porowatość tych piaskowców. Niszczący wpływ zamarzającej wody w największym stopniu zaznaczył się w **piaskowcu Śmiałów**. Mimo że grubość strefy spękań wynosząca 8,2 mm nie jest największa w porównaniu z pozostałymi kamieniami, to jednak nasilenie tych zmian jest największe, gdyż do głębokości 7,8 mm od powierzchni kamienia, niemal wszystkie ziarna uległy spękaniu.

W **piaskowcu Żerkowice** głębokość powstałych zmian wynosi 12,7 mm, ale w strefie tej, pomimo siedemnastoletniego czasu ekspozycji kamienia, spękane ziarna nie są dominujące. Dość liczne są także ziarna bez spękań lub z pojedynczymi szczelinami, oddzielone spoiwem od pozostałych. Obecność spoiwa, szczególnie ilastego i żelazistego, miała zatem najprawdopodobniej wpływ na relaksację naprężeń powstających w sąsiadujących z nim ziarnach. Nie zapobiegła natomiast dezintegracji granularnej piaskowca w jego przypowierzchniowej części, gdyż podobnie jak w piaskowcu Śmiałów, stwierdzono w nim obecność strefy o grubości 2,5 mm, w której doszło do wyraźnego rozsuwania się i odpadania całych ziaren oraz do powiększania porów, osiagających wielkość do 1 mm.

W **piaskowcu Skala**, charakteryzującym się dużym udziałem porów o znacznej wielkości (do 0,9 mm), cyklicznie zamarzająca woda naruszyła zwięzłość ziaren do głębokości 9,8 mm. Ze względu na kilkakrotnie większy udział spoiwa niż w pozostałych skałach, duża liczba ziaren związana została przez cząstki ilaste, żelaziste lub krzemionkę. Nacisk wywierany na te ziarna przez zamarzającą wodę przekazywany był na cząstki spoiwa, które zachowywały się dosyć plastycznie i łącznie z pakietami łuszczyków ulegały nieznacznym deformacjom. Związanie dużej liczby ziaren spoiwem spowodowało także, że w przypowierzchniowej części kamienia (do głębokości 1,9 mm), zamiast rozpadu międzyziarnowego zachodzącego w pozostałych piaskowcach, doszło do silnego spękania, a następnie rozdrobnienia ziaren i wykruszania ich fragmentów.

Wyniki badań nie wykazały jednoznacznie w żadnym z badanych piaskowców wpływu chemicznego zanieczyszczenia środowiska lub czynników biologicznych na zmianę ich struktury. Nie można jednak wykluczyć, że czynniki te mogły mieć nieznaczny, synergiczny wpływ na powstałe zmiany.

variations under natural conditions. Despite a significantly higher number of cycles compared to the standard recommendations [1], only in the case of Skała sandstone and its samples taken from a facade after 10 years of operation was the flexural strength comparable to the results of the standard tests. In the case of the other sandstones, the flexural strength was much lower. Under the standardized conditions, at full saturation of pores with water across the entire sample, the freezing water exerted compressive stress on all grains, which led to the formation of differently-oriented cracks, partially inhibited by cement if it was abundant enough. In natural conditions, rain water penetrated into pore spaces down to varying depths, but no deeper than 13 mm. The remaining part of the stone panel was unsaturated with water. In the boundary zone, mineral grains were surrounded by pores that were either fully or only partially water-filled, and even empty ones. In such a situation, apart from compressive stresses in the contact zone between a grain and a water-filled pore, there were also tensile stresses between a grain and an empty pore, resulting in grain rupture or detachment from a neighboring grain. With each subsequent precipitation event, water penetrated the stone to different depths and filled different pores. In consequence, instead of a structural failure of the stone confined to a single plane, the entire zone prone to frequent water ingress suffered a significant structural weakening.

One should bear in mind that under conditions involving freezing water, depending on what pores are filled with ice in a given season, there may be situations where crystallization force will act in different directions, causing stresses with alternating orientations. This might potentially lead to fast material fatigue and cracking even under lower stresses than in scenarios involving static loads [20]. For this reason, with uneven pore water saturation, the stone could have undergone destruction faster in natural conditions than under standardized conditions where its water-filling is always uniform.

The results presented here concern a much shorter service life than the expected 50-year period. Nevertheless, the results demonstrate a strong discrepancy between the standard test results, which are used as the basis for designing limit states of facade panels, and the results obtained for panels operating under real-world conditions.

The evident structural degradation of the stone outer layers combined with its weakened flexural strength confirms a need for studies involving cyclic, one-sided wetting of the stone surface rather than its full water saturation. If the bending strength test values obtained in such studies are found to be significantly lower than those expected from the standard guidelines, it might be advisable to consider a revision of the standard-specified method [2].

Given the limited number of trials and the short observation time of individual facades in the present study, the observed relations cannot be used to assess the usefulness of the analyzed materials, nor to predict the durability of such facades. To this end, a much wider research scope is necessary regarding the durability of facade-dedicated sandstones and the development of national guidelines for designing stone cladding of exterior

Stwierdzono natomiast znaczne różnice między wartościami wytrzymałości na zginanie piaskowców, po wykonanych w sposób normowy cyklach zamrażania i rozmrażania, a wartością tego parametru w przypadku piaskowców poddanych cyklicznemu działaniu zmian temperatury w warunkach rzeczywistych. Pomimo znacznie większej liczby cykli od zalecanych w normie [1], wytrzymałość na zginanie próbek pobranych z elewacji po dziesięciu latach eksploatacji była porównywalna z wynikami badań normowych tylko piaskowca Skała, a w przypadku pozostałych piaskowców okazała się znacznie mniejsza. W warunkach normowych, przy pełnym nasyceniu wodą porów w całej objętości próbki, zamarzająca woda wywierała naprężenie ściskające na wszystkie ziarna, co doprowadzało do powstania różnie ukierunkowanych spękań, częściowo hamowanych przez spoiwo, gdy występowało w dużej ilości. W warunkach rzeczywistych, woda opadowa wsiąkała w przestrzeń porową na różną głębokość, nieprzekraczającą 13 mm. Pozostała część płyty była nienasycona wodą. W takiej granicznej strefie, ziarna mineralne otoczone były porami całkowicie nasyconymi wodą, a także tylko częściowo nią zapełnionymi lub porami pustymi. W takiej sytuacji, oprócz naprężeń ściskających na granicy ziarna z porą wypełnioną wodą, powstawały także naprężenia rozciągające na granicy ziarna z pustym porą, powodujące jego rozerwanie lub odspojenie od innego ziarna. W związku z tym, że w każdym kolejnym opadzie atmosferycznym woda wnikała na różną głębokość i nie zawsze wypełniała te same pory, nie dochodziło do załamania struktury kamienia wzdłuż tylko jednej płaszczyzny, ale znacznego jej osłabienia w strefie, która szczególnie często ulegała zamakaniu.

Należy mieć na uwadze, że w przypadku zamarzającej wody, w zależności od tego, które pory w danym sezonie są wypełnione lodem, może dochodzić do sytuacji, że siła krystalizacji będzie działać w różnych kierunkach, powodując naprężenia o zmiennym zwrocie. Może to prowadzić do szybkiego zmęczenia materiału i jego pęknięcia, nawet przy mniejszych naprężeniach, niż w przypadku obciążeń statycznych [20]. Z tego powodu w przypadku niejednakowego wypełnienia porów wodą, kamień mógł ulegać destrukcji szybciej w warunkach rzeczywistych niż w warunkach normowych, gdzie zawsze jest jednakowo wypełniany wodą.

Przedstawione wyniki badań obejmują znacznie krótszy czas eksploatacji w porównaniu z przewidywanym okresem pięćdziesięcioletnim. Świadczą jednak o znacznej rozbieżności pomiędzy wynikami badań normowych, które są podstawą do projektowania stanów granicznych płyt elewacyjnych i wynikami badań płyt eksploatowanych w warunkach rzeczywistych.

Wykazana w badaniach wyraźna degradacja struktury kamienia w jego zewnętrznej części, połączona ze znacznym zmniejszeniem jego wytrzymałości na zginanie, potwierdza potrzebę wykonania badań tego parametru w warunkach jednostronnego cyklicznego zwilżania jego powierzchni, zamiast całkowitego nasycania wodą. W przypadku uzyskania wartości znacznie mniejszych od uzyskanych w sposób normowy, należałoby rozważyć zasadność zmiany metody określonej normą [2].

building walls, as exemplified by standard [21]. Such investigations should also involve an evaluation of the impact of other environmental factors on stone, some of which contribute strongly to the destruction of sandstones, as demonstrated by previous studies [9, 11].

Ze względu na ograniczoną liczbę prób oraz krótki czas obserwacji poszczególnych elewacji, zaobserwowane zależności nie mogą służyć do oceny przydatności analizowanych materiałów ani do prognozowania trwałości podobnych elewacji. W tym celu istnieje potrzeba dokonania znacznie szerszych badań trwałości piaskowców, stosowanych na elewacje i opracowania krajowych wytycznych do projektowania okładzin kamiennych ścian zewnętrznych budynków, których przykładem może być norma [21]. Powinny one obejmować, ocenę wpływu na kamień również innych czynników środowiskowych, gdyż jak wykazały wcześniejsze badania [9, 11], niektóre z nich w istotny sposób powodują destrukcję piaskowców.

Badania zostały sfinansowane przez Ministerstwo Edukacji i Nauki przez subwencję na utrzymanie i rozwój potencjału badawczego.

Received: 30.07.2025
Revised: 02.09.2025
Published: 21.11.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 30.07.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.09.2025 r.
Opublikowano: 21.11.2025 r.

Literature

- [1] PN-EN 1469:2015-04 Natural stone products - Slabs for cladding - Requirements
- [2] PN-EN 12371:2010 Natural stone test method – Determination of frost resistance
- [3] EAD 090062-00-0404. Kits for external wall claddings mechanically fixed
- [4] PN-EN 12467. Fibre-cement flat sheets – Product specification and test methods.
- [5] Silva A, De Brito J, Gaspar PL. Service life prediction model applied to natural stone wall claddings (directly adhered to the substrate). *Constr Build Mater* 2011; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.064>.
- [6] Wasserman R, Ciabocco L, Shohet IM. Estimating the Service Life of Exterior Stone Claddings Subjected to Regular and Marine Service Conditions. *Appl. Sci.* 2023; <https://doi.org/10.3390/app13084942>
- [7] Ding S, Jia H, Zi F, Dong Y, Yao Y. Frost Damage in Tight Sandstone: Experimental Evaluation and Interpretation of Damage Mechanisms. *Materials*. 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13204617>
- [8] Rembiś M, Smoleńska A. Microstructural changes of sandstones from selected. historical buildings of Cracow as effects of anthropogenic pollution of the atmosphere. *ENVIWEATH'97: Book of Abstracts of the 2nd Conference of IGCP Project 405. Bratislava. Slovak Republic. Comenius University. Faculty of Natural Sciences.* 1997; 42–43.
- [9] Słaby E, Galbarczyk-Gąsiorowska L, Trzciniński J, Górka H, Łukaszewski P, Dobrowolska A. Mechanizm rozpadu piaskowców wywołany krystalizacją soli. *Przegląd Geologiczny*. 2001; 49. no. 2: 124–133.
- [10] Wilczyńska-Michalik W, Michalik M. Deterioracja materiałów skalnych w budowlach Krakowa. *Przegląd Geologiczny*. 1995; 43. 227–235.
- [11] Labus M. Evaluation of weathering-resistance classes in clastic rocks on the example of Polish sandstones. *Environmental Geology*. 2008; 54. no. 2. 283–289.
- [12] Besharatinezhad A, Török Á. The Effect of Freeze-thaw on Mechanical and Ultrasonic Properties of Hungarian Oolitic Stones. *Period. Polytech. Civil Eng.* 2024 ; <https://pp.bme.hu/ci/article/view/23268>
- [13] Camposinhos RS. Dimension stone design – partial safety factors: a reliability based approach. *Proc. Inst. Civ. Eng. – Constr. Mater.* 2012; 165. 3: 145–159.
- [14] Kočí V, Maděra J, Fořt J, Žumár J, Pavlíková M, Pavlík Z, Černý R. Service life assessment of historical building envelopes constructed using different types of sandstone: A computational analysis based on experimental input data. *The Scientific World Journal*. 2014; <https://doi.org/10.1155/2014/802509>
- [15] PN-EN 12372:2010 Natural stone test methods - Determination of flexural strength under concentrated load
- [16] Martínez-Martínez J, Benavente D, Gomez-Heras M, Marco-Castaño L, García-del-Cura M Á. Non-linear decay of building stones during freeze-thaw weathering processes. *Constr. Build. Mater.* 2013.; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.059>
- [17] PN EN ISO 12944-2:2001. Farby i lakiery. Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich. Część 2: Klasyfikacja środowisk.
- [18] Zhou S, Zhuang X, Zhu H, Rabczuk T. Phase field modelling of crack propagation, branching and coalescence in rocks. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.04.011>
- [19] Zhang Y, Wu X, Guo Q, Zhang Z, Cai M, Tian L. Research on the Mechanical Properties and Damage Constitutive Model of Multi-Shape Fractured Sandstone under Hydro-Mechanical Coupling. *Minerals*. 2022; <https://doi.org/10.3390/min12040436>
- [20] Brantut N, Petit L. Micromechanics of rock damage and its recovery in cyclic loading conditions. *Geophysical Journal International*. 2022; <https://doi.org/10.1093/gji/ggac447>
- [21] BS 8298-4:2020 Design and installation of natural stone cladding and lining. Stone cladding on rainscreen support systems - code of practice