

PARAMETRY POROZYMETRYCZNE GÓRNOKREDOWYCH PIASKOWCÓW CIOŚOWYCH JAKO CZYNNIK WARUNKUJĄCY ICH ODPORNOŚĆ NA WIETRZENIE

Porosimetric parameters of Upper Cretaceous sandstones and their weathering resistivity

Małgorzata LABUS

*Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii;
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice; e-mail: malgorzata.labus@polsl.pl*

Treść: Badaniom poddano górnokredowe piaskowce ciosowe, jako grupę skał dość jednorodnych pod względem składu mineralnego. Są to ponadto skały powszechnie stosowane do celów budowlanych. W wyniku przeprowadzonych analiz porozymetrycznych, metodą porozymetrii rтęciowej, otrzymano krzywe kumulacyjne rozkładu średnic porów w próbkach piaskowców. Krzywe te zostały dopasowane do funkcji empirycznej zależności ciśnienia od nasycenia $P(S)$. Funkcja van Genuchtena w sposób empiryczny opisuje kształt krzywych kumulacyjnych, a jej parametry pozwalają na przeprowadzenie porównań ilościowych. W wyniku parametryzacji wyróżniono cztery klasy odporności na wietrzenie. Podział na poszczególne grupy nie jest bezpośrednio uzależniony od pochodzenia próbek, całkowitej porowatości skał, uziarnienia czy zawartości spoiwa. O odporności na wietrzenie, a co za tym – idzie o podziale na poszczególne klasy odporności, decyduje zespół wymienionych cech, wraz ze składem mineralnym i wykształceniem przestrzeni porowej. Ze względu na złożoność tych czynników wydaje, się że przedstawiona powyżej parametryzacja może być przydatnym narzędziem do określanie podatności piaskowców na wietrzenie.

Słowa kluczowe: piaskowce ciosowe, porowatość, odporność na wietrzenie, funkcja van Genuchtena

Abstract: Upper Cretaceous quader sandstones are the group of rocks of relatively uniform mineral composition. They are also widely used, not only in Poland, for building purposes. Basing on the porosimetric analysis, carried out with use of mercury injection tests, the capillary pressure saturation curves were taken under consideration. The curves were fitted to van Genuchten's empirical capillary pressure-saturation function. The parameters of the function enable quantitative comparison between the sampled rocks. Basing on the parameterisation, with the van Genuchten function, of cumulative capillary pressure saturation curves, it was possible to distinguish four groups of the analysed sandstones. It could be concluded, that the weathering sustainability within the groups is not related to a single feature such as: origin of the samples, total porosity, grain-size distribution or cement content. The weathering-resistance is connected with the composition of the above-mentioned features, as well as mineral composition, and pore area characteristic. Taking into account a complicated nature of all the factors, the presented parameterisation could be a simple and useful device for the weathering-resistance classification of sandstones.

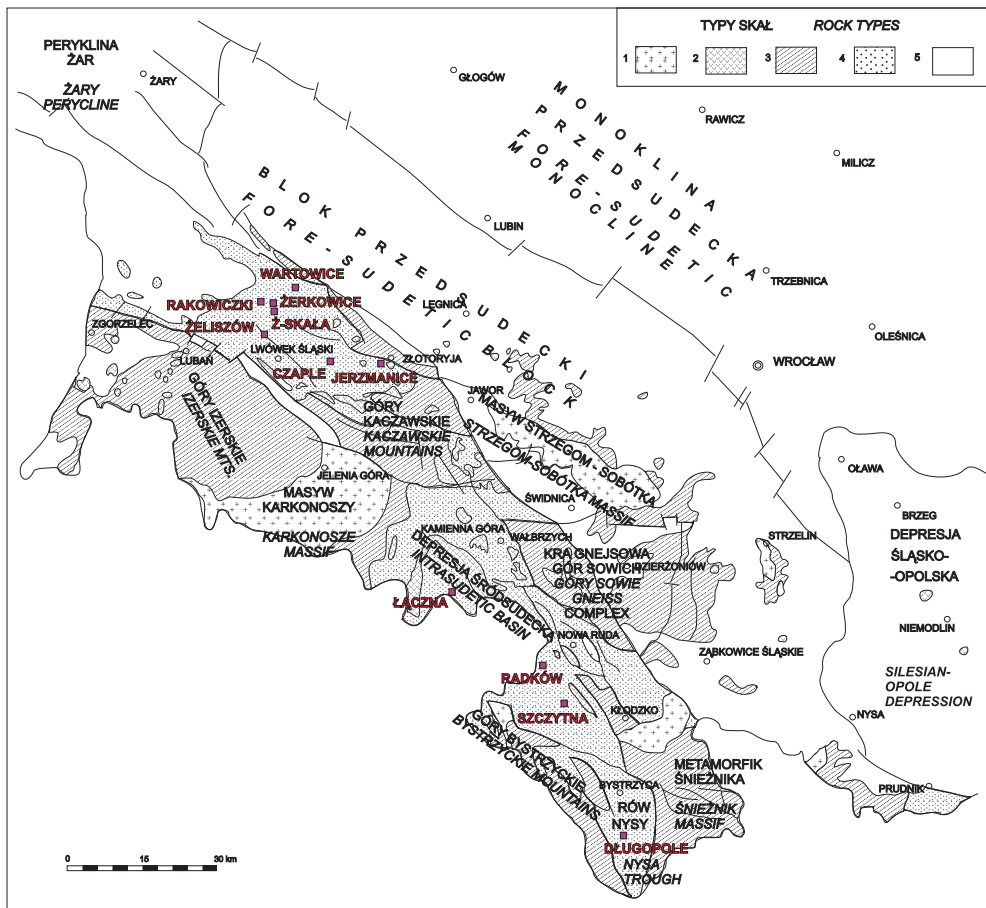
Keywords: quader sandstones, porosity, weathering resistance, van Genuchten function

WSTĘP

Parametry porozymetryczne, takie jak m.in. porowatość całkowita, rozkład wielkości porów, kształt porów itp., w powiązaniu z charakterem spoiwa i składem mineralnym szkieletu ziarnowego skał okruchowych mają istotne znaczenie dla określenia charakteru ich wietrzenia i przydatności w budownictwie.

Na podstawie przeprowadzonych wcześniej badań na próbkach piaskowców pochodzących z różnych formacji geologicznych w Polsce stwierdzono przydatność parametryzacji krzywych porozymetrycznych klasyfikacji pod względem podatności na wietrzenie.

W niniejszej pracy do badań wybrano dolnośląskie piaskowce ciosowe, ze względu na to, iż jest to duża grupa skał względnie jednorodnych pod względem składu mineralnego. Mają one obecnie, i miały w przeszłości, szerokie zastosowanie do celów budowlanych. Pozornie podobne makroskopowo, skały z tej grupy wykazują często różną podatność na wietrzenie, wynikającą prawdopodobnie z ich cech strukturalno-teksturalnych.



KREDOWE PIASKOWCE CIOSOWE DOLNEGO ŚLĄSKA

Piaskowce górnej kredy mają w Polsce duże znaczenie jako surowiec budowlany. Występują one w dwóch facjach: epikontynentalnej na Dolnym Śląsku i geosynklijalnej fliszu karpackiego. Na Dolnym Śląsku wyróżnia się trzy rejony ich występowania: depresja północnosudecka, depresja śródsudecka i rów Nisy.

Wszystkie kredowe piaskowce ciosowe ze względu na ogromne zasoby, łatwość urabiania (m.in. bloczność) oraz odporność na wpływy atmosferyczne należą do najbardziej cenionych piaskowców budowlanych w Polsce. Górnokredowe piaskowce ciosowe, wydobywane na Dolnym Śląsku są surowcem o bardzo dużym znaczeniu gospodarczym, w grupie kamieni budowlanych i drogowych. Znajdują one szerokie zastosowanie jako materiał okładzinowy, na różnego rodzaju elementy budowlane, kamień łamany oraz do celów rzeźbiarskich. Bardzo ważnym odbiorcą tego surowca jest rynek niemiecki, jako że w Niemczech tradycja ich zastosowania sięga kilkuset lat (Stachowiak 2003). Zwłaszcza w obrębie niecki północnosudeckiej obserwuje się w ostatnich latach wzrost wydobycia piaskowców ciosowych, a rozpoznawanie i zagospodarowywanie nowych złóż wykazuje ogromną dynamikę.

Do badań zostały przeznaczone próbki skał pobrane z kamieniołomów lub odkrywek (Fig. 1):

- niecka śródsudecka: Radków, Szczytna, Łączna;
- rów Nisy: Długopole;
- niecka północnosudecka: Jerzmanice, Czaple, Żeliszów, Żerkowice, Rakowiczki, Wartowice, Żerkowice-Skała.

SKŁAD MINERALNY I PODATNOŚĆ NA WIETRZENIE

Na podstawie analizy planimetrycznej określono ilościowy udział poszczególnych składników. Skład ziarnowy badanych piaskowców jest dość jednorodny, wszystkie zostały zaklasyfikowane jako piaskowce kwarcowe (Fig. 2).

Skład fazowy określono również metodą rentgenowską, korzystając z procedury stosowanej w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie, analizy ilościowej wzorca wewnętrznego, opracowanej przez Środonia *et al.* (2001). Badania zostały wykonane za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego X'Pert MPD firmy Philips z wzorcem ZnO. Wynikiem analizy ilościowej jest lista minerałów występujących w próbce z odpowiadającą im procentową zawartością. Poszczególne minerały mierzone są niezależnie, stąd ich suma, przy założeniu, że w próbce nie ma lub jest niewiele substancji amorficznej, wynosi około $100\% \pm 10$.

Fig. 1. Lokalizacja opróbowanych złóż i odkrywek (ciemne kwadraty). Typy skał na szkicu geologicznym: 1 – magmowe głębinowe, 2 – magmowe wylewne, 3 – metamorficzne, 4 – osadowe paleozoiczne i mezozoiczne, 5 – osadowe kenozoiczne

Fig. 1. Localization of sampled deposits and places (dark squares). Rock types on the geological map: 1 – igneous abyssal, 2 – igneous effusive, 3 – metamorphic, 4 – sedimentary Paleozoic and Mesozoic, 5 – sedimentary Cenozoic

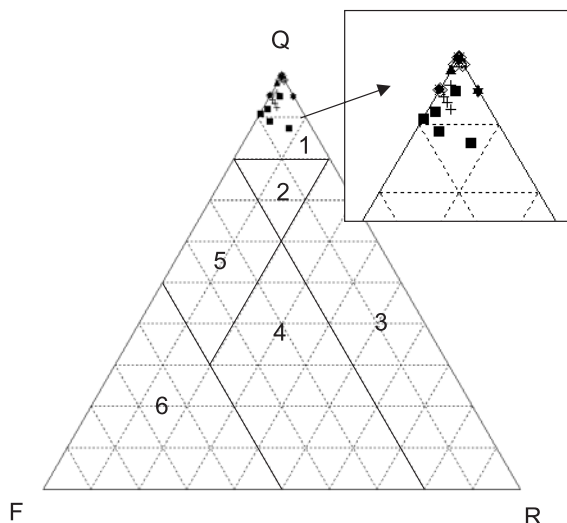


Fig. 2. Pozycja badanych piaskowców ciosowych w trójkącie klasyfikacyjnym wg Łydki (Ryka & Maliszewska 1991). Objasnienia: Q – kwarc i okruchy skał krzemionkowych, F – skaleni i kaolinit, R – łyszczyki, fragmenty skał, okruchy maficzne, 1 – piaskowce kwarcowe, 2 – piaskowce poli-miktyczne, 3 – szarogłazy niższego rzędu, 4 – szarogłazy wyższego rzędu, 5 – arkozy niższego rzędu, 6 – arkozy wyższego rzędu. Symbole oznaczające poszczególne złoża w większości nakładają się. Najbardziej od górnego wierzchołka diagramu oddalone są ciemne kwadraty, oznaczające piaskowce pochodzące z Długopola, mające w swoim składzie do 9% skaleni

Fig. 2. Position of the examined quader sandstones in classification diagram of Łydka (Ryka & Maliszewska 1991). Explanations: Q – quartz and silicoclasts, F – feldspars and caolinite, R – micas, rock fragments, mafic clasts, 1 – quartz sandstones, 2 – polimictic sandstones, 3 – lower greywacke, 4 – upper greywacke, 5 – lower arcoses, 6 – upper arcoses. Symbols representing samples from distinguished deposits are overlaying. Dark squares, which are the most distant from the top represent Długopole samples, containing up to 9% feldspars

Rentgenowska analiza ilościowa (Tab. 1) wykazała w przeważającej liczbie próbek obecność kilku procent (do 4%) składników takich, jak illit, kaolinit, muskowit, kalcyt i dolomit. Tylko próbki pochodzące z Radkowa, Długopola i Jerzmanic zawierają do 13% skaleni. Pozostałe składniki (minerały ilaste, węglany i siarczany) występują w spoiwie badanych skał, a ich udział wynosi maksymalnie 7%. Należy jednak pamiętać, że w spoiwie piaskowców ciosowych występuje również krzemionka (SiO_2). Analiza rentgenowska nie pozwala na rozróżnienie krzemionki wchodzącej w skład szkieletu ziarnowego czy spoiwa.

Odporność na wpływy atmosferyczne i skutki procesów wietrzenia obserwowano na przykładzie istniejących obiektów, często zabytkowych, w których znane jest pochodzenie materiału budowlanego. Najczęściej były to budowle zlokalizowane w stosunkowo niewielkiej odległości od miejsca wydobywania, aby w jak największym stopniu rozwiązać wątpliwości co do pochodzenia materiału. W zamieszczonej poniżej charakterystyce powiązano niektóre z obserwowanych form zniszczeń z cechami makroskopowo dostrzegalnymi. Jednakże, pomimo pozornego podobieństwa makroskopowego skał, procesy wietrzenia przebiegają w różny sposób, co uzależnione jest od cech makroskopowo niedostrzegalnych, a także od stopnia ekspozycji elementu budowlanego.

Tabela (Table) 1

Wyniki analizy rentgenowskiej składu mineralnego [%] piaskowców ciosowych
Results of quader sandstones X-ray powder diffraction analysis [%]

Próbka <i>Sample</i>	Kwarc <i>Quartz</i>	Skalenie potasowe <i>Potash feldspar</i>	Plagio- klazy <i>Plagio- clase</i>	Dolomit <i>Dolomite</i>	Kalcyt <i>Calcite</i>	Syderyt <i>Siderite</i>	Anhy- dryt <i>Anhy- drite</i>	Gips <i>Gypsum</i>	Suma min. ilastycznych* <i>Sum of clay minerals*</i>	Razem <i>Total</i>
1 Rd	89	11	–	1	< 1	–	–	–	2(M/Sm)	104
1 Sz	102	–	–	–	< 1	< 1	< 1	–	1 (Kl)	106
2 Sz	99	–	–	–	–	< 1	< 1	–	1 (Kl)	102
1 D	85	12	1	< 1	–	–	–	–	3 (Kl,M)	102
2 D	90	9	1	< 1	–	–	–	–	1 (Kl,M)	102
3 D	76	11	2	1	< 1	–	–	–	5 (Kl,M)	96
5 D	83	12	1	1	< 1	–	–	–	1 (Kl,M)	99
1 J	93	6	–	< 1	< 1	–	–	1	< 1 (M)	103
2 C	96	–	–	< 1	–	< 1	< 1	–	3 (Kl,M)	102
3 C	100	–	–	< 1	–	–	< 1	–	2 (Kl,M)	104
4 C	97	–	–	1	–	–	< 1	–	1 (Kl)	100
5 C	98	–	–	< 1	–	–	< 1	–	1 (Kl)	101
1 Ze	97	–	–	–	–	–	< 1	–	4 (Kl)	102
5 Z	101	–	–	1	–	–	< 1	–	–	103
1 R	101	–	–	1	–	–	–	–	–	102
3 R	102	–	–	< 1	–	–	< 1	–	2 (Kl,M)	106
5 R	101	–	–	1	–	–	< 1	–	< 1 (Kl)	104
3 W	100	–	–	1	–	–	< 1	–	1 (Kl)	103
5 W	102	–	–	< 1	–	–	–	–	< 1 (Kl)	104
2 S	101	–	–	< 1	–	–	< 1	–	1 (Kl)	104
5 S	100	–	–	< 1	–	–	< 1	–	1 (Kl)	103

* Kl – kaolinit, M – miki i minerały z grupy illitu, Sm – smektyt.

* *Kl – kaolinite. M – mica and illite group mineral, Sm – smectite.*

Radków. Piaskowce pochodzące ze złoża Radków, zwane dawniej „piaskowcami śląskimi” są budulcem m.in. bazyliki w Wambierzycach i kościoła parafialnego w Kłodzku. Na przykładzie tych obiektów można zaobserwować, iż odmiany drobnoziarniste tego piaskowca wykazują dużą odporność na wietrzenie. Pokrywają się ciemnymi nalotami, ale poza tym nie obserwuje się innych form zniszczenia. W przypadku skał o strukturze średnioziarnistej, lub zawierających spoiwo ilasto-krzemionkowe, obserwuje się utratę gładkości powierzchni wskutek ubytku ziaren, a także zabrudzenia powierzchni.

Szczytna. Surowiec pochodzący ze złoża Szczytna charakteryzuje się bardzo dobrymi własnościami technicznymi i dużą odpornością na wietrzenie, zwłaszcza odmiany drobnoziarniste. Piaskowce o grubszym uziarnieniu i częściowo ilastym spoiwie wykazują słabszą odporność, co przejawia się utratą gładkości powierzchni. Wszystkie skały pochodzące z tego złoża łatwo się pokrywają ciemną patyną.

Długopole. Piaskowce eksploatowane ze złoża Długopole znajdują zastosowanie głównie w budownictwie lokalnym, ewentualnie do budowy obiektów technicznych (mosty, wiadukty itp.). Widoczne są w podmurówkach licznych domów w Długopolu, Bystrzycy Kłodzkiej i okolicach. Wietrzeją dość intensywnie, pokrywając się zwartym osadem o ciemnych barwach. Są to głównie naskorupienia gipsu zabarwione zanieczyszczeniami atmosferycznymi. Powłoki te miejscami odpadają, a zewnętrzne krawędzie bloków skalnych ulegają zaokrągleniu.

Jerzmanice. Zróżnicowanie spoiwa przyczynia się do powstawania urozmaiconych form wietrzeniowych, możliwych do zaobserwowania w odsłonięciu w Jerzmanicach-Zdroju. Znanym przykładem zastosowania surowca z Jerzmanic są okładziny kościoła św. Elżbiety we Wrocławiu. Piaskowiec ten jest stosunkowo mało odporny na wietrzenie, co ujawnia się w postaci reliefu związanego z wypadaniem większych okruchów. Charakterystyczne są też zabarwienia wynikające z utleniania związków żelaza.

Czaple. Zachowanie się piaskowców pochodzących ze złoża Czaple obserwowano m.in. w takich obiektach, jak: zamek Grodziec, kościół św. Marcina w Jaworze (Fig. 3), liczne obiekty architektoniczne w Złotoryi. Surowiec ten wykazuje znaczne zróżnicowanie odporności na wietrzenie. Makroskopowe obserwacje wskazują, iż obecność smug żelazistych powoduje osłabienie skały. Odmiany posiadające spoiwo ilasto-krzemionkowo-żelaziste są dość słabe, rozsypliwie, podatne na wietrzenie wgłębne, w postaci wymycia. W przypadku piaskowców zastosowanych w zamku Grodziec obserwuje się utratę gładkości skały, spowodowaną wypadaniem najdrobniejszych ziarn. Na przykładzie portali kościoła w Jaworze można zaobserwować, iż nawet drobno- i średnioziarniste piaskowce pokrywają się jasnymi ciemnymi naskorupieniami, które z kolei ulegają łuszczeniu. Krawędzie bloków, wykonanych z piaskowców pochodzących ze złoża Czaple wskutek wietrzenia wgłębego ulegają zaokrągleniu.

Żeliszów. Piaskowce wydobywane ze złoża wykorzystywane były w przeszłości nie tylko do celów budowlanych, ale także jako kamienie szlifierskie, ze względu na wyjątkowo niską ścieralność. Przyczynia się do tego drobnoziarnista struktura tych skał i przeważające spoiwo krzemionkowe. Obserwacje zachowania się piaskowców pochodzących ze złoża w Żeliszowie, zastosowanych w budownictwie lokalnym, potwierdzają ich dobrą odporność na wietrzenie. Jedynym wyraźnym przejawem niszczenia jest pokrywanie się szarym nalotem.

Żerkowice. Piaskowiec ciosowy ze złoża Żerkowice został m.in. zastosowany do budowy kościoła w Lwówku Śląskim. Na tym przykładzie widać, iż zasadniczo surowiec ten wykazuje dość dużą odporność na wietrzenie. Zwłaszcza odporne są elementy wykonane z piaskowców średnio- i drobnoziarnistych, o spoiwie krzemionkowym. Wykazują one dużą zwięzłość. Wyraźnie słabsze są elementy, w których występują rdzawe smugi, świadczące o obecności w spoiwie związków żelaza. Zwiększona zawartość składników ilastych w spoiwie powoduje miejscowe wymywanie.



Fig. 3. Fragment portalu południowego kruchty kościoła pw. św. Marcina w Jaworze, zbudowanego z piaskowca pochodzącego ze złoża Czaple. Widoczne są zniszczenia w formie łuszczenia, odpadania agregatów skalnych, zaokrąglenia krawędzi, szorstkości, wykwitów oraz jasnych i ciemnych naskorupień zgodnych z powierzchnią (fot. S. Rosół)

Fig. 3. Part of south portal of porch in St. Martin Church in Jawor, which is built of Czaple sandstone. There are visible some forms of weathering: external peeling, loos of rock aggregates, rounding of edges, loss of the surface smoothness, efflorescences, as well as dark and light deposits parallel to the stone surface (phot. S. Rosół)

Rakowiczki. Ze względu na drobnoziarnistą strukturę piaskowce pochodzące ze złoża Rakowiczki są bardzo zwarte i rzadko podlegają wietrzeniu wgłębemu. Również stosunkowo rzadko występujące formy wietrzenia to przebarwienia i naskorupienia. Dezintegracja granularna (piaszczysta) występuje w przypadku obecności w spoiwie minerałów ilastych.

Wartowice. Surowiec występujący w złożu Wartowice jest zróżnicowany makroskopowo. Szeroko stosowany w budownictwie, został m.in. wykorzystany w gmachu Uniwersytetu we Wrocławiu. Na tym przykładzie można zaobserwować, zwłaszcza w przypadku struktury różnoziarnistej, wietrzenie selektywne, polegające na wypadaniu większych okruszków. Powstawaniu reliefu w skale sprzyja też zwiększona zawartość związków żelaza w spoiwie. W przypadku bloków zbudowanych z piaskowca drobnoziarnistego, skutki wietrzenia (w postaci szorstkości i ciemnych naskorupień) są znacznie mniej widoczne.

Żerkowice-Skała. Surowiec ze złoża Żerkowice-Skała eksploatowany jest od kilku lat, a stosowany do renowacji obiektów głównie za granicą, stąd znalezienie przykładów jego zastosowania w okolicy nie jest możliwe. Ze względu na obecność spoiwa krzemionkowo-ilastej skała ta jest dość zwarta i prawdopodobnie odporna na wietrzenie.

WYDZIELENIE KLAS PODATNOŚCI NA WIETRZENIE BADANYCH PIASKOWCÓW CIOSOWYCH

Ze względu na to, iż parametry porozymetryczne w istotny sposób wpływają na charakter wietrzenia skał, podjęto próbę wyróżnienia klas podatności na wietrzenie w obrębie piaskowców ciosowych na podstawie analizy krzywych rozkładu średnic porów. Oparto się m.in. na wynikach wcześniejszych badań, przeprowadzonych na grupie skał okruchowych pochodzących z różnych jednostek geologicznych w Polsce (Labus 2008).

Pomiary porowatości próbek skał wykonywano na porozymetrze rtęciowym AutoPore 9220. Otrzymane krzywe kumulacyjne zostały dopasowane do funkcji empirycznej zależności ciśnienia od nasycenia $P(S)$, podanej przez van Genuchtena (1980). Funkcja van Genuchtena w sposób empiryczny opisuje kształt krzywych kumulacyjnych, a jej parametry pozwalają na przeprowadzenie porównań ilościowych pomiędzy otrzymanymi krzywymi (Bloomfield *et al.* 2001).

Równanie van Genuchtena ma następującą postać

$$P = P_o (S_e^{-1/m} - 1)^{1-m},$$

gdzie:

- P_o – ciśnienie kapilarne charakterystyczne dla danego ośrodka,
- m – wskaźnik rozkładu wielkości porów,
- S_e – „znormalizowane” nasycenie cieczą zwilżającą, zdefiniowane jako

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{S_m - S_r},$$

gdzie:

- S_w – nasycenie cieczą zwilżającą,
- S_r – nasycenie płynem rezydualnym,
- S_m – zawartość płynu przy naturalnym nasyceniu.

Dopasowanie otrzymanych krzywych do funkcji van Genuchtena zostało przeprowadzone metodą najmniejszych kwadratów. Przykłady dopasowania krzywych pokazano na figurach 4 i 5. W przypadku krzywych jednomodalnych (np. dla próbki 2Z) uzyskano dobre dopasowanie ($R^2 = 0.98$). W przypadku krzywych dwumodalnych dopasowanie jest niższe (np. dla próbki 1Z $R^2 = 0.91$), wyraźnie widoczne jest również zaniżenie wartości (obniżenie krzywej dopasowanej) w ostatniej fazie migracji rtęci (Fig. 5).

W wyniku dopasowania krzywych uzyskano w odniesieniu do każdej próbki parametry: D_{P_o} , m , S_r i S_m . Największe znaczenie mają: D_{P_o} – średnica porów jako funkcja ciśnienia kapilarnego charakterystycznego dla danego medium, oraz m – wskaźnik rozkładu wielkości porów. Wskaźnik m zawiera się w stosunkowo wąskim przedziale 0.17–0.84. Średnica D_{P_o} wykazuje duże zróżnicowanie: 0.18–27.3 μm .

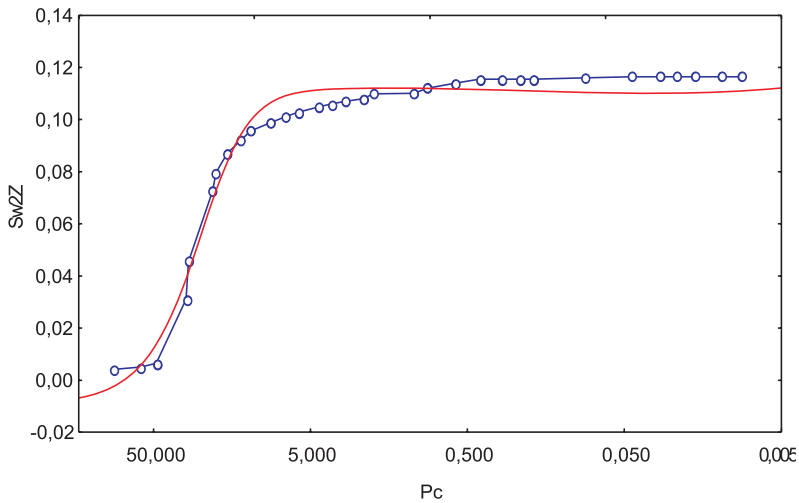


Fig. 4. Dopasowanie krzywej kumulacyjnej dla próbki 2Z

Fig. 4. Fitting the capillary pressure saturation curve for sample 2Z

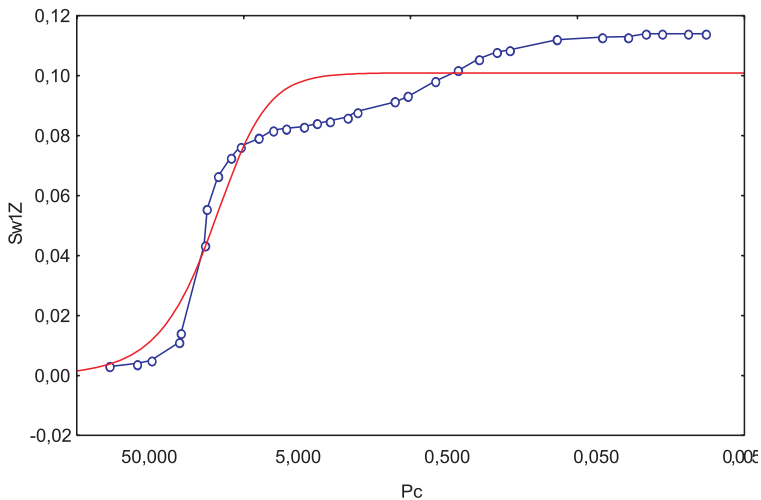


Fig. 5. Dopasowanie krzywej kumulacyjnej dla próbki 1Z

Fig. 5. Fitting the capillary pressure saturation curve for sample 1Z

Dzięki umieszczeniu dopasowanych parametrów m i D_{p_0} na wspólnym wykresie (Fig. 6) otrzymano wykres rozrzutu, na podstawie którego można zgrupować próbki w kilku klasach. Cechy wspólne dla próbek w każdej klasie to podobne kształty krzywych kumulacyjnych, oraz niektóre cechy litologiczne, decydujące m.in. o odporności tych skał na wietrzenie.

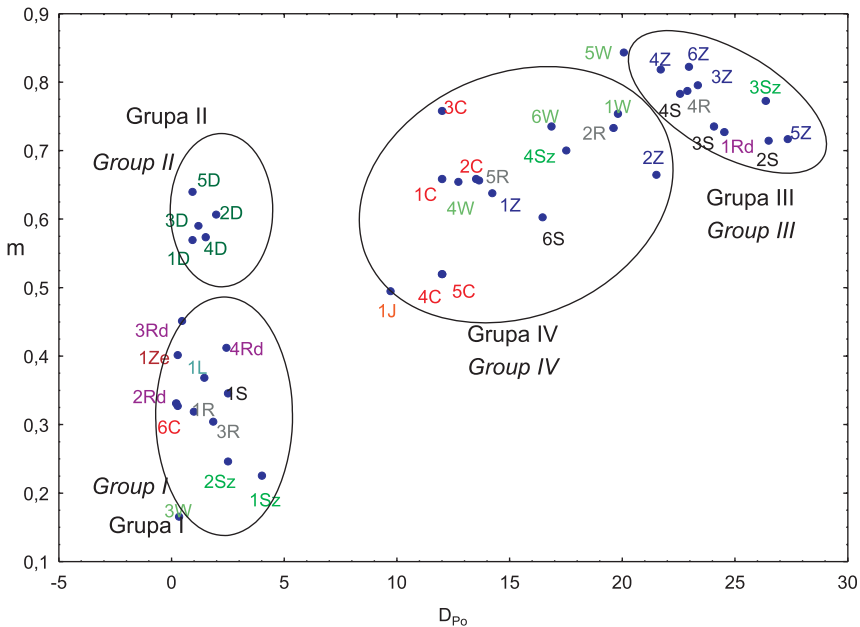


Fig. 6. Klasy próbek wydzielone na podstawie zestawienia dopasowanych parametrów m i D_{P_0}

Fig. 6. Grouping the sandstone samples into classes basing on m and D_{P_0} parameters cross-plot

Na wykresie zależności m/D_{P_0} (Fig. 6), wydzielono cztery grupy skał na podstawie wartości m i D_{P_0} , a także na podstawie składu mineralnego, dokonanego wcześniej opisu petrograficznego tych skał i na podstawie zaobserwowanej odporności na wietrzenie skał pochodzących z poszczególnych złóż. Opierano się również na wynikach wcześniej przeprowadzonych badań na grupie bardziej zróżnicowanych skał okruchowych, reprezentujących złoża całej Polski (Labus 2008).

Do **grupy I** należą piaskowce cechujące się dużą odpornością na wietrzenie. Są to skały zwięzłe, przeważnie drobnoziarniste. Pochodzą z różnych złóż (Tab. 2 na wklejce). Determinujące ich położenie na wykresie parametry mieszczą się następujących przedziałach: m – 0.17–0.45; D_{P_0} 0.18–4.00. Porowatość całkowita, zawartość spoiwa i jego skład mineralny nie mają wpływu na wydzielenie tej grupy.

Grupa II jest najmniejsza liczebnie i najbardziej jednolita. Należą do niej piaskowce pochodzące tylko z jednego złoża (Długopole). Wartości parametrów m i D_{P_0} mieszczą się w wąskich przedziałach (m 0.57–0.64, D_{P_0} 0.87–1.93). Porowatość całkowita skał w tej grupie jest stosunkowo niska (12.69–15.27%). Jest to grupa skał o najmniejszej odporności na wietrzenie spośród wszystkich umieszczonych na wykresie. Decyduje o tym obecność w szkieletcie ziarnowym skaleni (10–13%) (Tab. 1). Ulegają one stosunkowo łatwo wietrzeniu chemicznemu, przechodząc w minerały ilaste, co przyczynia się do dezintegracji skały. Spośród piaskowców ciosowych tylko piaskowce z Długopola nie znajdują zastosowania w budownictwie monumentalnym; wykorzystywane są głównie w budownictwie lokalnym i drogowym.

Tabela (Table) 2

Charakterystyka wydzielonych klas

Characteristic of the distinguished classes

Grupa <i>Group</i>	Próbki <i>Samples</i>	Złoża <i>Deposits</i>	<i>m</i>	D_p	Porowatość całkowita <i>Total porosity</i> [%]	Histereza <i>Hysteresis</i>	Zawartość spoiwa <i>Cement content</i> [%]	Wybrane cechy litologiczne <i>Selected lithological features</i>
I	2.3.4 Rd 1.3 R. 1 S. 1.2 Sz. 1 L. 3 W. 6 C. 1 Ze	Radków Rakowiczki Żerkowice-Skała Szczytna Łączna Wartowice Czaple Żeliszów	0.17–0.45	0.18–4.00	10.81–23.45	17–76	1–22	Spoivo o zróżnicowanym składzie, piaskowce różnoziarniste, głównie drobnoziarnist, zwarte <i>Differentiated cement composition, different grain sizes, mainly fine-grained, compact</i>
II	1.2.3.4.5 D	Długopole	0.57–0.64	0.87–1.93	12.69–15.27	71–86	4.5–16.5	Spoivo ilasto-krzemionkowe, w składzie mineralnym obecne skalenie, piaskowce różnoziarniste, przeważnie drobnoziarniste <i>Clay-silicate cement, Feldspar grains in content, different grain sizes, mainly fine-grained</i>
III	1Rd. 4 R. 2.3.4 S. 3 Sz. 5W. 3.4.5.6 Z	Radków Rakowiczki Żerkowice-Skała Szczytna Wartowice Żerkowice	0.72–0.84	20.01–27.30	20.65–31.13	6–9	2.5–22	Piaskowce drobno- i średnioziarniste, spoiwo krzemionkowo-ilaste, skały dość zwarte <i>Fine-grained and medium-grained. Compact, Silicate-clay cement</i>
IV	2.5 R. 6 S. 4 Sz. 1.2.3.4.5 C. 1.4.6 W. 1.2 Z 1 J	Rakowiczki Żerkowice-Skała Szczytna Czaple Wartowice Żerkowice Jerzmanice	0.50–0.76	9.66–21.51	16.27–26.66	10–29	3–21	Spoivo ilasto-żelaziste lub ilasto-krzemionkowo-żelaziste, piaskowce przeważnie rozsypliwie <i>Clay-ferruginous or clay-silicate-ferruginous cement. Sandstones mainly granular disintegrated</i>

Grupy III i IV zostały początkowo wydzielone łącznie, jednak analiza cech litologicznych tych skał wykazała, iż w tej grupie znalazły się skały o zróżnicowanej odporności na wietrzenie. Podzielono je więc na dwa pola, a szczegółowa analiza parametrów porozymetrycznych pozwoliła na znalezienie parametru różnicującego próbki, które znalazły się w grupie III i IV. Jest to wartość histerezy, wyznaczanej dzięki pomiarowi w porozymetrze rtęciowym, jako odległość krzywych nasiąkania i osuszania (Fig. 7). Im bliżej obie krzywe leżą względem siebie (histereza mniejsza), tym bardziej przestrzeń porowa badanej próbki spełnia założenie modelu walcowego, czyli tym lepsze są możliwości transportu płynów w skale (Such 2002). Zależność podatności na wietrzenie od wartości histerezy, świadczącej o obecności w skale porów typu „ink-bottle”, zaobserwowali w odniesieniu do wapieni pińczowskich m.in. Kozłowski *et al.* (1992) oraz Marszałek (1994).

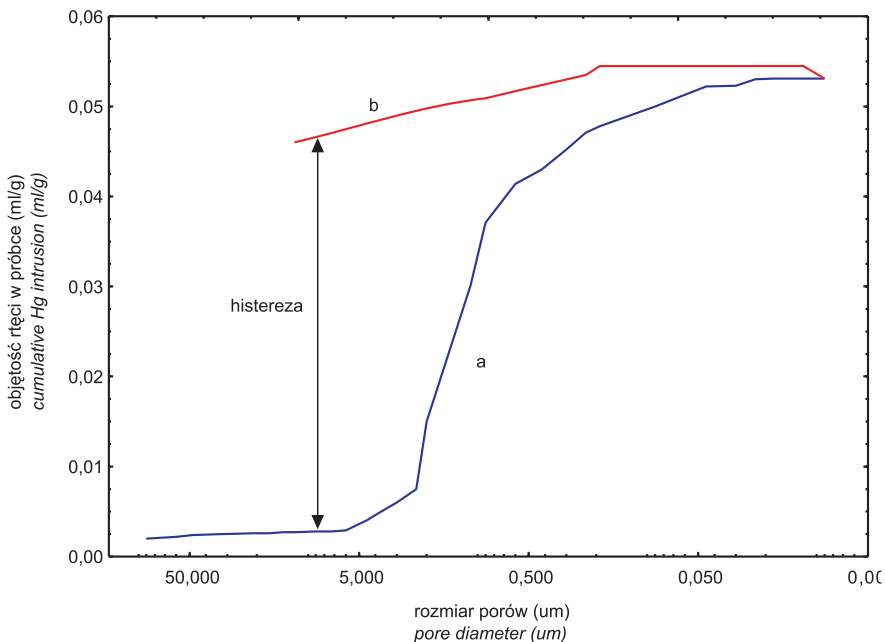


Fig. 7. Przykład krzywych kumulacyjnych dla próbki z dużą ilością porów kapilarnych: a – krzywa dla ciśnień rosnących (nasiąkania), b – krzywa dla ciśnień malejących (osuszania)

Fig. 7. Example of the cumulating saturation curves for the sample containing a lot capillary pores: a – curve for increasing pressure, b – decreasing pressure

Do **grupy III** należą piaskowce stosunkowo odporne na wietrzenie, pomimo wyższych porowatości całkowitych (20.65–31.13%). O ich większej odporności na wietrzenie decyduje prawdopodobnie rodzaj spoiwa (przeważa spoiwo krzemionkowo-ilaste). Parametry m i D_{p_0} mieszczą się w następujących przedziałach: $m = 0.72\text{--}0.84$, $D_{p_0} = 20.01\text{--}27.30$. Histereza jest bardzo niska (6–9), co świadczy o walcowym kształcie porów w skale. Taki model umożliwia swobodny przepływ wody w skale, a zatem zmniejsza prawdopodobieństwo krystalizacji soli w porach.

Grupa IV obejmuje skały o niższej odporności na wietrzenie, wynikającej z obecności minerałów ilastych w spoiwie tych skał. Wartości współczynnika m mieszczą się w przedziale 0.50–0.76, natomiast D_p wynosi od 9.66 do 21.51.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych rozważań można sformułować następujące wnioski:

- 1) Szczegółowa analiza petrograficzna, zwłaszcza z uwzględnieniem analizy porozymetrycznej, jest dobrym narzędziem badania podatności skał na wietrzenie. Potwierdzają to obserwacje stanu zachowania materiału kamiennego w budowłach zabytkowych, gdzie można zauważyć różne przebiegające procesy wietrzenia, pomimo pozornego podobieństwa makroskopowego skał.
- 2) Stwierdzono możliwość wydzielenia klas odporności na wietrzenie piaskowców ciosowych za pomocą wyników analiz porozymetrycznych.
- 3) Parametryzacja krzywych ciśnień kapilarnych pozwoliła na wydzielenie wśród badanych piaskowców czterech grup. Podział na poszczególne grupy nie jest bezpośrednio uzależniony od pochodzenia próbek (tj. złoża), całkowitej porowatości skał, uziarnienia czy zawartości spoiwa. O przynależności do poszczególnych, wydzielonych, klas, decyduje zespół cech teksturalnych, wraz ze składem mineralnym i wykształceniem przestrzeni porowej. Ze względu na złożoność tych czynników, wydaje się, że przedstawiona powyżej parametryzacja może być przydatnym narzędziem do określania podatności skał okruchowych na wietrzenie.

LITERATURA

- Bloomfield J.P., Goody D.C., Bright M.I. & Williams P.J., 2001. Pore-throat size distributions in Permo-Traissic sandstones from the United Kingdom and some implications for contaminant hydrogeology. *Hydrogeological Journal*, 9, 219–230.
- Genuchten M.T. van, 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sciences American Journal*, 44, 892–898.
- Kozłowski R., Hejda A., Cęckiewicz S. & Haber J., 1992. Influence of water contained in porous limestone on corrosion. *Atmospheric Environment*, 26B, 3241–3248.
- Labus M., 2008. Evaluation of weathering-resistance classes in clastic rocks on the example of Polish sandstones. *Environmental Geology*, 54, 2, 283–289.
- Marszałek M., 1994. Mineralogiczno-petrograficzne metody badań podatności na niszczenie zabytkowej architektury kamiennej. *Ochrona Zabytków*, 3–4, 281–288.
- Ryka W. & Maliszewska A., 1991. *Słownik petrograficzny*. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Stachowiak A., 2003. Surowce skalne i ich zagospodarowanie w Sudetach Zachodnich. W: Ciężkowski W., Wojewoda J. & Żelaźniewicz A. (red.), *Sudety zachodnie: od wendu do czwartorzęd*, WIND, Wrocław, 119–126.

- Such P., 2002. Wykorzystanie porozymetrii rてięcowej w analizie struktury przestrzeni porowej skał zbiornikowych. *Prace IGIGN*, 113.
- Środoń J., Dritis V.A., McCarty D.K., Hsieh J.C.C. & Ebert D.D., 2001. Quantitative X-ray analysis of clay-bearing rocks from random preparations. *Clays and Clay Minerals*, 49, 6, 514–528.

Summary

The paper is an attempt at the identification of the weathering-resistance classes within sandstone rocks by means of analysis of capillary pressure saturation curves. The group of upper Cretaceous quader sandstones was chosen, regarding its relatively uniform mineral composition. The mentioned rocks are also widely used, not only in Poland, for building purposes. The samples were collected from the deposits in North-Sudetic Basin and Intra-Sudetic Basin (Fig. 1). According to the classification of Łydka (Fig. 2) the examined rocks belong to quartz sandstones. The results of quader sandstones X-ray powder diffraction analysis is given in table 1. The weathering resistance of rocks from distinguished deposits was observed on the example of existing buildings, mainly in the neighbourhood of the source deposit. Some forms of weathering could be connected to macroscopic features of the sandstones, but the relationships are not obvious in the all cases. An example of building element deterioration is shown in figure 3.

Basing on the porosimetric analysis, carried out with use of mercury injection tests, the capillary pressure saturation curves were taken under consideration. The curves were fitted to van Genuchten's empirical capillary pressure-saturation function, which provides a good fit to the data. The examples of the fitted curves are presented in figures 4 and 5. For the unimodal curves (i.e. for sample 2Z) the fit to the experimental data is quite good ($R^2 = 0.98$), whereas for the bimodal curves the fit is lower (for example for sample 1Z: $R^2 = 0.91$). For the samples of bimodal curves the final intrusion volume is slightly underestimated by the van Genuchten function.

As a result of the fitting routine, for each sample four parameters are calculated: D_{P_o} , m , S_r and S_m . The most essential, which enable quantitative comparison between the sampled rocks, are: D_{P_o} – the equivalent pore-throat sizes for characteristic pressure P_o ; and m – pore-size distribution index. Basing on the parameterisation, with the van Genuchten function, of cumulative capillary pressure saturation curves, it was possible to distinguish four groups of the analysed sandstones (Fig. 6). It could be concluded, that the weathering sustainability within the groups is not related to a single feature such as: origin of the samples, total porosity, grain-size distribution or cement content. The weathering-resistance is connected with the composition of the above-mentioned features, as well as mineral composition, and pore area characteristic (Tab. 2). One of the additional parameters, making possible to distinguish the classes, was the hysteresis between the curves of increasing and decreasing pressure (Fig. 7). Taking into account a complicated nature of all the factors, the presented parameterisation could be a simple and useful device for the weathering-resistance classification of sandstones.