

## Piaskowiec w architekturze Poznania – formy jego deterioracji na przykładzie elewacji budynku Collegium Iuridicum

Małgorzata Szczepaniak<sup>1</sup>



**Sandstone in the architecture of Poznań – its deterioration process on the example of the Collegium Iuridicum old building facade.** Prz. Geol., 70: 126–134; doi: 10.7306/2022.7

*A b s t r a c t.* The article presents various forms of deterioration in sandstone panels of the Collegium Iuridicum building in Poznań. The facade of this building is exposed to various urban and rural pollutants, which have a very significant influence on the weathering of the stone. The climatic conditions in which the test building is located and structure of the stone are also an important factors of the weathering. They can significantly accelerate the stone destruction processes. Based on the ICOMOS guidelines, deterioration forms were described and classified in macro and micro scales. For this purpose, optical, cathodoluminescence and scanning microscopy with EDS analyser were used. As a result of the research, secondary mineralization and the presence of numerous elements in the

black crusts were identified. They are directly related to polluted air and the combustion of solid fuels. The identified elements include: Na, Mg, Al, Ca, P, K, S, Hg, Pb, Fe, Ti, Sc, Ni, Br, Mo, Zn, Mn, gypsum, calcite, fly ash particle.

**Keywords:** sandstone, deterioration, black crust, cultural heritage, Poznań

Kamień, mimo popularności stali i betonu, od dziesięcioleci jest jednym z najpopularniejszych materiałów budowlanych i wykończeniowych, a jego walory dekoracyjne i trwałość są doceniane od setek lat. W architekturze Poznania kamień, w szczególności piaskowiec, swój renesans przeżywał na przełomie XIX i XX w. Pierwotnie w tym mieście jeszcze w średniowieczu wykorzystywano przede wszystkim eratyki ze względu na ich dostępność. Stosowano go do budowy pierwszych romańskich budowli zarówno na terenie miasta, jak i całej Wielkopolski. W późniejszym czasie materiał narzutowy był wykorzystywany coraz rzadziej, przede wszystkim jako element budowy cokołów wybranych budynków. Od XIX w., ze względu na coraz większe możliwości transportu surowca, eratyki zaczęły być zastępowane w architekturze stolicy Wielkopolski przez piaskowiec z Dolnego Śląska. Skała ta była i jest stosowana zarówno do wyrobu elementów tzw. małej architektury, jak i płyt okładzinowych. Zdobi ona elewacje wielu kamienic w centrum miasta, w tym dawną siedzibę G.B. Quadro z Lugano, architekta poznańskiego renesansowego ratusza, czy elewację i portale Muzeum Archeologicznego. Jest on także głównym materiałem okładzinowym większości najważniejszych budynków obecnego Traktu Królewsko-Cesarskiego, stanowiącego część dawnej Dzielnicy Cesarskiej (Skuratowicz, 1991).

Dzielnica ta powstała na początku XX w. Została wybudowana od podstaw w zachodniej części likwidowanej wówczas Twierdzy Poznań, w rejonie tzw. bramy berlińskiej, choć początki tej części miasta datowane są na koniec XIX w. W 1904 r. ostatni cesarz Niemiec – Wilhelm II Hohenzollern – powołał Królewską Komisję Rozbudowy Poznania, która miała odpowiadać za zmianę układu miejskiego Poznania i to właśnie ona zajęła się reorganizacją tej części miasta (Skuratowicz, 1991; Pazder, 2008). W skład modernizowanej wtedy dzielnicy wchodziło wiele najważniejszych dziś już zabytków miasta Poznania. Są to m.in.:

- Collegium Iuridicum (obiekt badań prezentowany w niniejszej pracy),
- Collegium Minus (dawna Akademia Królewska),

- Collegium Maius (dawny budynek Komisji Kolonizacyjnej),
- Teatr Wielki,
- Zamek Cesarski,
- Akademia Muzyczna (dawny Dom Ewangelicki),
- Dyrekcja Poczty czy budynek Ziemstwa Kredytowego (obecnie budynek Uniwersytetu Ekonomicznego).

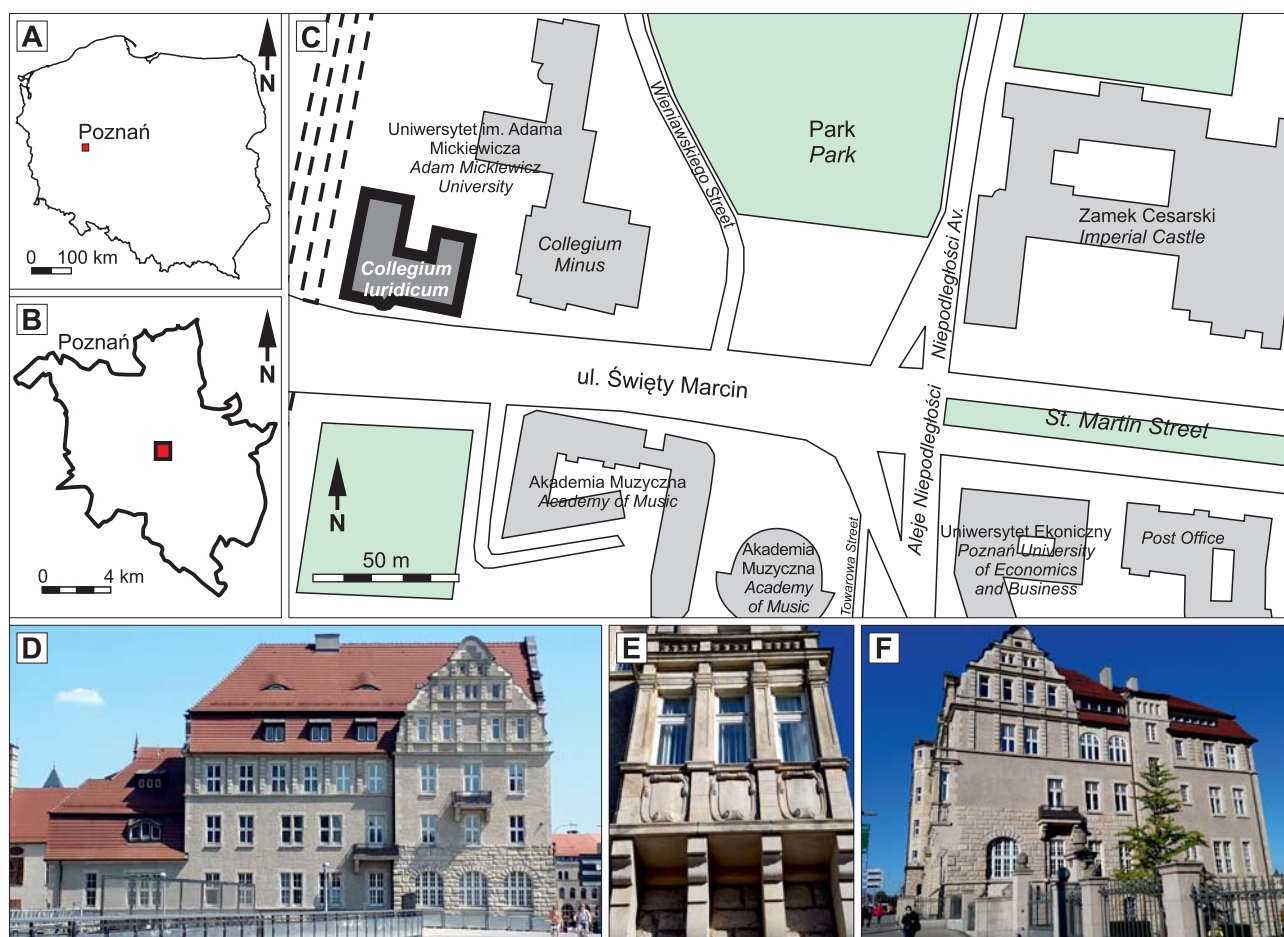
Wszystkie obiekty zostały wybudowane w pierwszym dziesięcioleciu XX w. W elewacji każdego z nich zastosowano piaskowiec dolnośląski z rejonu synklinorium północno- i śródsudeckiego (Walendowski, 2009, 2010a, b).

### PRZEDMIOT I CEL BADAŃ

Obecny budynek Collegium Iuridicum, mieszczący się w Poznaniu przy ul. Św. Marcin 90 (ryc. 1), jest jednym z wielu obiektów wspomnianej Dzielnicy Cesarskiej. Budowę gmachu, który pierwotnie był siedzibą Banku Spółek Raiffeisena, rozpoczęto w 1907 r., a już po roku oddano go do użytku. Po zakończeniu I wojny światowej w 1918 r. obiekt stał się jednym z budynków ówczesnego Uniwersytetu Poznańskiego. Elewacja budynku jest obecnie pokryta tynkiem, a jego niższe kondygnacje, ościeża okienne i portale są wykonane z piaskowca. Stylistyka obiektu nawiązuje do renesansu. Piaskowcowe detale architektoniczne przedstawiające m.in. ptactwo domowe, symbolikę rolniczą czy żeglugi odnosiły się do rolniczego charakteru dawnego banku (ryc. 1, 2; Pałat, 2006; Pazder, 2008).

Przedmiot badań stanowi okładzina piaskowcowa budynku Collegium Iuridicum, zlokalizowanego w ścisłym centrum miasta (ryc. 1, 2). Zabytek ten na przełomie lat 2010/2011 poddano kompleksowym pracom renowacyjnym. Oczyszczono zarówno elewację pokrytą tynkiem, jak i jej piaskowcową okładzinę. Wymieniono na nowe także liczne, uszkodzone kamienne panele (ryc. 2A–C). Na podstawie dokumentacji zachowanej z okresu budowy gmachu wiadomo, że okładzina została wykonana z piaskowca wieku kredowego z Radkowa, położonego w synklinorium śródsudeckim. Dzięki temu materiał do prac renowacyj-

<sup>1</sup> Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. B. Krygowskiego 12, 61-680 Poznań; [malgorzata.szczepaniak@amu.edu.pl](mailto:malgorzata.szczepaniak@amu.edu.pl)



**Ryc. 1.** Lokalizacja budynku Collegium Iuridicum (Wydziału Prawa i Administracji, UAM) w Poznaniu: A–C – lokalizacja na tle kraju, miasta i planu centrum miasta; widok elewacji po renowacji: D – elewacja zachodnia, E – fragment elewacji południowej, F – elewacja wschodnia  
**Fig. 1.** Location of the Collegium Iuridicum old building (Faculty of Law and Administration, AMU) in Poznań: A–C – location in Poland, Poznań city and Poznań city centre; view of the facade after renovation: D – western facade, E – fragment of the southern facade, F – eastern facade

nych pozyskano z tego samego miejsca. Piaskowiec ten był powszechnie stosowany także w wielu innych poznańskich zabytkach (np. Collegium Minus i Maius; Walendowski, 2009).

Powierzchnia skały w warunkach naturalnych pokrywa się tzw. patyną, natomiast w środowisku zurbanizowanym fałszywą patyną (czarnymi naskorupieniami) będącą skutkiem zanieczyszczenia powietrza (Amoroso, Fassina, 1983; Labus, 2008; Marszałek i in., 2014). W zależności od litologii, klimatu, odległości od zasolonych zbiorników wodnych oraz stopnia zanieczyszczenia atmosfery, skład takiej fałszywej patyny może być bardzo zróżnicowany.

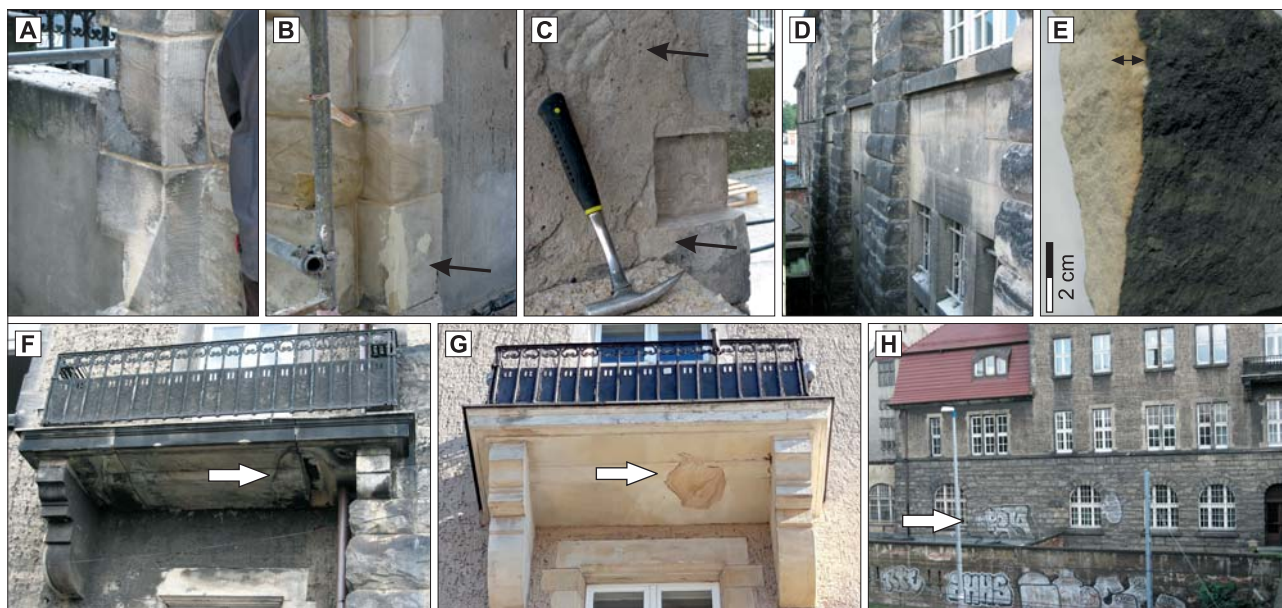
Piaskowce ze złoża w Radkowie, będące przedmiotem badań, są zaliczane do środkowego piaskowca ciosowego wieku turońskiego (Ruśkiewicz-Saab, Kita-Badak, 1978 za: Kozłowski, 1986). Klasyfikowane są jako arkozy i subarkozy o zróżnicowanym składzie i proporcjach spoiwa (spoiwo krzemionkowe, żelaziste, ilaste). W związku z tą ostatnią cechą, ich zabarwienie jest także zróżnicowane: od różowego przez kremowy, jasnoszary po ławice z brunatnymi wkładkami. W wybranych ławicach występują dodatkowo liczne odciski i ośrodkie muszli ślimaków oraz małży, co wpływa na duże zróżnicowanie tego kamienia. Cechuje go m.in. pełna mrozoodporność, porowatość ok. 15%, wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie zarówno w stanie powietrzno-suchym (w zależności od cytowanej pracy od średnio 42 MPa do wartości >53MPa),

po nasyceniu wodą (>53MPa), jak i w stanie nasycenia wodą po badaniu mrozoodporności (>45MPa) jest wysoka. Dzięki tym właściwościom fizyko-mechanicznym jakość materiału jako kamienia budowlanego, także do produkcji płyt okładzinowych, jest wysoka (Jerzykiewicz, 1968, 1971, 1979; Walendowski, 2009; Labus, 2010; Szczepaniak, 2015).

Celem niniejszej pracy była identyfikacja zróżnicowanych form deterioracji występujących w okładzinie Iuridicum, ocena ich stopnia zaawansowania oraz szczegółowa charakterystyka w oparciu o wytyczne ICOMOS (ICOMOS-ISCS, 2008). Realizowano go przez zastosowanie głównie metod mikroskopowych oraz analiz chemicznych. Wykonanie założonego celu pozwoliło wydzielić formy niszczenia: fizyczne (w tym mechaniczne), biologiczne oraz chemiczne, które często są następstwem działania organizmów lub związków zawartych w atmosferze w wyniku antropresji.

## METODY BADAWCZE

Analizę materiału skalnego przeprowadzono podczas badań makro- i mikroskopowych. Jako pierwszy został wykonany opis makroskopowy (ICOMOS, 2008; Szczepaniak, Rój, 2019; Szczepaniak, 2021). Wśród badań mikroskopowych należy wymienić analizy przeprowadzone z zastosowaniem: mikroskopu polaryzacyjnego (OM), elektro-



**Ryc. 2.** Widok zanieczyszczonej lub uszkodzonej elewacji Collegium Iuridicum: **A–C** – wycięte fragmenty elementów piaskowcowych elewacji oraz uzupełnień specjalnymi klejami oraz zaprawą; **D** – czarne naszkorupienia na zachodniej elewacji; **E** – próbka z uszkodzonych detali z widoczną migracją zanieczyszczeń w głąb elementu piaskowcowego na głębokość 1 cm oraz biodeteriacją; **F** – uszkodzenia balkonu w postaci pęknięć i wtórnych wykwitów mineralnych w okolicy rur spustowych; **G** – pęknięcia piaskowca na balkonie zachodniej elewacji kilka lat po przeprowadzonych pracach renowacyjnych; **H** – graffiti na piaskowcowej elewacji zachodniej  
**Fig. 2.** View of the contaminated or damaged facade elements of the Collegium Iuridicum: **A–C** – cut-off fragments of sandstone facade and special mortar infillings; **D** – black crusts on the western elevation; **E** – sample of damaged architectural details with visible migration of pollutants into the sandstone to a depth of 1 cm, biodegradation; **F** – cracks in the balcony and secondary mineralization in the area of downpipe; **G** – sandstone cracks on the balcony (west facade) a few years after the renovation works; **H** – graffiti on the sandstone west facade

nowego mikroskopu skaningowego (SEM) oraz mikroskopu katodoluminescencyjnego (CL). W ramach prac laboratoryjnych wykonano także zarówno 170 analiz punktowych, jak i powierzchniowych składu chemicznego z wykorzystaniem detektora EDS.

Badania petrograficzne przeprowadzono za pomocą mikroskopu optycznego Olympus AX70, a analizy uziarnienia realizowano z wykorzystaniem oprogramowania AnalySIS. Mikroskop skaningowy użyty do badań to aparatura Hitachi S-3700N z przystawką EDS Noran SIX. Wszystkie badania (zarówno prób makroskopowych, jak i płytek cienkich) wykonano w niskiej próżni, bez napyłania. Analizy chemiczne przeprowadzone z wykorzystaniem SEM-EDS były analizami półilościowymi i bezwzorcowymi. Badania katodoluminescencyjne wykonano wykorzystując aparaturę Citl Cold Cathode Luminescence CCL 8200 mk3 Cambridge Image Technology Ltd. z aparatem cyfrowym Nikon EOS 1100D. Mikrografie były wykonywane przy napięciu 15 kV i natężeniu wiązki od 200 do 230  $\mu\text{A}$ . Czas naświetlania wynosił od 10 do 15 sekund przy ustawionej czułości 1600 ASA.

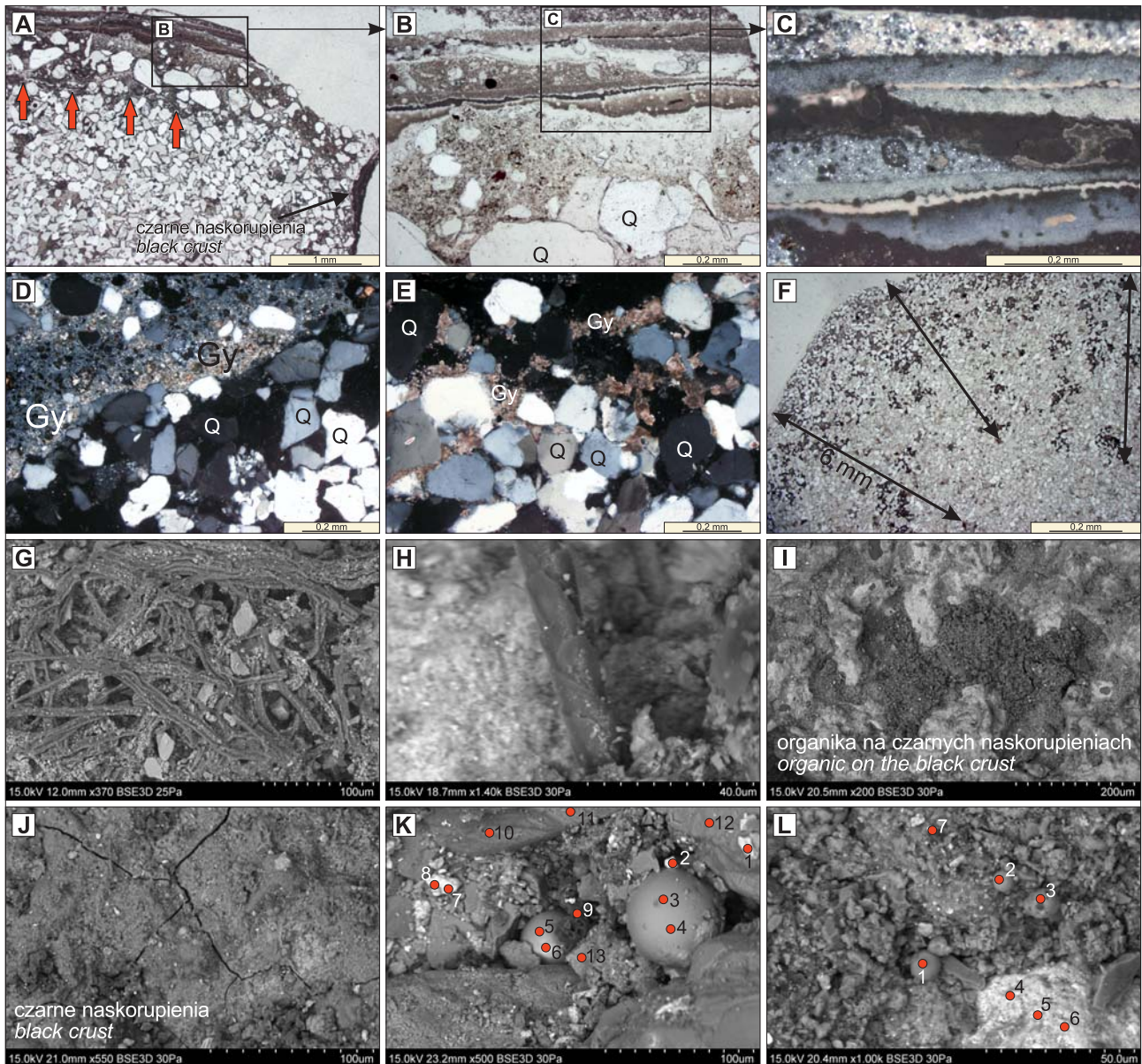
Materiał do badań otrzymano dzięki uprzejmości firmy konserwatorskiej. Ze względu na brak pozwolenia na wejście na obszar prac został on pozyskany przez pracowników tejże firmy z miejsc najbardziej uszkodzonych mechanicznie lub fizycznie i następnie udostępniony do analiz laboratoryjnych. Badania te wykonano na próbkach znacznych rozmiarów, przekraczających nawet  $20 \times 10 \times 5$  cm. Brak wpływu na miejsce ich poboru w obrębie elewacji uniemożliwia ich orientację. Utrudnia to zatem odniesienie otrzymanych wyników (np. obecności zanieczyszczeń danego typu) m.in. do wystawy elewacji względem kierunków świata, wysokości elewacji n.p.t. oraz zawilgocenia paneli piaskowcowych związanego np. z sąsiedztwem rur spus-

towych i rynien. Otrzymano łącznie 8 dużych próbek, na których były widoczne ślady fałszywej patyny o głębokiej czarnej barwie, biodeteriacji oraz wtórnej krystalizacji, a także kilkanaście mniejszych próbek.

Badania makroskopowe były skupione na identyfikacji i opisie głównych form niszczenia piaskowca obserwowanych w badanej elewacji. Na podstawie obserwacji mikroskopowych określono główne cechy badanych piaskowców, takie jak: skład mineralny, uziarnienie, obtoczenie, wysortowanie, charakter spoiwa oraz porowatość. Analizy mikroskopowe bazowały na płytkach cienkich, a w przypadku analiz SEM-EDS były one prowadzone głównie na większych próbkach o rozmiarach do ok.  $5 \times 5 \times 5$  cm (pojedyncze na płytkach cienkich).

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Próbki piaskowca pochodzące z elewacji Collegium Iuridicum były zróżnicowane, podobnie jak piaskowce wieku kredowego występujące w Radkowie. Wśród badanych próbek opisano zarówno skały średnio- (z niewielką domieszką frakcji żwirowej), jak i drobnoziarniste. Ich zabarwienie na czystych powierzchniach zostało określone jako kremowe i jasnoszare. W jednej z próbek są zauważalne ciemniejsze, delikatnie różowe i nieregularne smugi. Szkielet ziarnowy jest zbudowany głównie z kwarcu, jednak w zależności od próbki są także obserwowane domieszki skaleni, głównie potasowych, w różnej proporcji. Stanowią one w analizowanych próbkach do 5–6%. W skład szkieletu wchodzi także nieliczne minerały ciężkie, wśród których zidentyfikowano m.in. cyrkon czy rutyl. W spoiwie dominuje krzemionka wykształcona głównie w postaci obwódek regeneracyjnych, obserwowane są także domieszki minerałów ilastych, głównie kszączkowych pakietów



**Ryc. 3.** Przykłady deterioracji w obrazie mikroskopowym: A–C – warstwy malarskie, pozostałości graffiti na elewacji kamiennej oraz czarne naskorupienia; D–E – krystalizacja drobnokrystalicznego gipsu na zniszczonych powierzchniach okładziny piaskowcowej; F – głębokość zanieczyszczeń migrujących w głąb okładziny; G–I – próbka Coll.Iurid.50 z widoczną biodeteriacją; J – próbka Coll.Iurid.2 oraz widoczna spękana powierzchnia czarnych naskorupień; K – próbka Coll.Iurid.1 widoczne zanieczyszczenia na powierzchni piaskowców oraz pyły; L – próbka Coll.Iurid.5 z widocznymi zanieczyszczeniami oraz pyłami; Q – kwarc, Gy – gips. A, B, F – obraz z mikroskopu polaryzacyjnego przy jednym nikolu, C–E – skrzyżowane nikole, G–L – SEM; czerwone strzałki wskazują pęknięcia równoległe do powierzchni piaskowca; czerwone punkty to miejsca wykonanych analiz składu chemicznego z wykorzystaniem EDS, wyniki zaprezentowano w tab. 1 – ryc. 3K, w tab. 6 – ryc. 3L

**Fig. 3.** Examples of deterioration in a microscopic image: A–C – painting layers, related to graffiti residues and black crusts on a stone facade; D–E – crystallization of fine-grained gypsum on deteriorated surfaces of sandstone panels; F – depth of contaminants migration into the stone panels; G–I – sample Coll.Iurid.50 with biodeterioration; J – sample Coll.Iurid.2 with visible cracked surface of black crust; K – sample Coll.Iurid.1 with contaminants and fly ash particles on the sandstone surface; L – sample Coll.Iurid.5 with contaminants and fly ash particles; Q – quartz, Gy – gypsum. A, B, F – one nicol in polarized microscope, C–E – crossed nicols, G–L – SEM; red arrows show cracks parallel to the sandstone surface; EDS spots are marked in red – the results are presented in Table 1 – Fig. 3K and Table 6 – Fig. 3L

minerałów z grupy kaolinitu, oraz niewielkie ilości spoiwa żelazistego. Masa wypełniająca jest niezauważalna. Dwa ostatnie rodzaje spoiw występują w zmiennych proporcjach. Na podstawie składu mineralnego, rodzaju cementów oraz udziału matriksu piaskowce z elewacji można zaliczyć do skał na pograniczu arenitów kwarcowych i subarkoz z bardzo niewielkim udziałem skaleni (Pettijohn i in., 1972). Szkielet ziarnowy w analizowanych próbkach cechuje się dobrym wysortowaniem oraz drobną i średnią wielkością ziaren, w zależności od próbki. Badany materiał

skalny charakteryzował się porowatością szacowaną na 13–15%. Porowatość ta jednak spadała wraz ze zmniejszaniem się odległości od krawędzi detalu piaskowcowego pokrytego czarnym naskorupieniem (ryc. 3A, F). Zauważalna była tam bowiem wtórna mineralizacja (ryc. 3D, E) oraz czarne naskorupienia wnikające w głąb skały (ryc. 3A–F), które wypełniały wcześniejsze wolne przestrzenie.

Ze względu na to, że piaskowiec ten nieznacznie różni się od skały ze złoża (głównie frakcją oraz mniejszym zróżnicowaniem kolorystycznym) można przypuszczać, że

był on bardzo selektywnie wybierany ze złożeń, zgodnie z funkcją, jaką miał pełnić w obiekcie. W elewacji budynku brak jest bowiem skały chociażby o różowym zabarwieniu czy frakcji psefitowej.

W trakcie prac terenowych makroskopowo zidentyfikowano i opisano różne formy deterioracji, z którymi spotkano się na elewacji piaskowcowej Collegium Iuridicum. Opis ten wykonano na podstawie wytycznych słownika ICOMOS (ICOMOS-ISCS, 2008; w uproszczonej formie przedstawiony także w polskiej literaturze: Ruszkowski, Wiszniewska, 2019). Klasyfikuje i systematyzuje on poszczególne formy deterioracji na potrzeby prac konserwatorskich kamiennych obiektów architektonicznych na pięć głównych grup. Oczywiście nie wszystkie wymienione i opisane przez ICOMOS rodzaje obserwowane były w elewacji, gdyż sam słownik prezentuje rodzaje deterioracji dla mocno zróżnicowanych typów litologicznych skał oraz urozmaiconych warunków klimatycznych.

Ze względu na podobieństwo surowca skalnego oraz warunków środowiskowych, w których ulega niszczeniu kamienna elewacja, wyróżniono tutaj formy deterioracji podobne do stwierdzonych w innych zabytkach Poznania analizowanych przez autorkę w latach ubiegłych (Szczepaniak, Rój, 2019; Szczepaniak, 2021). Formy te nie były jednak identyczne, co wynikało m.in. z faktu, iż elewacja Collegium Iuridicum była w przeszłości poddawana drobnym pracom renowacyjnym, a dodatkowo jest zlokalizowana w miejscu, gdzie nie ma zwartej zabudowy. Prawie cała fasada (zarówno wschodnia, południowa, jak i zachodnia) jest wystawiona na działanie promieni słonecznych, które skutecznie osuszają kamień, co minimalizuje procesy biodeterioracji, ale także przyczyniają się do nierównomiernego rozszerzania się ziaren mineralnych, co prowadzi do dezintegracji szkieletu ziarnowego.

Główne makroskopowo zidentyfikowane formy deterioracji, jakie stwierdzono w elewacji (zgodnie z ICOMOS-ISCS, 2008), od najczęściej występujących prezentują się następująco: 1) odbarwienia piaskowca i osady w postaci czarnych nas- korupień oraz warstwy malarskie – graffiti (grupa związana z dekoloryzacją kamienia i z osadami), 2) pęknięcia, odseparowanie powierzchni i mechaniczne uszkodzenia (grupa związana z ubytkami materiału), 3) obecność mchów i porostów (grupa deterioracji związana

z kolonizacją biologiczną) (ryc. 2). W obrazie mikroskopowym jest także obserwowana kolejna, czwarta grupa związana z odrywaniem się fragmentów – w tym przypadku były to początki delaminacji (eksfoliacji).

### Grupa pierwsza

Pierwszą omawianą grupą uszkodzeń elewacji są odbarwienia, czarne naskorupienia oraz warstwy malarskie, do identyfikacji których zastosowano metody mikroskopowe oraz analizy EDS. Badania rozpoczęto od identyfikacji składu chemicznego czarnych naskorupień.

Zastanawiająca była bardzo duża zawartość związków żelaza w ich obrębie (tab. 1–6), które nie nadawały powierzchni skały czerwonego czy brunatnego zabarwienia. Poziom tlenków żelaza ( $Fe_2O_3$ ) w analizowanych punktach pomiarowych wielokrotnie przekraczał 50% (tab. 1–6). W próbkach bezpośrednio pod naskorupieniami zauważalne są ciemniejsze smugi (ryc. 2E), w obrębie których także zidentyfikowano w przestrzeni międzyziarnowej znaczne zawartości związków żelaza. Ich zawartość jednak wyraźnie maleje w głąb skały (ryc. 3F). Podobną sytuację odnotowano także w saksońskim piaskowcu turońskim, który jest od stuleci wykorzystywany w architekturze (Steger, Mehner, 1998). W próbkach tej skały pochodzących z elewacji zabytkowych budynków w obrębie czarnych naskorupień stwierdzono także mocno podwyższoną zawartość związków żelaza. Prowadząc badania porównawcze, zaobserwowano, że skład tej fałszywej patyny zmienia się nie tylko w zależności od poziomu zanieczyszczeń w środowisku, ale od klimatu czy typu skały. W czarnych nalotach wśród związków żelaza zidentyfikowano bardzo drobno-kryształiczne formy: ferrihydryt, jarosyt, getyt oraz magnetyt. Ten ostatni minerał w wyniku działania redukcyjnego materii organicznej zawierał aż do 45% żelaza obecnego w czarnych naskorupieniach. Magnetyt ze względu na swoje właściwości (czarną barwę, czarną lub szarą rysę) w dużej mierze odpowiadał za barwę tychże naskorupień. Przepuszczalnie ta sama sytuacja ma miejsce w analizowanych piaskowcach. Związki żelaza nie tworzą tu widocznych chociażby w mikroskopie skaningowym kryształów, a jedynie ciągły stosunkowo jednolity „film” zanieczyszczeń na powierzchni skały (ryc. 3I, J), w obrębie których

**Tab. 1.** Analizy geochemiczne (SEM-EDS) powierzchni próbki Coll.Iurid.1 z ryc. 3K (na ryc. 3K zaznaczono na czerwono analizowane punkty pomiarowe)

**Table 1.** Geochemical analyses (SEM-EDS) of sample presented in Fig. 3K (Figure 3K shows the analysed measurement points marked in red)

	Skład chemiczny [%] / Chemical composition [%]									
	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Pt 1			2,03	25,53	5,18					67,25
Pt 2		0,99	11,27	63,24	1,28	3,22	2,83	0,97		16,19
Pt 3	1,87	1,80	20,98	58,31	1,13	2,58	5,22		1,20	6,94
Pt 4	1,35	2,07	21,57	55,30		2,43	5,85		1,63	9,79
Pt 5		1,59	6,71	69,23			2,25			20,21
Pt 6	1,35	0,95	15,71	67,46	1,19	2,35	1,47			9,50
Pt 7		0,88	6,49	70,61						22,03
Pt 8			6,78	71,56						21,66
Pt 9		1,30	7,85	75,96			2,17			12,72
Pt 10	0,55	0,88	5,71	80,41		0,71				11,73
Pt 11		0,65	2,66	93,23						3,46
Pt 12			2,62	96,96		0,42				
Pt 13		7,96	12,13	67,38	1,88	1,10	2,60			6,97

**Tab. 2.** Analizy geochemiczne (SEM-EDS) czarnych naskorupień ze znaczną zawartością związków żelaza w próbce Coll.Iurid.1  
**Table 2.** Geochemical analyses (SEM-EDS) of black crust with iron compounds in Coll.Iurid.1 sample

	Skład chemiczny [%] / Chemical composition [%]										
	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO
Pt 1	0,70	0,61	2,80	18,32	2,08	0,62		0,81		73,44	0,63
Pt 2		0,68	2,42	23,01	2,00	1,21		1,61		69,06	
Pt 3		1,78	4,56	26,43	2,19	1,43		3,93		59,68	
Pt 4	1,47	0,97	3,68	23,04	3,42	1,69		1,90		63,26	0,57
Pt 5	1,24	0,83	3,28	21,85	3,67	1,71		1,84		65,59	
Pt 6	4,23	1,41	18,33	50,41	1,81		2,69	2,65	1,77	16,71	
Pt 7	1,99	1,28	5,99	26,38	8,97	1,90	0,70	2,55		50,24	
Pt 8	1,35	0,93	4,69	25,24	5,17		0,54	1,77		60,31	

**Tab. 3.** Analizy geochemiczne (SEM-EDS) czarnych naskorupień w próbce Coll.Iurid.2  
**Table 3.** Geochemical analyses (SEM-EDS) of black crust in Coll.Iurid.2 sample

	Skład chemiczny [%] / Chemical composition [%]												
	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	MoO <sub>3</sub>	PbO
Pt 1	6,31		1,09	8,50	4,88	1,41	2,92		4,91	65,25	4,72		
Pt 2	5,14	1,01	1,22	7,16	4,11		2,64	0,22	4,64	72,36		1,51	
Pt 3	1,81		1,56	8,33	2,24	5,47	4,09	0,52	8,55	67,42			
Pt 4	1,89	1,12	2,17	77,83	3,04		0,60		4,20	9,14			
Pt 5			0,25	93,66					1,81	4,27			
Pt 6	2,87		2,71	17,65	2,45				3,66	68,06		2,29	0,31
Pt 7	4,73		4,65	58,75	7,65		1,67	0,43	6,77	13,13		2,22	
Pt 8	1,62		1,92	10,25	1,69		0,59		6,56	65,90	11,46		
Pt 9	2,34		2,77	18,96	3,39		1,21	1,07	21,51	28,97	17,41	2,36	
Pt 10	5,19		5,55	32,74	8,78	5,99	1,74	1,07	19,08	19,85			

**Tab. 4.** Analizy geochemiczne (SEM-EDS) czarnych naskorupień z obecnością gipsu w próbce Coll.Iurid.1  
**Table 4.** Geochemical analyses (SEM-EDS) of black crust with gypsum in Coll.Iurid.1 sample

	Skład chemiczny [%] / Chemical composition [%]										
	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	MoO <sub>3</sub>
Pt 1	4,58	6,67	55,24	6,08		1,48	1,07	4,97	17,25		2,65
Pt 2	3,00	3,33	28,47	4,97	1,45	1,29	1,36	11,28	34,04	10,80	
Pt 3	1,95	4,35	15,32	4,26	1,28	1,57	1,65	12,09	57,52		
Pt 4	1,67	1,49	10,81	3,31	39,39	0,82		30,86	11,66		

**Tab. 5.** Analizy geochemiczne (SEM-EDS) czarnych naskorupień z obecnością gipsu w próbce Coll.Iurid.2  
**Table 5.** Geochemical analyses (SEM-EDS) of black crust with gypsum in Coll.Iurid.2 sample

	Skład chemiczny [%] / Chemical composition [%]										
	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	
Pt 1	3,19	8,26	26,80	3,83		2,73		3,62	51,57		
Pt 2	1,94	15,92	34,05	2,66		1,39	2,17	3,15	38,71		
Pt 3		1,86	13,47	2,97				2,20	79,50		
Pt 4	1,92	2,03	15,00	5,13		1,27		2,73	71,93		
Pt 5	3,74	7,17	62,75	5,00	1,94	0,79	1,23	5,59	10,95	0,85	
Pt 6	2,34	3,51	30,86	3,31	28,13		0,80	22,92	8,13		

zauważalne są cząsteczki pyłów. Grubość tego filmu w analizowanych próbkach przekracza w skrajnych przypadkach nawet 1 mm.

Źródeł samego żelaza może być przypuszczalnie kilka. Głównym było prawdopodobnie spalanie paliw stałych, głównie oleju napędowego. Paliwa zawierają bowiem metale jako dodatki, w tym Ce, Fe, Mg, Pt, Cu. Dodatkowo zużycie silników składających się głównie z żelaza powoduje emisję cząstek wzbogacających sadzę w żelazo oraz tenki tego pierwiastka (Mayer i in., 2010).

Poza dużą zawartością związków żelaza w fałszywej patynie zidentyfikowano także gips. Jego obecność stwierdzono jedynie w wierzchniej warstwie próbek – w obrębie czarnych naskorupień oraz bezpośrednio pod nimi. W obrazie mikroskopowym można zauważyć, że pierwotna powierzchnia piaskowca w trakcie wietrzenia została silnie zdeintegrowana – przypuszczalnie przez destrukcyjne działanie krystalizującego siarczanu wapnia, prawdopodobnie także różnych soli, w tym głównie halitu (obecność Cl oraz Na<sub>2</sub>O zidentyfikowano w obrębie czarnych naskorupień – tab. 3–5).

**Tab. 6.** Analizy geochemiczne (SEM-EDS) czarnych naskorupień z widocznymi pyłami w próbce Coll.Iurid.5; próbka z ryc. 3L  
**Table 6.** Geochemical analyses (SEM-EDS) of black crust with fly ash particles in Coll.Iurid.5 sample (Fig. 3L)

	Skład chemiczny [%] / Chemical composition [%]											
	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MoO <sub>3</sub>	PbO
Pt 1		2,40	0,88	27,51	46,41	2,29	0,68	3,64	2,81	11,08		2,30
Pt 2		2,64	1,58	22,20	43,77	2,05		2,36	3,83	20,05	1,52	
Pt 3		0,60	1,80	23,15	51,43	1,95	0,98	2,83	4,19	11,31		1,76
Pt 4	8,96	1,57		3,52	27,33	5,77		1,09	3,64	28,74	19,39	
Pt 5	6,90	2,73	0,70	3,24	37,98	5,81		1,06	3,07	23,09	15,43	
Pt 6		2,59	0,65	3,91	38,97	6,26		1,09	2,55	26,33	17,65	
Pt 7		1,28	0,73	4,54	20,03	2,01	0,88	1,58	3,73	63,52		1,70

Następnie, w warunkach zanieczyszczonej atmosfery, ziarna były ponownie „sklejane” tymi zanieczyszczeniami (ryc. 3A, B, D, E).

Analizy SEM-EDS wskazały, że zanieczyszczona powierzchnia analizowanych piaskowców jest wzbogacona, poza bardzo dużymi zawartościami związków żelaza, także w takie związki jak: CO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, ZnO, MoO<sub>3</sub>, PbO, sporadycznie Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (tab. 1–6). Wśród wymienionych, poza Fe, którego związki omówiono wyżej, najczęściej i w największych ilościach identyfikowano wapń i fosfor (tab. 3, pkt 9 i 10). Ich obecność tak, jak innych pierwiastków, może być związana nie tylko ze składnikami mineralnymi szkieletu ziarnowego, ale i zanieczyszczeniem powietrza oraz pozostałościami guano. Zarówno Ca, jak i P, a także m.in. K, Mg i S są jednymi z głównych składników tego ostatniego. Guano ma bezpośredni i pośredni wpływ chemiczny na materiały budowlane, w tym okładzinę kamienną, głównie ze względu na sole w nim zawarte (Hosono i in., 2006). W szczególności rozpuszczone w wodzie (np. opadowej) ma ono znaczący wpływ na poziom deterioracji. Składniki zawarte w odchodach mogą bowiem inicjować i pobudzać wzrost glonów, bakterii i grzybów w obrębie elewacji.

Obecność CaO w czarnych naskorupieniach jest w tym przypadku związana najprawdopodobniej głównie z tynkiem wapiennym, a nie jedynie z guano. Znajduje się on bowiem na elewacji bezpośrednio powyżej okładziny piaskowcowej. Analiza w katodoluminescencji (CL) wykazała bardzo drobne kryształy węglanu wapnia w obrębie spoiwa piaskowca, które cechowały się bardzo małymi rozmiarami oraz intensywnie pomarańczową luminescencją (Sikorska, 2005). Występowały one jednak w przypowierzchniowej warstwie próbek do głębokości ok. 1,5 cm, licząc od powierzchni czarnych naskorupień. W wyniku niszczenia elewacji dochodziło zapewne do wypłukiwania Ca z tynku, jego infiltracji wraz z wodą opadową w przestrzenie porowe piaskowca, a następnie wtórnej krystalizacji CaCO<sub>3</sub> (węglany w obrębie spoiwa i matryks piaskowców z Radkowa były identyfikowane sporadycznie; Labus, 2010; Szczepaniak, 2015). Wapń i siarka są także związane z obecnością wtórnego gipsu (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), który (podobnie jak CaCO<sub>3</sub>) także jest efektem zanieczyszczenia powierzchni okładziny i wtórnej krystalizacji faz mineralnych. Źródeł samej siarki w tym przypadku może być zapewne kilka. Pierwszym z nich jest wspomniane wcześniej guano, jednak ilość związana z nim jest z pewnością niewielka. Drugim i znacznie ważniejszym jest natomiast obecność dwutlenku siarki (SO<sub>2</sub>) w powietrzu, co jest związane głównie ze spalaniem paliw stałych (od wielu lat jest to poważny problem na obszarach zurbanizowanych; www.eea.europa.eu/publications/air-quality-status-2021).

Kolejnym z pierwiastków identyfikowanych na czarnych naskorupieniach, miejscowo w dużych udziałach procentowych, jest węgiel. Zwiększona jego zawartość pojawia się punktowo w próbkach objętych silną biodeterioracją. W tym przypadku było to występowanie chociażby porostów i mchów. Związana jest ona także z obecnością takich zanieczyszczeń atmosfery jak sadza, która jest efektem spalania paliw stałych i biomasy (nadal w centrum Poznania niewielka część mieszkań w kamienicach opalana jest węglem). Obecność tego typu zanieczyszczeń tworzy na powierzchni okładziny miejscami zwarty film na większych jej powierzchniach. Substancja ta, infiltrując z wodą opadową w głąb skały, podobnie jak inne związki, może bardzo negatywnie wpłynąć na barwę okładziny.

Obecność Zn natomiast, poza zanieczyszczoną atmosferą, może być także związana z elementami wykończeniowymi budynku, takimi jak rynny i rury spustowe. Inne z wymienionych tu pierwiastków (także Zn) są często efektem zanieczyszczenia powietrza, które ma bardzo wyraźny wpływ zarówno na skład pierwiastkowy obecny w czarnych naskorupieniach, jak i na rodzaj wtórnej mineralizacji (Sabbioni, Zappia, 1992; Nord i in., 1994; Michniewicz, 1996; Alexandrowicz, Rzepa, 2014; Marszałek i in., 2014; Gaylarde i in., 2017; Pozo-Antonio i in., 2021).

Rozważając obecność poszczególnych składników w obrębie czarnych naskorupień, należy się odnieść do stanu jakościowego powietrza i źródła zanieczyszczeń w nim obecnych, gdyż to one wpływają bezpośrednio na jakość i estetykę elewacji budynków. Według Pollution Index by Cities (<https://www.numbeo.com/pollution/rankings.jsp>), Poznań od lat jest jednym z bardziej zanieczyszczonych miast Europy. W 2018 r. miasto znajdowało się na 179 miejscu w świecie wśród najbardziej zanieczyszczonych miast świata, a w roku 2021 Poznań niestety uplasował się już na 145 miejscu. Według cytowanego rankingu jest to piąte najbardziej zanieczyszczone miasto w Polsce (należy jednak równocześnie zaznaczyć, że cytowany „monitoring” dotyczy tylko dużych miast; wiele mniejszych miejscowości nie prowadzi w ogóle kontroli jakości powietrza, więc można założyć, że sytuacja ta w rzeczywistości kształtuje się nieco inaczej). W 2021 r. wg tego samego źródła Poznań znajduje się już na 33 miejscu najbardziej zanieczyszczonych miast Europy. W roku 2020 wg European Environment Agency ([www.eea.europa.eu/publications/air-quality-status-2021](http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-status-2021)) Polska nadal przoduje wśród krajów Europejskich jeśli chodzi o koncentrację pyłów PM10 (cząstki stałe o średnicy równej lub mniejszej od 10 µm), PM25 (cząstki stałe równe lub mniejsze od 2,5 µm) czy benzo[a]pirenu (należącego do wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych) w atmosferze (dotyczy to głównie obszarów przemysłowych). Przekłada się

to bezpośrednio na zanieczyszczenie atmosfery, w tym zwiększoną obecność węgla, a co za tym idzie także na tempo niszczenia elewacji kamiennych. Zarówno benzo[a]piren (dający się wykstrahować ze zniszczonych elewacji kamiennych, Graue i in., 2013), jak i pyły, związane są na terenie Polski i Poznania głównie ze spalaniem paliw stałych (przede wszystkim węgla), które w Polsce nadal stanowią bardzo ważne źródło zarówno energii elektrycznej, jak i ciepłej. Zwiększona obecność tych substancji w powietrzu bezpośrednio przekłada się także na stan elewacji.

Monitoring stanu powietrza obejmuje także pomiar zawartości takich zanieczyszczeń jak: Cd, Pb, Hg, As czy Ni, a pierwiastki te są identyfikowane także w obrębie czarnych naskorupień. W zanieczyszczonej okładzinie Collegium Iuridicum zidentyfikowano następujące pierwiastki: Na, Mg, Al, Ca, P, K, S, Ti, Sc, Br, w tym także metale ciężkie: Hg, Pb, Ni, Mo, Zn oraz Fe i Mn (tab. 1–6). Większość z nich ma znaczenie dla stanu zachowania się elewacji (Graue i in., 2013; Grøntoft i Marincas, 2018; Comite i in., 2021).

Mimo tak zróżnicowanego składu i powietrza i zanieczyszczeń na elewacji należy zauważyć, że Polska (w tym także Poznań) notuje w ostatnich latach pozytywny trend w spadku obecności pyłów w atmosferze (dane za lata 2009–2018 wg Air quality in Europe – 2020 raport). W obrębie czarnych naskorupień w badanych próbkach obserwowano także wspomniane pyły, których obecność związana jest z niską emisją oraz najczęściej wspomnianym już spalaniem kopalin stałych. Ich wielkość oraz skład chemiczny są zróżnicowane (ryc. 3K, L, tab. 1, 6). Wśród pierwiastków, które identyfikowano w cząsteczkach pyłów znalazły się: C (jego zawartość wahała się od 0 do aż 40%), Na, Al, Si, P, K, Ca, Fe, rzadziej także Pb, Ti, S, Mo.

### Grupa druga

Drugą grupą związaną z deterioracją jest utrata materii skalnej związanej w tym przypadku głównie z uszkodzeniami mechanicznymi, rzadziej w skutek erozji. Uszkodzenia te były obserwowane głównie w obrębie ciągów komunikacyjnych (ryc. 2 A–C). Wśród tego typu uszkodzeń zaobserwowano także znaczne utraty materiału w rejonie jednego z balkonów w zachodniej elewacji, gdzie w sąsiedztwie rur spustowych były widoczne znaczne ubytki kamienia (ryc. 2F). W tym samym elemencie elewacji zaobserwowano także bardzo duże spękania płyt piaskowcowych na długości ponad 50–60 cm. W tym przypadku, w wyniku prac renowacyjnych, wymianiono całe bloki piaskowca i zmieniony został układ rur spustowych. Należy zauważyć, że już kilka lat od zakończenia prac renowacyjnych powstały kolejne tego typu uszkodzenia (ryc. 2G). Jest to drugi z balkonów zachodniej elewacji. Na tym samym elemencie fasady są także zauważalne liczne nowe odbarwienia piaskowca, łącznie z wtórną mineralizacją.

### Grupa trzecia

Biodeterioracja dotyczy przede wszystkim elewacji północnej i zachodniej (ryc. 2A, D, 3G–I) w jej najniższych częściach (w bezpośrednim sąsiedztwie torów kolejowych i wysokiego muru wzdłuż elewacji), gdzie zarówno nasłonecznienie, jak i wymiana powietrza jest minimalna (ryc. 3G–F). W tej części elewacji jeszcze przed rozpoczęciem prac renowacyjnych zidentyfikowano mchy, które

pokrywały m.in. całe niewykorzystywane schody oraz okładzinę na styku z podłożem. Znajowały się tam także porosty, jednak ze względu na silnie wykształcone czarne naskorupienia, ich rozpoznanie było utrudnione.

Sama biodeterioracja nie jest tak zalednia od zanieczyszczenia powietrza, jak poprzednie formy, jednak bardzo wyraźnie wpływa na pogorszenie estetyki powierzchni okładziny kamiennej, co w klimatach umiarkowanych czy wilgotnych jest dużym problemem. W przypadku gdy materia organiczna jest silnie rozwinięta, jak to miało miejsce w przyziemiu zachodniej części elewacji Collegium Iuridicum, może ona przyspieszać wietrzenie chemiczne skały, a także powodować jej dezintegrację, w szczególności w skałach porowatych takich, jak piaskowiec (Zurakowska, Hughes, 2013; Negi, Sarethy, 2019; Rembiś, 2019). Jedną z metod zabezpieczania tego typu skał, jest pokrycie ich środkami hydrofobowymi, jak to uczyniono po zakończeniu prac renowacyjnych w tym obiekcie. W tym przypadku zastosowane środki mają wzmocnić strukturalnie skałę, a także m.in. utrudnić ponowną biokolonizację, a co za tym idzie powstrzymać lub też opóźnić kolejne procesy związane ze wspomnianą dezintegracją przypowierzchniowej warstwy piaskowca.

### Grupa czwarta

Bezpośrednio pod czarnymi naskorupieniami omawianymi wcześniej, 1,2 mm w głąb skały, licząc od jej powierzchni (ryc. 3A), obserwowano w obrazie mikroskopowym spękania równoległe do tejże płaszczyzny. Pojawiały się one w miejscu, gdzie silnie zanieczyszczona warstwa przechodzi w piaskowiec mało zmieniony na skutek deterioracji. Jest to uchwycony w obrazie mikroskopowym początek kształtowania się procesu łuszczenia/eksfoliacji zanieczyszczonej powierzchni piaskowca. W tym przypadku wierzchnia warstwa bogata we wtórny gips i inne składniki stopniowo ulega odspajaniu. Procesowi temu, poza krystalizacją wtórnych faz mineralnych i ciśnieniem, jakie wywierają one na szkielet ziarnowy w wierzchniej warstwie okładziny, sprzyjały zapewne także warunki klimatyczne. Są nimi: temperatura powietrza, która w okresie jesienno-zimowym często oscyluje w okolicach 0°C, oraz silne nasłonecznienie w okresie letnim, doprowadzające do nierównomiernego rozszerzania składników mineralnych budujących skałę.

### WNIOSKI

W piaskowcowej elewacji budynku Collegium Iuridicum stwierdzono występowanie czterech z pięciu głównych grup form deterioracji wymienianych przez słownik ICOMOS. Pierwszą z nich i najczęściej występującą była obecność odbarwień, czarnych naskorupień oraz warstw malarskich. W tej grupie najpowszechniejsze są czarne naskorupienia, w których identyfikowano wtórny gips, pyły, znacznie zwiększoną zawartość związków żelaza oraz takich pierwiastków jak: Na, Mg, Al, Ca, Cl, S, Hg, Pb, Ti, Ni, Mo, Zn. Do drugiej najbardziej dominującej grupy zaliczono utratę materii w obrębie okładziny kamiennej. Trzecią z nich była biodeterioracja, gdzie identyfikowano zarówno mchy, jak i porosty. Do czwartej grupy, obserwowanej tylko w skali mikroskopowej, należało łuszczenie powierzchni piaskowca, które wynikało z krystalizacji gipsu czy soli (zidentyfikowano halit) w przestrzeniach mię-



dzyziarnowych. W efekcie prowadziło to do dezintegracji powierzchniowej warstwy skały przez wywieranie wysokiego ciśnienia krystalizacyjnego na ziarna otoczenia.

Wszystkie wymienione procesy deterioracji były zależne w tym przypadku od trzech głównych czynników. Pierwszym z nich są cechy petrograficzne skały, w tym odpowiednia porowatość, gdzie wolne przestrzenie są ze sobą dobrze skomunikowane, pozwalając na migrację zanieczyszczeń w głąb okładziny. Drugim czynnikiem jest zanieczyszczenie środowiska i tzw. niska emisja związana z obszarem wysoko zurbanizowanym, w tym obecność takich pierwiastków jak: Pb, Hg, Br, Zn, S, C, Fe. Trzecim natomiast są warunki środowiskowe, w tym m.in. roczna suma opadów oraz ekspozycja elewacji na światło słoneczne, co odnosi się głównie do biodeterioracji.

Należy pamiętać, że pojedynczy czynnik niszczący nie jest bardzo znaczący. W połączeniu jednak z innymi procesami deterioracji oraz ich powtarzalnością w czasie ma działanie wybitnie destrukcyjne, a jego skutki są często trudne lub wręcz niemożliwe do całkowitego usunięcia.

Składam serdeczne podziękowania pracownikom Wydziałowej Pracowni Mikroskopii Skaningowej działającej przy Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM w Poznaniu za pomoc w obsłudze aparatury badawczej, dr. Michałowi Jakubowiczowi za umożliwienie przeprowadzenia prac z zastosowaniem mikroskopu katodoluminescencyjnego na tym samym Wydziale. Podziękowania składam także wszystkim Recenzentom niniejszej pracy za bardzo konstruktywne uwagi, dzięki którym artykuł przybrał obecną postać. Badania były finansowane ze środków Instytutu Geologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu oraz częściowo z projektu nr N N307 009039.

## LITERATURA

- AIR QUALITY IN EUROPE – 2020 REPORT, 2020 – European Environment Agency, EEA Report No 09/2020. Luxembourg; doi: 10.2800/786656
- AMOROSO G.G., FASSINA V. 1983 – Stone decay and conservation: atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection. Elsev. Sci. Publ., 1–453.
- ALEXANDROWICZ Z., RZEPA G. 2014 – Composition of weathering crusts on sandstones from natural outcrops and architectonic elements in an urban environment. Environ. Sci. Pollut. Res., 21 (6): 14023–14036.
- COMITE V., MIANI A., RICCA M., LA RUSSA M., PULIMENO M., FERMO P. 2021 – The impact of atmospheric pollution on outdoor cultural heritage: an analytic methodology for the characterization of the carbonaceous fraction in black crusts present on stone surfaces. Environ. Res., 201, 111565.
- GAYLARDE C., OGAWA A., BEECH I., KOWALSKI M., BAPTISTA-NETO J.A. 2017 – Analysis of dark crusts on the church of Nossa Senhora do Carmo in Rio de Janeiro, Brazil, using chemical, microscope and metabarcoding microbial identification techniques. Inter. Biodeteriorat. Biodegradat., 117: 60–67.
- GRAUE R., SIEGSMUND S., OYHANTCABAL P., NAUMANN R., LICHA T., SIMON K. 2013 – The effect of air pollution on stone decay: the decay of the Drachenfels trachyte in industrial, urban, and rural environments – a case study of the Cologne, Altenberg and Xanten cathedrals. Environ. Earth Sci., 69: 1095–1124.
- GRØNTØFT T., MARINCAS O. 2018 – Indoor air pollution impact on cultural heritage in an urban and a rural location in Romania: the National military museum in Bucharest and the Tismana monastery in Gorj County. Heritage Sci., 6 (73): 12.
- HOSONO T., UCHIDA E., SUDA C., UENO A., NAKAGAWA T. 2006 – Salt weathering of sandstone at the Ankor monuments, Cambodia: Identification of the origin of salts using sulfur and strontium isotopes. J. Archaeolog. Sci., 33: 1541–1551.  
<https://www.numbeo.com/pollution/rankings.jsp>  
<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-status-2021>
- ICOMOS-ISCS, 2008 – Illustrated glossary on stone deterioration patterns. Monuments and Sites 15, Paris.
- JERZYKIEWICZ T. 1968 – Sedymentacja górnych piaskowców ciosowych Niecki Śródsudeckiej (górną kreda). Geol. Sudet., 4 (7–555): 409–450.
- JERZYKIEWICZ T. 1971 – Kreda okolic Krzeszowa. Geol. Sudet., 5 (7–327): 281–327.
- JERZYKIEWICZ T. 1979 – Piaskowce górnokredowe depresji śródsudeckiej. [W:] Dziedzic K., Kozłowski S., Majerowicz A., Sawicki L. (red.), Surowce mineralne Dolnego Śląska. Wydaw. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław.
- KOZŁOWSKI S. 1986 – Surowce skalne Polski. Wydaw. Geol., Warszawa.
- LABUS M. 2008 – Evaluation of weathering-resistance classes in clastic rocks on the example of Polish sandstones. Environ. Geol., 54: 283–289.
- LABUS M. 2010 – Zastosowanie metod modelowania hydrochemicznego w ocenie wietrzenia skał klastycznych na przykładzie piaskowca kredowego ze złoża Radków. Gosp. Sur. Mineral., 26 (1): 83–92.
- MARSZAŁEK M., ALEXANDROWICZ Z., RZEPAG. 2014 – Composition of weathering crusts on sandstones from natural outcrops and architectonic elements in an urban environment. Environ. Sci. Pollut. Res., 21 (6): 14023–14036.
- MAYER A., CZERWINSKI J., WICHSER A., ULRICH A., KASPER M., MOONEY J. 2010 – Metal-oxide particles in combustion engine exhaust. SAE Tech. Pap. 2010-01-0792.
- MICHNIEWICZ J. 1996 – Niszczenie górnokredowych piaskowców ciosowych w zabytkach Wrocławia pod wpływem zanieczyszczeń atmosferycznych. Prz. Geol., 44 (3): 271–274.
- NEGI A., SARETHY I.P. 2019 – Microbial Biodeterioration of Cultural Heritage: Events, Colonization, and Analyses. Microbial. Ecol., 78: 1014–1029.
- NORD A.G., SVÄRDH A., TRONNER K. 1994 – Air pollution levels reflected in deposits on building stone. Atmospher. Environ., 28 (16): 2615–2622.
- PAŁĄT Z. 2006 – Reprezentacyjna zabudowa przedpola zburzonej Bramy Berlińskiej. Kroniki Miasta Poznania, Święty Marcin. Wydaw. Miejskie, 1: 348–370.
- PAZDER J. 2008 – Atlas architektury Poznania. Wydaw. Miejskie, Poznań.
- PETTIJOHN F.J., POTTER P.E., SIEVER R. 1972 – Sand and sandstone. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- POZO-ANTONIO J.S., CARDELL C., COMITE V., FERMO P. 2021 – Characterization of black crusts developed on historic stones with diverse mineralogy under different air quality environments. Environ. Sci. Poll. Res., <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15514-w>
- REMBIŚ M. 2019 – Przejawy korozji biologicznej kamienia budowlanego i problemy związane z jego rewaloryzacją. Prz. Geol., 67 (9): 710–716.
- RUSZKOWSKI M., WISZNIEWSKA J. 2019 – Deterioracja kamiennych obiektów budowlanych – główne czynniki i procesy. Prz. Geol., 67 (9): 703–709.
- SABBIONI C., ZAPPIA G. 1992 – Atmospheric-derived element tracers on damaged stone. Sci. Tot. Environ., 126 (1–2): 35–48.
- SIKORSKA M. 2005 – Badania katodoluminescencyjne minerałów. Instrukcje i metody badań geologicznych. Wydaw. Państw. Inst. Geol., Warszawa, 59.
- SKURATOWICZ J. 1991 – Architektura Poznania 1890-1918. Seria Historia Sztuki, 20. Wydaw. UAM, Poznań.
- STEGER W.E., MEHNER H. 1998 – The iron in black weathering crusts on Saxonian sandstones investigated by Mössbauer spectroscopy. Stud. Conservat., 43 (1): 49–58.
- SZCZEPANIAK M. 2015 – Procesy diagenetyczne w wybranych piaskowcach Dolnego Śląska i ich znaczenie dla romańskiej architektury Wielkopolski. Bogucki Wydaw. Naukowe, Poznań.
- SZCZEPANIAK M., RÓJ P. 2019 – Niszczenie okładziny piaskowcowej w zabytkowym budynku Traktu Królewsko-Cesarskiego w Poznaniu, Polska. Prz. Geol., 67 (9): 717–727.
- SZCZEPANIAK M. 2021 – Zróżnicowanie procesów deterioracji piaskowcowej elewacji XIX-wiecznego budynku Archiwum Państwowego w Poznaniu. Prz. Geol., 69 (2): 127–134.
- WALENDOWSKI H. 2009 – Piaskowiec z Radkowa. Minimonografie polskich kamieni budowlanych. Nowy Kamieniarz, 41 (5): 50.
- WALENDOWSKI H. 2010a – Piaskowiec z Czapl. Minimonografie polskich kamieni budowlanych. Nowy Kamieniarz, 49 (6): 78.
- WALENDOWSKI H. 2010b – Piaskowiec z Wartowic. Minimonografie polskich kamieni budowlanych. Nowy Kamieniarz, 46 (3): 84.
- ZURAKOWSKA M., HUGHES J.J. 2013 – Visual assessment of sandstone building façades: condition factors related to cleaning. Quart. J. Eng. Geol. Hydrogeol., 46: 459–467.

Praca wpłynęła do redakcji 26.11.2021 r.

Akceptowano do druku 4.01.2022 r.