

Hydrogeologiczne właściwości przestrzeni porowej dewońskich skał węglanowych w Górach Świętokrzyskich

Bartłomiej Rzonca*



Hydrogeological properties of Devonian carbonate rocks matrix at the Holy Cross Mountains, central Poland. *Prz. Geol.*, 53: 400–409.

Summary. During research on the hydrogeological properties of Devonian carbonate rocks in the Holy Cross Mountains (Góry Świętokrzyskie) 141 samples of limestone and dolomite rocks were collected from natural outcrops and quarries located within the Southern (Kielecki) region of the Holy Cross Mountains (Fig. 1). Using standard laboratory methods open (interconnected) porosities, permeabilities (recalculated as hydraulic conductivity for water) and specific yield coefficients were determined. Open porosities of the limestones and dolomites are very low (tab. 1). Similar results were obtained with hydraulic conductivity testing, with slightly higher values in the dolomites than in the limestones (Fig. 2). The specific yield in all cases was zero. Thus, the studied limestones and dolomites are among the least porous, permeable and yielding rocks in Poland.

The test sample population is characterised by having open porosities with a log normal distribution and hydraulic conductivities with an irregular (bimodal) distribution resembling a log normal distribution (Fig. 3). A slight correlation between the open porosity and the hydraulic conductivity was demonstrated (Fig. 4). This may indicate a greater portion of the smallest pores contributing towards the sum total open porosity under test conditions; in natural hydraulic conditions they would be inactive. Their contribution must be quite significant (the lack of specific yields), but variable (low relation between open porosity and hydraulic conductivity).

Discussed are also possible correlations between the studied parameters and the rock matrix structure (classified as either pelite, sparite or crystalline — no correlation was demonstrated, Fig. 5), the occurrence of fractures (no correlation, Fig. 6) or the sampling locations (Fig. 7). Although it was not possible to show variability of parameters within particular tectonic structures, statistically significant differences were observed between structural features regarding the open porosity (but not for hydraulic conductivity).

Key words: Holy Cross Mountains, carbonate rocks, limestones, dolostones, Devonian, matrix, porosity, conductivity, permeability, specific yield

W klasycznej pracy dotyczącej porowatości skał węglanowych Choquette i Pray (1970) „porami” nazwali wszystkie pustki w skale — od rozmiarów rzędu ułamka mikrometra do liczącej setki metrów średnicy Wielkiej Sali w jaskini Carlsbad Cavern w USA, nazwanej przez nich za Adamsem i Frenzlem (1950) „makroporem”. Porowatość związaną z pustkami zawartymi w niewielkim fragmencie skały węglanowej, niezależnie od genezy czy geometrii tych pustek, Choquette i Pray określili jako porowatość matrycy skalnej (*matrix porosity*) — w odróżnieniu od porowatości szczelinowej (*fracture porosity*) czy kawernowej (*cavern porosity*) masywu. W literaturze polskojęzycznej przyjęło się używanie słowa „matryca” jako odpowiednika pojęcia *matrix* (w sensie masy skalnej) np: (Motyka & Zuber, 1992; Borszak i in., 1994; Krajewski & Motyka, 1999).

Hydrogeologiczna rola porowatej matrycy skał węglanowych jest coraz lepiej poznana. Z uwagi na dominującą objętość masy skalnej w masywie (w stosunku do objętości szczelin i pustek krasowych), nawet przy niskiej porowatości matrycy sumaryczna kubatura zawartych w niej pustek może być duża i, co za tym idzie, mieć istotne znaczenie. W obecnie proponowanym (Motyka, 1998) modelu koncepcyjnym krążenia wód w skałach węglanowych matryca jest traktowana jako element pojemnościowy. Jej porowatość może w poważnym stopniu wpływać na pojemność masywów skalnych względem wody i innych mediów. Odrębnym aspektem jest udowodniony wpływ porowatości matrycy na właściwości dyspersyjne mas skalnych, widoczny zwłaszcza w większej skali przestrzennej i (lub) czasowej. Indukuje to wiele zjawisk typu opóźnienia przepływu znaczników czy substancji zanieczyszczających

w ośrodkach o podwójnej (czy potrójnej) porowatości. Dlatego znajomość właściwości hydrogeologicznych przestrzeni porowej matrycy ma duże znaczenie w celu określenia pojemności skał zbiornikowych, precyzyjnej interpretacji badań hydrodynamicznych oraz dla prognozowania migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych (Zuber & Motyka, 1994, 1998; Małuszewski & Zuber, 1993; Grisaak & Pickens, 1980; Bodin i in., 2003).

W regionie świętokrzyskim skały węglanowe (wapienie i dolomity) środkowego i górnego dewonu odgrywają pierwszorzędą rolę jako skały wodonośne. Gospodarka wodna jest mocno uzależniona od dewońskich warstw wodonośnych, a w ich obrębie wydzielono aż cztery Główne Zbiorniki Wód Podziemnych (Kleczkowski, 1990). Dewońskie wapienie i dolomity są także eksploatowane jako surowce skalne, co często wymaga intensywnego odwadniania. Dodatkowo, stopień narażenia dewońskich zbiorników wód podziemnych na zanieczyszczenia jest wysoki. Są one bowiem w przeważającej części zasilane z bieżącej, bezpośredniej infiltracji opadów na rozległych obszarach wychodni (także na terenach miejskich i przemysłowych). Podatność zbiorników na zanieczyszczenia jest także związana z ich szczelinowo-krasowym typem, o możliwych znacznych prędkościach rzeczywistych przepływu wód (Prażak, 2002). W dodatku, na obszarach intensywnej eksploatacji wód podziemnych dochodzi do wymuszenia infiltracji mocno zanieczyszczonych wód rzecznych (np. w synklinie kieleckiej — Prażak, 1999).

W artykule przedstawiono wyniki laboratoryjnych oznaczeń współczynników porowatości otwartej, odsączalności oraz przepuszczalności matrycy dewońskich skał węglanowych Gór Świętokrzyskich. Badania matrycy stanowią kontynuację wcześniejszych prac zmierzających do ustalenia warunków hydrogeologicznych w dewońskich wapieniach i dolomitach regionu świętokrzyskiego (Rzonca, 2000, 2001; Gzyl i in., 2001a, b; Rzonca & Prażak,

*Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. M. Borna 9, 50-205 Wrocław; br@ing.uni.wroc.pl

2002), a spośród omawianych tutaj wyników, rezultaty oznaczeń współczynników porowatości otwartej i odsączalności były już wstępnie sygnalizowane (Rzonca i in., 2003).

Obszar badań na tle tektoniki Gór Świętokrzyskich

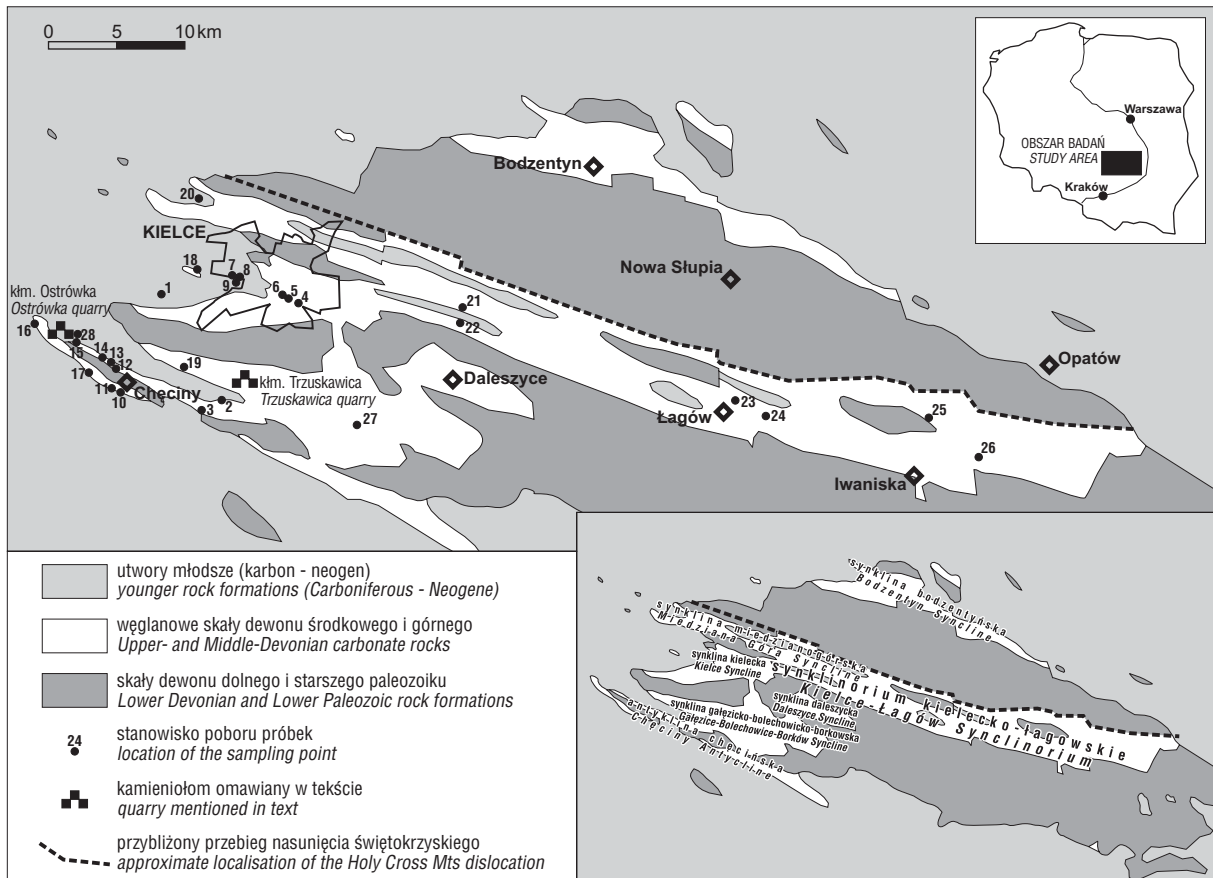
Trzon paleozoiczny Gór Świętokrzyskich zajmuje stosunkowo niewielką powierzchnię i jest otoczony skałami mezozoicznymi. Dominują skały kambryjskie i dewońskie, które razem zajmują ponad 80% obszaru. Masyw świętokrzyski jest wyraźnie wydłużony równoleżnikowo i składa się z wielu antyklin i synklin, na ogół o orientacji warwyskiej WNW–ESE (ryc. 1). Są one modyfikowane przez wiele deformacji nieciągłych, z których najważniejsze jest nasunięcie świętokrzyskie, dzielące masyw paleozoiczny na dwie duże jednostki: blok łysogórski i kielecki (Tomczyk, 1974). W bloku łysogórskim (północnym) wydzielić można liczne formy drugorzędne, a zwłaszcza rozległą synklinę bodzentyńską, stanowiącą zbiornik wód podziemnych, oraz jednostkę łysogórską tworzącą Pasma Główne Gór Świętokrzyskich. Blok kielecki (południowy) także dzieli się na mniejsze jednostki. Bezpośrednio do nasunięcia świętokrzyskiego przylega (od południa) synklinorium kielecko-łagowskie, zbudowane z osadów dewonu i dolnego karbonu. W jego obrębie występują liczne formy antyklinalne i synklinalne, między innymi synklina łagowska, synklina miedzianogórska oraz rozległa synklina kielecka. Drugi element bloku kieleckiego stanowi antyklinorium chęcińsko-klimontowskie, również

składające się z wielu form drugorzędnych. Najistotniejszą z nich jest synklina gałęzicko-bolechowicko-borkowska, o znacznych rozmiarach; w jej jądrze występują osady karbonu, cechystynu i pstrego piaskowca. Jest ona ograniczona od północy antyklinał dymińską, a od południa antyklinał chęcińską (Tomczyk, 1974; Czarnocki, 1938, 1948) (ryc. 1).

Obszarem prowadzenia prac badawczych były wschodnie i sztuczne odsłonięcia skał dewońskich w południowym (kieleckim) regionie Gór Świętokrzyskich. Na terenie synklinorium kielecko-łagowskiego były to: synklina kielecka, synklina miedzianogórska, a także środkowa oraz wschodnia część synklinorium. Na obszarze antyklinorium chęcińsko-klimontowskiego próbki skał były pobierane z różnych części synkliny gałęzicko-bolechowicko-borkowskiej oraz z południowego skrzydła antykliny chęcińskiej (ryc. 1).

Dewońskie skały węglanowe jako środowisko wód podziemnych

Facja węglanowa w Górach Świętokrzyskich obejmuje skały środkowego i górnego dewonu. Utwory dewonu dolnego to piaskowce i ilowce z wkładkami tufitów. W eiflu, stopniowo zanika facja ilasta, na jej miejsce zaś pojawiają się skały węglanowe. Wyższe stratygraficznie osady eiflu to margle, dolomity i dolomity margliste. Skały żywetu to już silnie przekryształizowane dolomity i wapienie o znacznych miąższościach. Także osady dewonu górnego to utwory węglanowe. Fran reprezentują wapienie płytowe i rafowe,



Ryc. 1. Mapa lokalizacji punktów poboru próbek na tle uproszczonej mapy geologicznej paleozoicznego trzonu Gór Świętokrzyskich. W prawym dolnym rogu pokazano struktury tektoniczne omawiane w tekście

Fig. 1. Simplified geological map showing the Paleozoic massifs (forming the Holy Cross Mountains) and sampling points locations. Tectonic structures discussed in the text are shown in the lower right corner

famen zaś stanowią najczęściej margle z przewarstwieniami łupków. Łączna miąższość serii węglanowej dewonu dochodzi do 1000 m, co zostało stwierdzone w otworze wiercińczym w Kowali. Na skałach dewońskich osadziły się utwory karbonu: łupki krzemionkowe, ilowce i mułowce (Filonowicz, 1980; Herman, 1996a; Prażak, 1996; Czarnocki, 1948).

Wodonośność dewońskich skał serii węglanowej jest w dużej mierze warunkowana obecnością spękań oraz kawern krasowych. Gęstość szczelin pochodzenia tektonicznego, jak i form krasowych w badanych strukturach jest zróżnicowana, z czym wiążą się duże różnice wydajności studni (Rzonca & Prażak, 2002). Uważa się, że najwyższy stopień spękania i skrasowienia wykazują wapienie żywetu. Skały te charakteryzują się korzystnymi parametrami hydraulicznymi (Herman, 1996a, b), aczkolwiek badania wykazały, że szczeliny i kawerny krasowe są wypełnione (często szczelnie) przez osady będące utworami trudno przepuszczalnymi (Gzyl i in., 2001a, b). W niższej, dolomitycznej części żywetu, jak i w eiflu, a także w dolomitach franu, warunki nie są już tak korzystne (Herman, 1996a, b).

Na terenie Gór Świętokrzyskich dewońskie skały węglanowe tworzą zasobne zbiorniki wód podziemnych. Występują najczęściej w synklinalnych strukturach otoczonych, uznawanymi za niewodonośne, skałami starszego paleozoiku. W regionie kieleckim najbardziej liczącymi się zbiornikami są synkliny kielecka i gałęzicko-bolechowsko-borkowska. W synklinie kieleckiej, na obszarze Doliny Białogońskiej, w skrasowiałych dewońskich wapieniach zlokalizowano ujęcie wód podziemnych dla Kielc (pobór ok. 1100 m³/h — Prażak, 1999). W synklinie gałęzicko-bolechowsko-borkowskiej, w miejscowości Marzysz, udokumentowano rezerwowe ujęcie wód podziemnych dla Kielc. Z kolei, w środkowej i zachodniej części tej synkliny, na obszarze tzw. Białego Zagłębia, bardzo intensywnie są eksploatowane surowce skalne, co często wymaga odwadniania poziomu dewońskiego; najsilniej (ok. 1000 m³/h) odwadniany jest kamieniołom „Ostrówka” (Prażak, 1996, 1999; Paciura & Prażak, 1999).

Metodyka badań

Prace terenowe polegały na pobraniu 141 próbek skał dewońskich (żywetu i franu) z naturalnych odsłoneń i kamieniołomów położonych w regionie kieleckim. Z pobranych w terenie blozków skalnych wykonane zostały następnie rdzenie o średnicy 4,15 cm i wysokości 2,15–6,30 cm. Część blozków podczas cięcia uległa rozkruszeniu, co uniemożliwiło wykonanie rdzenia. Na wszystkich pobranych w terenie próbkach wykonano oznaczenie współczynnika porowatości otwartej, a na wszystkich rdzeniach, które udało się wykonać (103), określono wielkość współczynników odsączalności i przepuszczalności. Oznaczenia wykonano w laboratorium Zakładu Hydrogeologii i Ochrony Wód AGH w Krakowie z zastosowaniem standardowej metodyki. Dodatkowo dokonano oceny i opisu litologii skał.

Współczynnik porowatości otwartej został oznaczony metodą opisaną przez Kleczkowskiego i Mularza (1964), przy czym jako medium zastosowana została woda zamiast nafty (Wilk i in., 1985; Motyka i in., 1998).

Wysuszone w temperaturze 105–110°C próbki zważono, a następnie nasycono wodą destylowaną w komorze próżniowej i dwukrotnie zważono — w powietrzu i wodzie

destylowanej. Współczynnik porowatości otwartej obliczono jako:

$$n_o = (G_p - G_s) / (G_p - G_w) \quad [1]$$

gdzie: G_s — ciężar próbki suchej, G_p — ciężar próbki nasyconej wodą (w powietrzu), a G_w — ciężar próbki nasyconej wodą (ważonej w wodzie).

Współczynnik odsączalności oznaczono na wyciętych uprzednio rdzeniach metodą opisaną w Polsce przez Motykę i in. (1971), która wykorzystuje wirówkę do odsączenia wody zawartej w próbce skały. Jak wykazano (Prill, 1961; Prill & Johnson, 1963), siła odśrodkowa może symulować ciśnienie, jakie w warunkach naturalnych panuje w warstwie wodonośnej. Pomiar polega na określeniu ilości wody, która może się odsączyć grawitacyjnie z jednostki objętości skały. Do badań zostały wykorzystane rdzenieki wycięte z próbek skał nasycone próżniowo wodą destylowaną. Prędkość wirówki i czas badania dobrano w ten sposób, aby wytworzone warunki symulowały ciśnienie ssące słupa 10 m wody, uznanego za maksymalne wytwarzane w warunkach naturalnego grawitacyjnego odsączenia. Symulowany czas naturalnego odsączenia przy wymiarach zastosowanych rdzeni wynosił od ok. roku do 23 lat (Motyka i in., 1971, 1998).

Współczynnik przepuszczalności został oznaczony w aparacie opisanym przez Dulińskiego (1965), działającym na zasadzie przepuszczania sprężonego powietrza przez wysuszoną próbkę (rdzeniek). Współczynnik przepuszczalności wyliczono jako:

$$k_g = \frac{2Q_0 p_0 l \eta}{F(p_1^2 - p_2^2)} \quad [2]$$

gdzie: k_g — współczynnik przepuszczalności [darcy], Q_0 — zredukowany przepływ gazu [cm³/s], p_0 — ciśnienie atmosferyczne [at], l — długość próbki [cm], η — współczynnik lepkości dynamicznej gazu [cP], F — powierzchnia przekroju poprzecznego [cm²], p_1 — ciśnienie przed próbką [at], p_2 — ciśnienie za próbką [at] (Motyka i in., 1998).

Współczynnik przepuszczalności wyznaczony za pomocą gazu powinien być przeliczony na wartość przepuszczalności względem wody przez uwzględnienie poprawki Klinkenberga z uwagi na tzw. efekt poślizgu (Motyka, 1988). Ohle (1951) wykazał jednak, że dla skał węglanowych poprawka ta ma niewielką wartość i nieuwzględnienie jej zawiąza wyniki w bardzo niewielkim stopniu. Uzyskane za pomocą sprężonego gazu wartości współczynnika przepuszczalności można więc uznać za reprezentatywne także dla wody (Wilk i in., 1985; Motyka, 1988; Bielec, 1999).

Wartości **współczynnika filtracji** dla badanych próbek zostały obliczone na podstawie wyników badań przepuszczalności ze wzoru:

$$k = k_g \gamma_w / \eta_w \quad [3]$$

gdzie: k — współczynnik filtracji, k_g — współczynnik przepuszczalności, (γ_w — ciężar właściwy wody, η_w — współczynnik lepkości dynamicznej wody (Motyka i in., 1998). Po podstawieniu wartości lepkości dynamicznej i ciężaru właściwego wody destylowanej o temperaturze 10°C otrzymujemy prostą zależność:

$$k = 7,66 \cdot 10^{-6} \cdot k_g \quad [4]$$

gdzie: k [m/s], a k_g [darcy] (Motyka i in., 1998).

Wyniki badań

Krótkie zestawienie wyników badań laboratoryjnych przedstawia tab. 1. Wartość współczynnika porowatości otwartej waha się w granicach od 0,0012 do 0,0216 dla wapieni (118 próbek), a średnia geometryczna wynosi 0,0053. W dolomitach (23 próbki) zanotowano wartości od 0,0076 do 0,0475, średnia zaś geometryczna wyniosła 0,0168. Wyniki badań przepuszczalności zostały przeliczone na wartości współczynnika filtracji (dla wody o temperaturze 10°C), które są prezentowane oraz dyskutowane w artykule. W badanych próbkach wapienia (87 próbek) współczynnik filtracji przyjmuje wartości z przedziału od $1,72 \cdot 10^{-12}$ do $7,22 \cdot 10^{-9}$ m/s (średnia geometryczna $2,26 \cdot 10^{-11}$ m/s), w dolomitach (16 próbek) zaś od $2,41 \cdot 10^{-12}$ do $6,77 \cdot 10^{-9}$ m/s (średnia geometryczna $2,43 \cdot 10^{-10}$ m/s). Rozkłady uzyskanych współczynników porowatości otwartej i filtracji charakteryzujących badane próbki przedstawia ryc. 2.

Żadna z badanych próbek węglanowych skał dewońskich regionu kieleckiego (południowego) nie oddała wody przy badaniu w wirówce — zatem wyznaczona tą metodą wartość współczynnika odsączalności we wszystkich przypadkach wynosi zero (zbadano 84 próbki wapieni i 16 dolomitów).

Dodatkowo, próbki podzielone zostały według kryteriów litologicznych. Wyodrębniono 118 próbek wapienia i 23 dolomitu. Skały pośrednie nie zostały rozpoznane, co jest zgodne z obserwacjami Czerwińskiego (1960), który stwierdził jednoznacznie zdefiniowany skład chemiczny wapieni i dolomitów w tym obszarze.

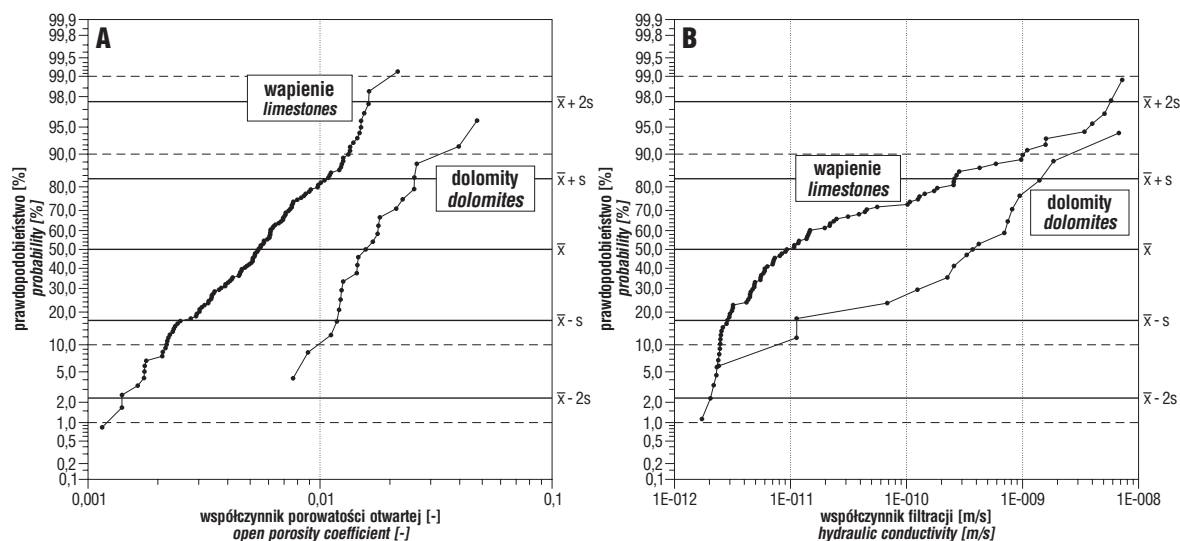
Próbki podzielono także według charakteru spoiwa i stopnia zwartości szkieletu ziarnowego, wzorując się częściowo na metodyce proponowanej przez Dunhama (1962). Badanie przeprowadzono jedynie makroskopowo, przy użyciu szkła powiększającego. W obrębie wapieni i dolomitów (razem) wydzielone zostało 97 próbek skał pelitowych, 16 próbek skał sparytowych (pod tym pojęciem rozumie się w tym artykule skały o sparycie widocznym makroskopowo), oraz 9 próbek skał krystalicznych (*sensu* Dunham, 1962). Wśród rozpoznanych makroskopowo alochemów dominowały bioklasty; częste były także fragmenty stromatoporooidów.

Przy okazji wydzielono 29 próbek o widocznych spękaniaach wypełnionych krystalicznym kalcytem lub dolomitem, oraz 5 o spękaniaach wypełnionych stwardniałym materiałem ilastym. Wszystkie te zauważone spękania były równoległe lub quasi-równoległe do kierunku przetłaczania powietrza podczas badania przepuszczalności.

Dyskusja wyników

Reprezentatywność zbioru próbek. W praktyce o wyborze miejsc poboru próbek do badań laboratoryjnych decydowała głównie dostępność — istnienie naturalnych i sztucznych odsłoneń skał dewońskich. W pewnym stopniu lokalizacja punktów opróbowania była więc przypadkowa. Szczególnie gęsto zostały pokryte badaniami struktury mające większe znaczenie jako zbiorniki wód podziemnych (ryc. 1). Taki dobór stanowisk spowodował zarazem dokładniejsze zbadanie własności matrycy skalnej w strukturach o lepszym rozpoznaniu parametrów hydrogeologicznych metodami polowymi (Rzonca & Prażak, 2002). Oczywiście trudno tu jednak mówić o pełnej regionalnej reprezentatywności zbioru próbek.

Porowatość otwarta. Zarówno badane wapienie, jak i dolomity, charakteryzują się bardzo niską porowatością otwartą. Porównując je ze średnimi wartościami charakteryzującymi różne skały węglanowe w Polsce, zestawionymi w opracowaniach Motyki i Zuber (1992) oraz Bielca (1999), należy stwierdzić, że wszystkie przytaczane tam wielkości dotyczące wapieni są wyraźnie wyższe od uzyskanych przeze mnie. Obok wielu młodszych i bardziej porowatych skał, zostały przytoczone (Motyka & Zuber, 1992) dane dotyczące wapieni dewońskich podłoża monokliny śląsko-krakowskiej (rejon Olkusza, szczegóły: Motyka i in., 1998). Charakteryzują się one porowatością otwartą z zakresu 0,002–0,064. Są to jedyne w tych zestawieniach wartości porównywalne z porowatością wapieni świętokrzyskich, ale jednak wartości wyższe. Średnia porowatość wapieni olkuskich wynosi 0,015 (127 próbek) i jest ponad dwukrotnie wyższa od średniej porowatości wapieni świętokrzyskich wynoszącej 0,006 (118 próbek — tab. 1).



Ryc. 2. **A** — Rozkład współczynnika porowatości otwartej w badanych próbkach; **B** — rozkład współczynnika filtracji
 Fig. 2. **A** — Distribution of open (interconnected) porosity in the set of samples; **B** — distribution of the hydraulic conductivity

Tab. 1. Wyniki badań laboratoryjnych

Table 1. Laboratory test results

	Wapienie <i>Limestones</i>	Dolomity <i>Dolomites</i>
Współczynnik porowatości otwartej n_o [-] <i>open porosity coefficient</i> [-]		
Min./maks.	0,0012/0,0216	0,0076/0,0475
Średnia geometryczna $SD_{\log n_o}$ <i>Geometric mean $SD_{\log n_o}$</i>	0,0053/0,28	0,0168/0,19
Średnia arytmetyczna SD <i>Arithmetic mean SD</i>	0,0064/0,0041	0,0186/0,0095
Mediana <i>median</i>	0,0054	0,0157
Liczba próbek <i>Number of samples</i>	118	23
Współczynnik filtracji k [m/s] <i>hydraulic conductivity</i>		
Min./maks.	$1,72 \cdot 10^{-12}/7,22 \cdot 10^{-9}$	$2,41 \cdot 10^{-12}/6,77 \cdot 10^{-9}$
Średnia geometryczna $SD_{\log k}$ <i>Geometric mean $SD_{\log k}$</i>	$2,26 \cdot 10^{-11}/0,99$	$2,43 \cdot 10^{-10}/0,91$
Mediana <i>median</i>	$9,29 \cdot 10^{-12}$	$3,75 \cdot 10^{-10}$
Liczba próbek <i>Number of samples</i>	87	16
Współczynnik odsączalności grawitacyjnej μ [-] <i>specific yield coefficient</i> [-]		
Wszystkie wartości <i>All values obtained</i>	0	0
Liczba próbek <i>Number of samples</i>	84	16

SD — odchylenie standardowe, *standard deviation*, SD_{\log} — odchylenie standardowe logarytmu, *standard deviation of logarithm*

Porowatość otwarta badanych dolomitów świętokrzyskich jest wyższa niż porowatość wapieni (ryc. 2A). Z porównania uzyskanych wyników z zestawieniem średnich porowatości innych skał (Motyka & Zuber, 1992) wynika, że jedynie olkuskie dewońskie dolomity (Motyka i in., 1998) charakteryzuje nieco niższa średnia arytmetyczna oraz wartości maksymalna i minimalna; inne, młodsze skały są bardziej porowate.

Niewątpliwie, zbadane skały z regionu świętokrzyskiego należą do wapieni i dolomitów o najniższej porowatości otwartej w Polsce.

Współczynnik filtracji. Badane skały charakteryzują się bardzo niskimi zdolnościami przewodzenia wody wolnej (ryc. 2B). Wszystkie próbki cechuje współczynnik filtracji mniejszy od 10^{-8} m/s, czyli wg klasyfikacji Pazdry i Kozerskiego (1990) należą one do skał nieprzepuszczalnych.

Współczynnik filtracji wapieni i dolomitów wieku dewońskiego był badany w Polsce dla skał z rejonu Olkusza przez Motykę i in. (1998). Współczynniki filtracji dolomitów są zbliżone dla skał olkuskich i świętokrzyskich (średnia geometryczna rzędu 10^{-10} m/s), różnią się natomiast wapienie: średnia geometryczna olkuskich wynosi $1,49 \cdot 10^{-10}$ m/s, a świętokrzyskich mniej ($2,26 \cdot 10^{-11}$ m/s).

Z kolei wapienie świętokrzyskie mają współczynnik filtracji tego samego rzędu, co karbońskie wapienie z Czatkowic (średnia geom. rzędu 10^{-11} m/s; Borczak i in., 1994). Inne, młodsze wapienie cechuje już wyraźnie wyższa zdolność do przewodzenia wody (Motyka & Zuber, 1992; Bielec, 1999). W przypadku dolomitów, karbońskie z Czatkowic (średnia geom. także rzędu 10^{-11} m/s; Borczak i in., 1994) są mniej przepuszczalne od dewońskich (świętokrzyskich oraz olkuskich). Inne, młodsze niż dewońskie, dolomity z obszaru Polski zestawione przez Motykę i

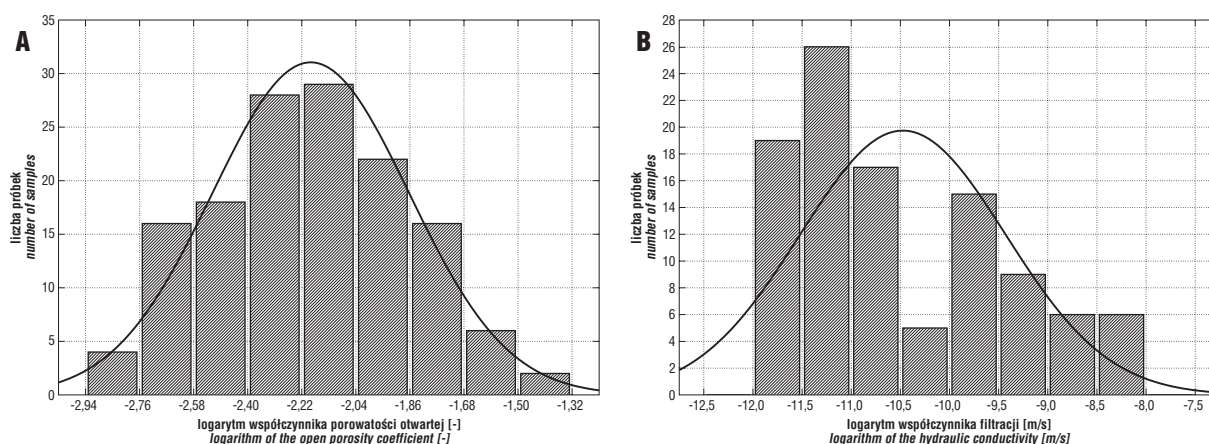
Zubera (1992) oraz Bielca (1999), charakteryzują się znacznie wyższymi średnimi (geometrycznymi) wartościami współczynnika filtracji.

Odsączalność grawitacyjna. Do oznaczenia odsączalności grawitacyjnej (jak też pozostałych parametrów) zastosowano standardową metodę laboratoryjną. Dzięki temu uzyskane wyniki mogą być porównywane z rezultatami badań innych autorów, także z niej korzystających. Jednak, pomimo szerokiego wykorzystania metody badania odsączalności opartej na wirowaniu próbek, nie została dotychczas przekonująco wyjaśniona kwestia jej czułości. Nie została określona najmniejsza mierzalna (czy też zauważalna) ilość wody wykroplonej z próbki pod wpływem siły odśrodkowej. Ponadto, przy stosowanych czasach odwirowania (kilkadziesiąt minut), może istnieć możliwość odparowywania tych niewielkich ilości wody i nie wzięcia ich pod uwagę. Jak się wydaje, nawet stosowanie okładziny z bibuły na próbkach podczas ich wirowania nie może całkowicie zapobiec temu zjawisku (bibuła stosowana jest jako detektor śladowych ilości wody). W tym kontekście stwierdzoną we wszystkich badanych próbkach matrycy wapieni i dolomitów „zerową odsączalność” trzeba traktować jako pewne przybliżenie. Odsączalność charakteryzująca badane próbki była poniżej progu wykrywalności, a próg ten nie jest ściśle określony.

Jednak, nawet jeśli badane próbki charakteryzują się odsączalnością różną od zera (biorąc pod uwagę powyższe zastrzeżenie), to jest ona niewątpliwie niezmiernie niska we wszystkich próbkach. Pomimo różnej od zera porowatości, badane próbki matrycy nie wykazały (w zauważalny sposób) zdolności do oddawania wody wolnej. Ta obserwowana rozbieżność między porowatością otwartą a odsączalnością może być tłumaczona przez prawdopodobny znaczny udział (w sumie porowatości otwartej) porów o bardzo niewielkich rozmiarach.

Faktem jest, że w wielu pracach dotyczących właściwości matrycy skał węglanowych różnego wieku z terenu Polski, wskazano na niemożność odsączenia wody z próbek przy badaniu wirówką (np. Wilk i in., 1985; Motyka, 1988; Borczak i in., 1994; Motyka i in., 1998; Bielec, 1999; Różkowski i in., 2001). Analogiczne właściwości przejawiają niektóre skały klastyczne (Bielec, 1999; Bielec i in., 1993). Jednak w żadnej z cytowanych prac nie dotyczy to całej badanej populacji próbek. Jedynie Bielec (1999, str. 36 i 62) przytacza przykład jurajskich wapieni Zrębu Zakrzówka w Krakowie — tutaj żadna z 46 badanych próbek „nie oddała wody” w badaniu w wirówce. Z kolei Motyka i in. (1998) wskazali na znaczną trudność z odsączeniem wody z próbek wapieni dewońskich rejonu Olkusza: ze 127 próbek wapieni tylko 7 oddało wodę w badaniu wirówką; w przypadku dolomitów było to już 20 z 37 próbek. W kontekście cytowanych prac, i przy uwzględnieniu zastrzeżeń dotyczących metodyki (dotyczy określenia czułości metody), uzyskane przez mnie wyniki można uznać za wiarygodne. Jest jednak pewnym ewenementem, że żadnej próbki — ani wapienia, ani dolomitu — nie cechuje zauważalna odsączalność.

Rozkłady współczynników porowatości otwartej i filtracji w badanych próbkach. Zdefiniowanie rozkładu, jakim charakteryzują się badane wielkości, ma znaczenie, gdyż określa użycie odpowiednich charakterystyk (np. średniej arytmetycznej dla rozkładu normalnego i geome-



Ryc. 3. Histogramy logarytmów badanych parametrów (wapień i dolomity łącznie). Pokazano dopasowanie wyników do rozkładu logarytmiczno-normalnego. **A** — współczynnik porowatości otwartej; **B** — współczynnik filtracji

Fig. 3. Logarithm histograms of the tested parameters (both Limestones and Dolomites) against the background of the theoretical normal distribution curve (fitting of results to the logarithmic normal distribution). **A** — open porosity; **B** — hydraulic conductivity

trycznej dla logarytmiczno-normalnego). Na założeniu normalności rozkładu jest oparte używanie parametrycznych testów statystycznych. Inaczej też konstruuje się wykresy, do opisu osi używając skali liniowej dla cech o rozkładzie normalnym i logarytmicznej dla rozkładu logarytmiczno-normalnego.

Zgodnie z ryc. 2A, obie populacje porowatości (charakteryzujące wapień i dolomity) układają się na odcinkach prostych. Sugeruje to rozkład logarytmiczno-normalny. Także histogram obrazujący porowatość otwartą (łącznie wapieni i dolomitów) przedstawia rozkład logarytmiczno-normalny (ryc. 3A). Dane (tab. 1) wskazują, że rozkłady porowatości otwartej wapieni i dolomitów cechują się prawostronną skośnością, ale jest ona bardzo słabo zaznaczona (średnie arytmetyczna i geometryczna oraz mediany są zbliżone).

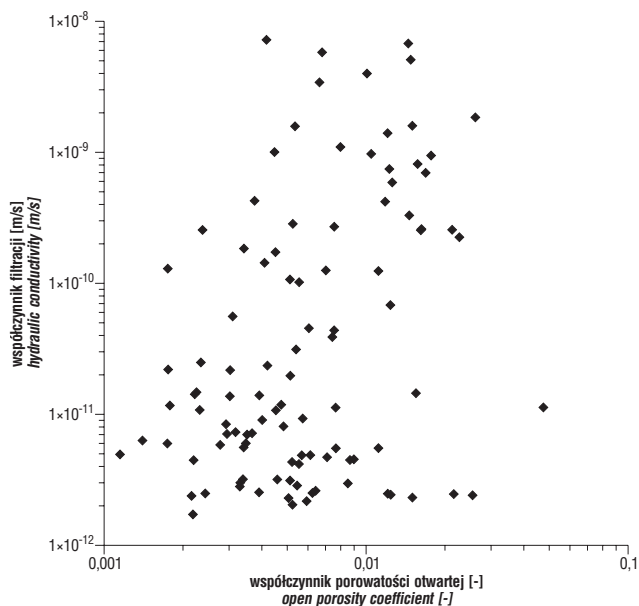
Ostateczną weryfikację dopasowania rozkładów stanowią testy statystyczne. Aby sprawdzić, czy uzyskane wielkości współczynników porowatości otwartej i filtracji charakteryzują się rozkładem logarytmiczno-normalnym, dane te zostały zlogarytmowane, a następnie wynikowe populacje testowane na dopasowanie do rozkładu normalnego (program STATISTICA). Zarówno test Shapiro-Wilka, jak i Kołmogorowa-Smirnowa z poprawką Lillieforsa potwierdziły (przy poziomie istotności $p < 0,05$), że zarówno łączny zbiór wartości porowatości otwartej (ryc. 3A), jak i osobne populacje wapieni i dolomitów (ryc. 2A), charakteryzują się rozkładem logarytmiczno-normalnym.

Populacje współczynników filtracji są silnie niejednorodne — zwłaszcza w próbkach wapieni (ryc. 2B), zaś na zbiorczym histogramie (ryc. 3B) zwraca uwagę wyraźna bimodalność rozkładu. Nie wynika ona jednak z połączenia na wykresie dolomitów i wapieni: histogram współczynnika filtracji samych wapieni ma zbliżony kształt. Wyżej wymienione testy statystyczne potwierdzają ($p < 0,01$), że zarówno łączna populacja wartości współczynnika filtracji (wszystkie próbki — ryc. 3B), jak i populacja opisująca same wapień (ryc. 2B), nie charakteryzują się rozkładem logarytmiczno-normalnym. Jedynie w próbkach dolomitów współczynnik filtracji ma taki rozkład (ryc. 2B).

Korelacja wzajemna — czy porowatość otwarta zależy od współczynnika filtracji? Wyznaczone wielkości współczynników porowatości otwartej oraz filtracji zależą od siebie nawzajem w niewielkim stopniu (ryc. 4).

Współczynnik korelacji kolejności Spearmana, który jest nieliniowym odpowiednikiem współczynnika korelacji liniowej Pearsona (stosowanym dla populacji o dowolnych rozkładach), wynosi tylko $R_s = 0,29$ (ilość par 103, poziom istotności $p < 0,005$). Niski stopień skorelowania współczynników jest prawdopodobnie związany z różnicami porowatości otwartej przypadają na najmniejsze pory, które w naturalnych warunkach są nieczynne hydraulicznie i których suma objętości stanowi różnicę między porowatością otwartą i efektywną (*sensu* Pazdry i Kozerskiego, 1990). Przepuszczalność (i zależny od niej współczynnik filtracji) badanych skał słabo koreluje z porowatością otwartą.

Różnice porowatości otwartej i współczynnika filtracji między wapieniami i dolomitami. Na ryc. 2 przedstawiono rozkłady współczynników porowatości otwartej oraz filtracji, z podziałem populacji wyników na wapień i dolomity. Widać na nich znaczne różnice — zwłaszcza



Ryc. 4. Diagram korelacyjny współczynnika porowatości otwartej i współczynnika filtracji (wapień i dolomity łącznie)

Fig. 4. Correlation diagram of the open porosity and hydraulic conductivity (both limestones and dolomites)

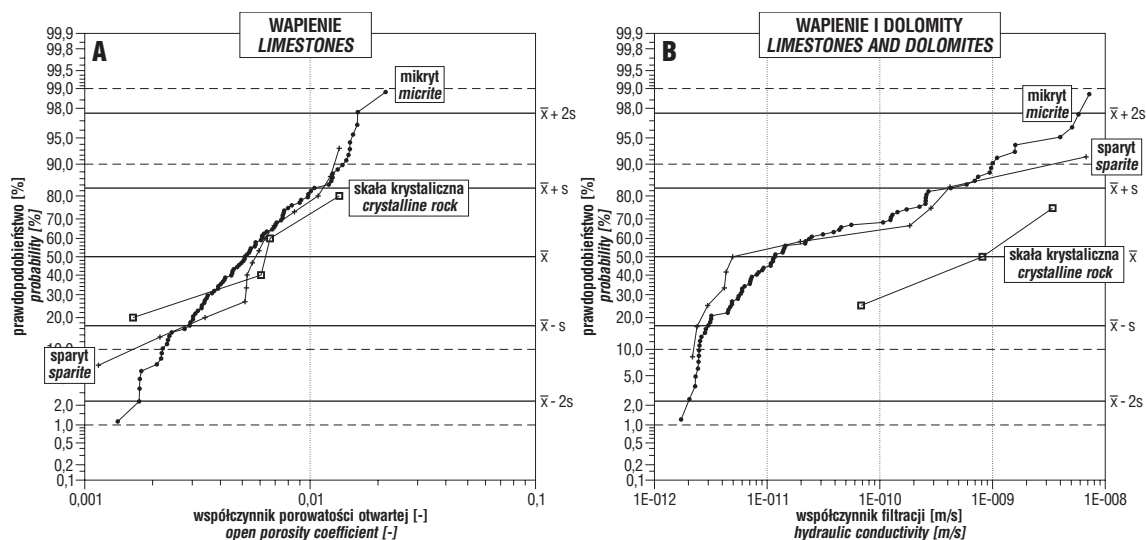
porowatości — wapieni i dolomitów (tab. 1). Różnice porowatości otwartej, jak i współczynnika filtracji między wapieniami i dolomitami są istotne statystycznie, co wykazał nieparametryczny test zgodności Kołmogorowa-Smirnowa (K-S) przy poziomie istotności $p < 0,001$. Dodatkowo, rozkład współczynnika filtracji w próbkach dolomitów jest log-normalny, natomiast w wapieniach — silnie bimodalny.

Otrzymane wyniki są zgodne z innymi pracami, gdzie także zauważono podwyższone wartości współczynnika porowatości otwartej i filtracji w próbkach dolomitów, w stosunku do wapieni (np. Wilk i in., 1985). Jest to przypisywane przeobrażeniom przestrzeni porowej skał podczas procesów dolumityzacji i dedolumityzacji.

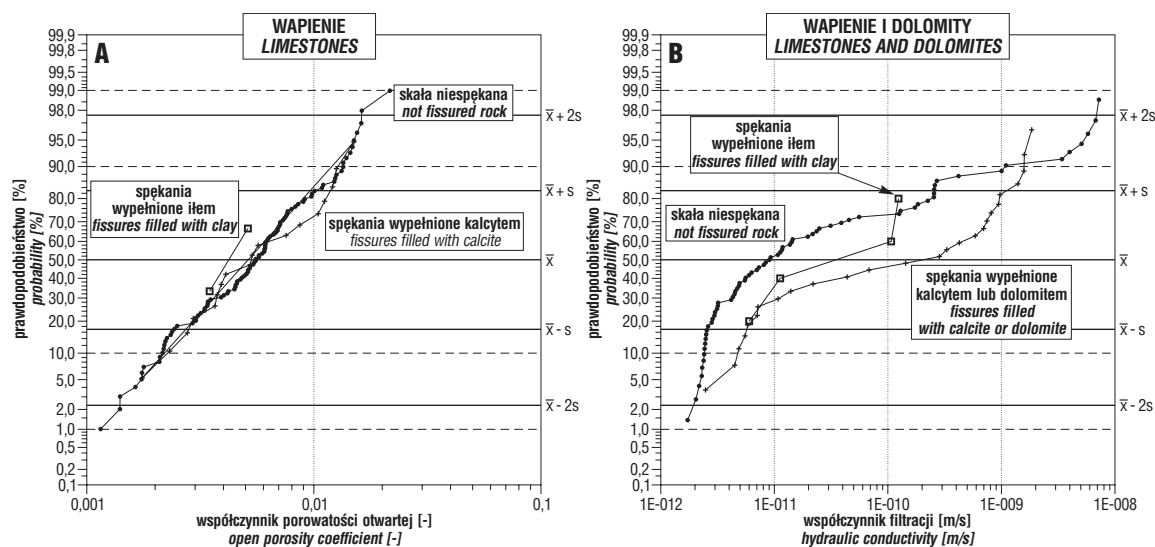
Zależność współczynników porowatości otwartej i filtracji od litologii skał. Zaskakujące jest, że ani porowatość otwarta, ani współczynnik filtracji nie są zależne od litologii badanych skał węglanowych. Przy uwzględnieniu podziału na wapień i dolomity, a w obrębie każdej z tych klas dalszego podziału na skały pelitowe, sparytowe i kry-

staliczne, nie można zauważyć żadnej istotnej różnicy porowatości otwartej ani współczynnika filtracji (ryc. 5), aczkolwiek wiarygodne dane dotyczą tylko wapieni (zbadano zbyt mało próbek dolomitów). Także test statystyczny K-S nie pozwolił na odrzucenie hipotezy zerowej o podobieństwie rozkładów porowatości otwartej i współczynnika filtracji między wapieniami sparytowymi a pelitowymi. Różnice między tymi populacjami nie są więc statystycznie istotne. Wśród badanych próbek tylko kilka zidentyfikowane zostało jako wapień krystaliczny, co nie pozwala na wnioskowanie statystyczne. Reprezentują one wyższe wartości współczynnika filtracji (ryc. 5B).

Na ryc. 5B są widoczne także nieregularności rozkładu współczynnika filtracji, analogiczne do nieregularności na innych wykresach tego parametru (np. ryc. 2B i 3B). Sprawdzono, że wykres dotyczący samych wapieni nie jest wcale bardziej jednorodny. Zatem bimodalność rozkładu współczynnika filtracji (ryc. 2B) nie pochodzi od łącznego przedstawiania skał o różnym wykształceniu litologicznym.



Ryc. 5. Wpływ litologii skał na: A — współczynnik porowatości otwartej; B — współczynnik filtracji
 Fig. 5. Influence of rock lithology on: A — open porosity; B — hydraulic conductivity



Ryc. 6. Wpływ występowania spekań na: A — współczynnik porowatości otwartej; B — współczynnik filtracji
 Fig. 6. Influence of fractures on: A — open porosity; B — hydraulic conductivity

Zależność współczynników porowatości otwartej i filtracji od występowania spękań. W próbkach podzielonych na: niespękane (107 sztuk), spękane o szczelinach wypełnionych krystalicznym kalcytem lub dolomitom (29 próbek) oraz spękane o szczelinach wypełnionych stwardniałym materiałem ilastym (5 próbek), nie ma istotnych różnic porowatości otwartej (ryc. 6A). Współczynnik filtracji wydaje się być bardziej zróżnicowany w zależności od spękań (ryc. 6B). Jednak różnice te okazują się nieistotne statystycznie. Oznacza to, że spękania stwierdzone w próbkach nie mają liczącego się wpływu na porowatość otwartą całych próbek — i co dość zaskakujące — na ich przepuszczalność (zwerifikowano testem statystycznym K-S, tak dla porowatości otwartej, jak i współczynnika filtracji; dla wapieni i dolomitów razem, oraz osobno).

Także na odrębnych wykresach reprezentujących próbki niespękane oraz spękane (dwojakiego rodzaju) zaobserwować można nieregularność rozkładów współczynnika filtracji (ryc. 6B). Wynika z tego, że zidentyfikowane w ramach wykonanych badań różnice w występowaniu spękań, podobnie jak w wykształceniu litologicznym, nie są przyczyną niejednorodności rozkładu całej populacji wartości współczynnika filtracji przedstawionych na ryc. 2B i 3B.

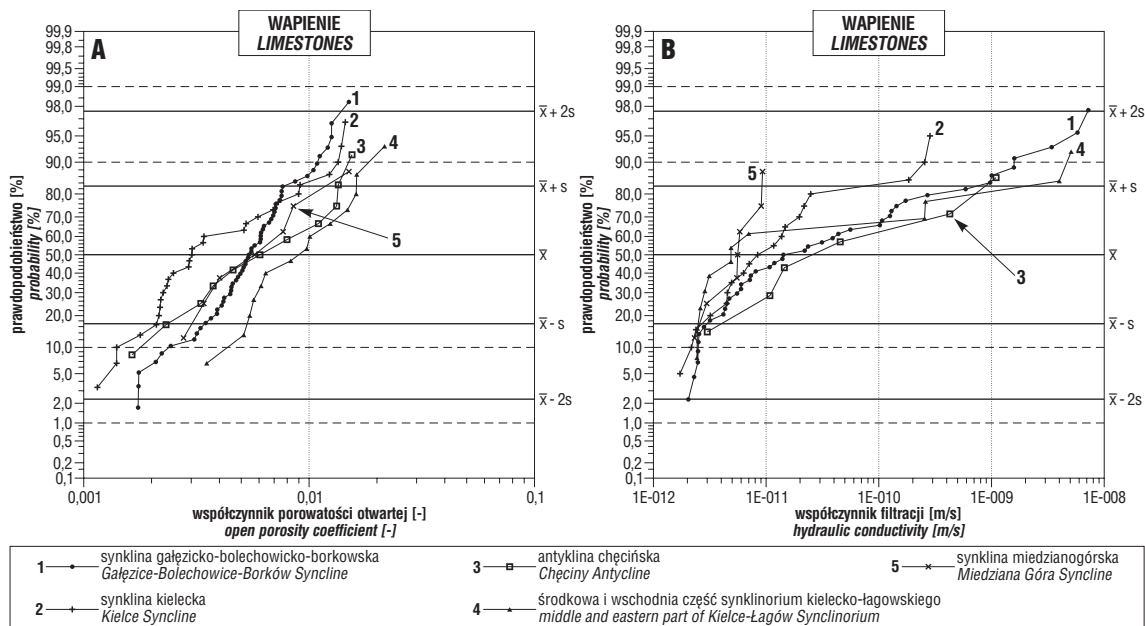
Zależność badanych parametrów od struktur tektonicznych. Innym podejściem do kwestii zmienności współczynnika porowatości otwartej oraz do zmienności i nieregularności w dystrybucji współczynnika filtracji jest próba ich zbadania w ujęciu przestrzennym (regionalnym). Wydzielone zostały próbki pobrane z: synkliny kieleckiej, miedzianogórskiej, gałęzicko-bolechowicko-borkowskiej, południowego skrzydła antykliny chęcińskiej oraz środkowej i wschodniej części synklinorium kielecko-łagowskiego.

Różnice w rozkładach populacji charakteryzujących wapienie w poszczególnych strukturach przedstawiono na ryc. 7A; porowatość wapieni jest w pewnym stopniu skorelowana ze strukturami, z których pobrano próbki

(współczynnik korelacji Pearsona $r = 0,36$ dla $p = 0,001$). Dla korelacji współczynnika filtracji ze strukturami (ryc. 7B) nie da się obliczyć współczynników korelacji Pearsona, ani korelacji kolejności Spearmana (przy akceptowalnym poziomie istotności).

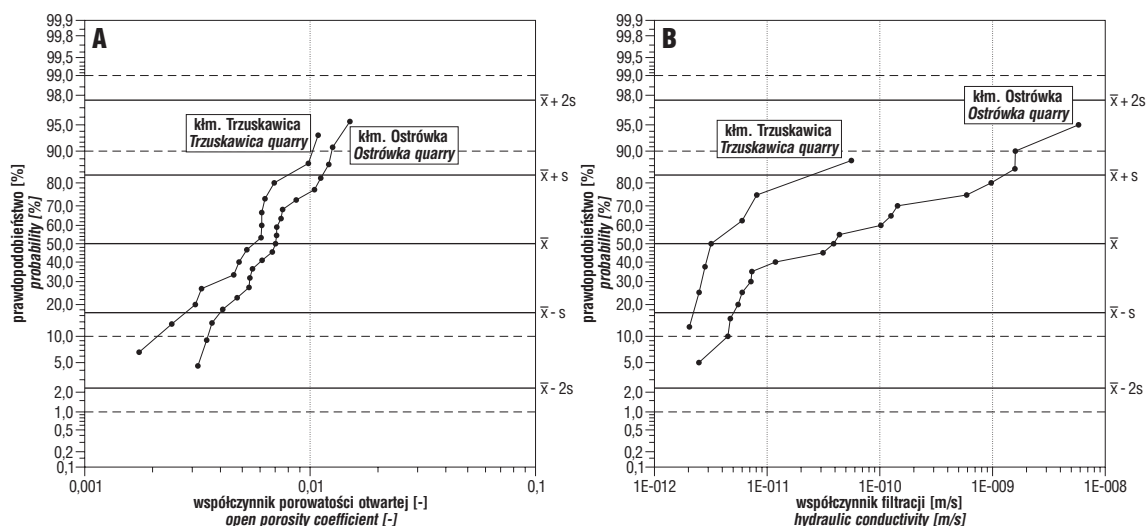
Test statystyczny K-S wykonany dla populacji porowatości wapieni z różnych struktur (ryc. 7A) potwierdził, że próbki z synkliny gałęzicko-bolechowicko-borkowskiej oraz synklinorium kielecko-łagowskiego (środkowej i wschodniej części) różnią się jedynie na granicy przejścia testu ($p < 0,05$). Natomiast próbki z synkliny kieleckiej oraz środkowej i wschodniej części synklinorium kielecko-łagowskiego różnią się bardziej wyraźnie ($p < 0,005$). Jeśli chodzi o współczynnik filtracji, test K-S nie wykazał statystycznie istotnych różnic między populacjami próbek pobranych z różnych struktur.

Chociaż średnie wartości współczynnika filtracji niewiele się różnią, istnieją jednak różnice zmienności. Najmniejsza zmienność (i zarazem jednorodny rozkład) charakteryzuje próbki z synkliny miedzianogórskiej, największa zaś skały z synkliny gałęzicko-bolechowicko-borkowskiej (ryc. 7B). Struktury te różni jednak zarówno liczba badanych próbek, jak i liczba stanowisk poboru tych próbek. W synklinie miedzianogórskiej wszystkie próby pochodzą z jednego tylko stanowiska, z kamieniołomu w Kostomłotach (stanowisko 20 na ryc. 1). Natomiast próbki z południowego skrzydła antykliny chęcińskiej, choć także nieliczne, pochodzą z kilku stanowisk i charakteryzują się dużą zmiennością (ryc. 1, ryc. 7B). Różnice w zmienności współczynnika filtracji w obrębie danej struktury wydają się zatem mieć związek z ilością stanowisk poboru próbek. Ponieważ jednak mała zmienność charakteryzuje tylko jedną synklinę (miedzianogórską), brak jest podstaw do szerszych wniosków. Różnic w zmienności nie odzwierciedlają wykresy rozkładów porowatości wapieni w poszczególnych strukturach (ryc. 7A).



Ryc. 7. Rozkłady parametrów w poszczególnych strukturach: **A** — współczynnik porowatości otwartej; **B** — współczynnik filtracji. 1 — synklina gałęzicko-bolechowicko-borkowska; 2 — synklina kielecka; 3 — antyklina chęcińska; 4 — środkowa i wschodnia część synklinorium kielecko-łagowskiego; 5 — synklina miedzianogórską

Fig. 7. Distribution of the test parameters within particular structural and tectonic features: **A** — open porosity; **B** — hydraulic conductivity. 1 — gałęzicko-bolechowicko-borkowska syncline; 2 — kielecka syncline; 3 — chęcińska anticline; 4 — middle and eastern part of kielecko-łagowskie synclinorium; 5 — miedzianogórską syncline



Ryc. 8. Porównanie rozkładów parametrów w próbkach wapieni z kamieniołomów „Trzuskawica” i „Ostrówka”. **A** — współczynnik porowatości otwartej; **B** — współczynnik filtracji

Fig. 8. The comparison of distribution of test parameters in Limestone samples from the quarries „Trzuskawica” and „Ostrówka”. **A** — open porosity; **B** — hydraulic conductivity

Ze względu na małą populację próbek dolomitów (jedynie w 23 została oznaczona porowatość otwarta, a w 16 przepuszczalność i współczynnik filtracji) ich zmienność w ujęciu regionalnym jest trudna do interpretacji.

Zmienność współczynników porowatości otwartej i filtracji w obrębie struktur. Próba śledzenia zmian parametrów hydrogeologicznych w obrębie danej struktury (np. wzdłuż synklinorium kielecko-łagowskiego czy synkliny gałęzicko-bolechowicko-borkowskiej; ze wschodu na zachód) nie daje jasnego obrazu trendu zmian.

W synklinie gałęzicko-bolechowicko-borkowskiej, w dwóch stanowiskach (kamieniołomach), możliwe było pobranie większej liczby próbek wapienia. W leżącej we wschodniej części synkliny kopalni „Trzuskawica” było ich 21, w umiejscowionej zaś bardziej na zachód „Ostrówce” 14 (ryc. 1). Można więc porównać rozkłady badanych parametrów pomiędzy tymi kamieniołomami (ryc. 8). Pomimo pewnych różnic między populacjami, okazuje się, że nie są one istotnie różne statystycznie (test Kolmogorowa-Smirnowa).

Przy okazji można zauważyć większą jednorodność rozkładów wartości współczynnika filtracji — zwłaszcza w populacji próbek z „Ostrówki” (ryc. 8B). Jest to sytuacja podobna do opisanej powyżej (kamieniołom w Kostomłotach); próbki wapieni pochodzące z jednego stanowiska charakteryzują się rozkładem log-normalnym współczynnika filtracji (por. ryc. 7B, 8B).

Wnioski

Badania właściwości hydrogeologicznych matrycy dewońskich wapieni i dolomitów pochodzących z południowego (kieleckiego) obszaru Gór Świętokrzyskich pozwoliły ocenić wartości współczynnika porowatości otwartej, współczynnika przepuszczalności (przeliczone następnie na współczynnik filtracji) oraz współczynnika odsączalności grawitacyjnej. Wykazały one bardzo niską porowatość otwartą badanych skał, przy czym wapienie miały niższą porowatość niż dolomity (średnie geometryczne odpowiednio: 0,005 i 0,017). Podobnie jest w przypadku współczynnika filtracji — wszystkie wartości są bardzo niskie; nieco wyższe w dolomitach (średnia geom. rzędu 10^{-10} m/s) niż w wapieniach (10^{-11} m/s). Wyznaczona

metodą odwirowania odsączalność we wszystkich badanych próbkach wynosiła zero. Badane wapienie i dolomity najprawdopodobniej należą do najmniej porowatych, przepuszczalnych i odsączalnych w Polsce.

Badania laboratoryjne wykazały zerową odsączalność wszystkich badanych próbek matrycy skał. Podobne wyniki są znane z literatury w odniesieniu do wapieni. W obszarze świętokrzyskim także badane dolomity dały taki rezultat. Wynik „zero” oznacza w praktyce proces „niemożliwy do zmierzenia lub zaobserwowania”. Jego uzyskanie zmusza zatem do postawienia pytania o granice oznaczalności, czyli czułość użytej metody. Jak dotąd nie została ona określona w literaturze. Należy wziąć pod uwagę, że porowatość otwarta wszystkich próbek, aczkolwiek niska, jest różna od zera. Istotne wydaje się też pytanie, czy odsączalność matrycy skalnej wyznaczona przez badanie laboratoryjne może być traktowane jako reprezentatywne dla całego masywu i warunków naturalnych. Jest bowiem kwestią dyskusyjną, czy cała woda uzyskiwana z licznych w badanym rejonie studni — często bardzo wydajnych (Rzonca & Prażak, 2002), pochodzi wyłącznie z podsystemów szczelinowego i krasowego w masywie.

W wyniku przeprowadzonych badań została wykazana niska korelacja między porowatością otwartą a współczynnikiem filtracji. Wydaje się to świadczyć o obecności porów bardzo małych, nieczynnych hydraulicznie w naturalnych warunkach. Ich udział w sumie porowatości otwartej jest prawdopodobnie wysoki (brak mierzalnej odsączalności), lecz zmienny (niska korelacja współczynników porowatości otwartej i filtracji).

Dodatkowo została przedyskutowana kwestia zależności badanych parametrów hydrogeologicznych od litologii skały (nie wykazano zależności), od występowania spękań (także nie) oraz od położenia punktów poboru próbek. O ile zmienności w obrębie struktur nie udało się wykazać, okazało się, że pomiędzy poszczególnymi strukturami daje się zauważyć istotne statystycznie różnice w wielkości porowatości otwartej. Różnic tych nie daje się wykazać w przypadku współczynnika filtracji, chociaż istnieją pewne różnice w jego zmienności.

W badanej populacji próbek współczynnik porowatości otwartej charakteryzuje się regularnym rozkładem logarytmiczno-normalnym. Współczynnik filtracji w dolomitach ma

także rozkład log-normalny, w wapieniach zaś nieregularny (bimodalny). Wartości współczynnika filtracji wapieni wykazywały wyraźną niejednorodność rozkładu praktycznie niezależnie od kryterium wydzielenia populacji próbek. Nie dało się jej wyjaśnić połączeniem próbek spękanych z niespękanyymi, wapieni pelitowych ze sparytowymi i krystalicznymi, czy też próbek pochodzących z różnych struktur tektonicznych. Jedynie w przypadku wydzielenia nieco większych populacji próbek wapienia pochodzących z tych samych stanowisk (kamieniołom w Kostomłotach oraz „Truskawica” i „Ostrówka”) udało się uzyskać bardziej jednorodne rozkłady wartości współczynnika filtracji.

Pragnę bardzo gorąco podziękować dr J. Prażakowi oraz mgr S. Borczakowi, bez których znaczącej pomocy ta praca nie mogłaby powstać.

Dziękuję też serdecznie prof. J. Motyce za zachętę do podjęcia przedstawionych tu badań i wiele rad, prof. J. Szczepańskiej za pomoc organizacyjną, a prof. A. Szczepańskiemu za życzliwe patronowanie mojej pracy. Bardzo dziękuję mgr K. Rózkowskiemu za znaczącą pomoc w pracach terenowych, dr R. Niedźwiedziemu za oznaczenia litologiczne skał oraz mgr A. Drużyńskiemu za tłumaczenia angielskie.

Dziękuję Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej za przyznanie mi Stypendium dla Młodych Naukowców na rok 2003 i odnowienie go na 2004 r.

Literatura

- ADAMS J.E. & FRENZEL H.N. 1950 — Capitan barrier reef, Texas and New Mexico. *Jour. Geol.*, 58: 289–312.
- BIELEC B. 1999 — Własności hydrogeologiczne przestrzeni porowej skał zwięzłych z obszaru Polski. Biblioteka Główna, AGH Kraków.
- BIELEC B., BORCZAK S. & MOTYKA J. 1993 — Właściwości hydrogeologiczne przestrzeni porowej skał dolnej kredy na Niżu Polskim. *Tech. Poszuk. Geol., Geosynopt. i Geoter.*, 4: 51–55.
- BODIN J., DELAY F. & DE MARSILY G. 2003 — Solute transport in a single fracture with negligible matrix permeability: 1. Fundamental mechanisms. *Hydrogeol. Jour.*, 11: 418–433.
- BORCZAK S., LEŚNIAK T.C. & MOTYKA J. 1994 — Właściwości hydrogeologiczne przestrzeni porowej dolnokarbońskich wapieni i dolomitów czatkowickich. *Prz. Geol.*, 42: 653–657.
- CHOQUETTE P. W. & PRAY L. C. 1970 — Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG Bull.*, 54: 207–250.
- CZARNOCKI J. 1938 — Ogólna mapa geologiczna Polski, ark. Kielce. Państw. Inst. Geol.
- CZARNOCKI J. 1948 — Przew. XX Zjazdu Polskiego Tow. Geol. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 17. Kraków: 237–299.
- CZERMIŃSKI J. 1960 — Rozwój litologiczny serii węglanowej dewonu południowej części Gór Świętokrzyskich. *Pr. Inst. Geol.*, 30: 31–104.
- DULIŃSKI W. 1965 — Aparat do badania przepuszczalności z uszczelnieniem pneumatycznym. *Wiad. Naft.* 7: 117–118, 8: 163–164.
- DUNHAM R.J. 1962 — Classification of carbonate rocks according to depositional texture. [W:] Ham W.E. (red.), *Classification of carbonate rocks*. *Amer. Ass. Petrol. Geol. Mem.*, 1: 108–121.
- FILONOWICZ P. 1980 — Objasnienia do mapy geologicznej Polski 1 : 200 000; ark. Kielce. Wyd. Geol.
- GRISAK G.E. & PICKENS J.F. 1980 — Solute transport through fractured media. 1. Effect of matrix diffusion. *Water Resources Research*, 16, 4: 719–730.
- GZYL G., ŁUSZCZ M. & RZONCA B. 2001a — Charakter wypełnień form krasowych w kamieniołomach „Truskawica” i „Kadzielnia” w rejonie Kielc. *Współcz. Probl. Hydrogeol.*, Wrocław, 10, 2: 487–492.
- GZYL G., ŁUSZCZ M. & RZONCA B. 2001b — Wpływ wypełnionych form krasowych na parametry filtracyjne dewońskich skał węglanowych w okolicy Kielc (Góry Świętokrzyskie) — wyniki wstępne. *Współcz. Probl. Hydrogeol.*, Wrocław, 10, 1: 19–24.
- HERMAN G. 1996a — Mapa hydrogeologiczna Polski 1 : 50 000; ark. 851 Morawica; część tekstowa. Państw. Inst. Geol.
- HERMAN G. 1996b — Mapa hydrogeologiczna Polski 1 : 50 000; ark. 852 Daleszyce; część tekstowa. Państw. Inst. Geol.
- KLECZKOWSKI A. & MULARZ S. 1964 — Przyczynek do metodyki wyznaczania porowatości skał dla celów hydrogeologicznych. *Prz. Geol.*, 12: 103–105.
- KLECZKOWSKI A.S. (red.) 1990 — Objasnienia mapy obszarów Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony 1 : 500 000. IHiGi AGH, Kraków: 38.
- KRAJEWSKI S. & MOTYKA J. 1999 — Model sieci hydraulicznej w skałach węglanowych w Polsce. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 388: 115–138.
- MAŁOSZEWSKI P. & ZUBER A. 1993 — Tracer experiments in fissured rocks: Matrix diffusion and the validity of models. *Water Resources Research*, 29: 2723–2735.
- MOTYKA J. 1988 — Węglanowe osady triasu w olkusko-zawierciańskim rejonie rudnym jako środowisko wód podziemnych. *Zesz. Nauk. AGH*, 1157, *Geologia*, 36: 109.
- MOTYKA J. 1998 — A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks, illustrated by examples from Poland. *Hydrogeol. Jour.* (1998) 6: 469–482.
- MOTYKA J., PULIDO-BOSCH A., BORCZAK S. & GISBERT J. 1998 — Matrix hydrogeological properties of Devonian carbonate rocks of Olkusz (Southern Poland). *Jour. Hydrology*, 211: 140–150.
- MOTYKA J., SZCZEPAŃSKA J. & WITCZAK S. 1971 — Zastosowanie wirówki do badania współczynnika odsączalności i dynamika oddawania wody przez skałę. *Techn. Poszuk.*, 37: 38–43.
- MOTYKA J. & ZUBER A. 1992 — Przepływ znaczników i polutantów przez węglanowe skały szczelinowe: 1 — porowatość matrycy jako najważniejszy parametr. [W:] *Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski*. *Konf. Nauk.*, Wrocław: 103–109.
- OHLE E.L. 1951 — The influence of permeability on ore distribution in limestone and dolomite. *Economic Geology*, 7: 667–706 (part I), 8: 871–908 (part II).
- PACIURA W. & PRAŻAK J. 1999 — Odwodnienie kamieniołomu Ostrówka w miedziance koło Kielc. [W:] *Przew. wycieczek hydrogeologicznych. IX Symp. Współcz. Probl. Hydrogeol.* *Wyd. Państw. Inst. Geol.*, Warszawa-Kielce: 11.
- PAZDRO Z. & KOZERSKI B. 1990 — Hydrogeologia ogólna. *Wyd. Geol.*
- PRAŻAK J. 1996 — Mapa hydrogeologiczna Polski 1 : 50 000; ark. 815 Kielce; część tekstowa. Państw. Inst. Geol.
- PRAŻAK J. 1999 — Problemy ujęcia komunalnego wód podziemnych Kielce-Białogon. [W:] *Przewodnik wycieczek hydrogeologicznych. IX Symp. Współcz. Probl. Hydrogeol.* *Państw. Inst. Geol.* Warszawa-Kielce: 6–8.
- PRAŻAK J. 2002 — Antropogeniczne zmiany składu jonowego wód szczelinowo-krasowych poziomu środkowo- i górnodewońskiego w Górach Świętokrzyskich. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 404: 165–176.
- PRILL R.C. & JOHNSON A.J. 1963 — Centrifuge technique for determining time-drainage relations for a natural sand. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 450 E: 177–178.
- PRILL R.C. 1961 — Comparison of drainage data obtained by centrifuge and column — drainage methods. *U.S. Geol. Surv. Profess. Pap.* 424 D: 399–401.
- RÓZKOWSKI J., MOTYKA J., BORCZAK S. & RÓZKOWSKI K. 2001 — Własności hydrogeologiczne matrycy skalnej wapieni górnojurajskich Wyżyny Krakowskiej w świetle badań laboratoryjnych. [W:] *Współcz. Probl. Hydrogeol.*, 10: 253–256.
- RZONCA B. 2000 — Wyniki analizy próbnych pompowań w węglanowych skałach dewońskich w Górach Świętokrzyskich. [W:] *Inżynieria Środowiska*, *Zesz. Nauk. AGH*, 5: 175–183.
- RZONCA B. 2001 — Parametry filtracyjne węglanowych skał dewońskich w Górach Świętokrzyskich — interpretacja wyników próbnych pompowań w warunkach ustalonych i w ustalonych. [W:] *Współcz. Probl. Hydrogeol.*, Wrocław, 10, 1: 257–262.
- RZONCA B., BORCZAK S. & PRAŻAK J. 2003 — Wstępna ocena własności hydrogeologicznych matrycy dewońskich skał węglanowych (G. Świętokrzyskie). [W:] *Współcz. Probl. Hydrogeol.*, Gdańsk, 11, 1: 211–214.
- RZONCA B. & PRAŻAK J. 2002 — Zmienność parametrów filtracyjnych węglanowych skał dewońskich w Górach Świętokrzyskich. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 404: 233–248.
- TOMCZYK H. 1974 — Struktury epok tektonicznych bajkalskiej, kaledońskiej i waryscyjskiej. *Góry Świętokrzyskie*. [W:] *Pożaryski W. (red.)*, *Budowa geologiczna Polski*, t. 4: Tektonika. cz. 1, *Niż Polski*. *Wyd. Geol.*: 128–197.
- WILK Z., MOTYKA J., BORCZAK S. & MAKOWSKI Z. 1985 — Własności mikrohydrauliczne utworów wapienia muszlowego i retu południowej części monokliny śląsko-krakowskiej. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 55: 485–508.
- ZUBER A. & MOTYKA J. 1994 — Matrix porosity as the most important parameter of fissured rocks for solute transport at large scales. *Jour. Hydrology*, 158: 19–46.
- ZUBER A. & MOTYKA J. 1998 — Hydraulic parameters and solute velocities in triple-porosity karstic-fissured-porous carbonate aquifers: case studies in southern Poland. *Environmental Geol.*, 34: 243–250.