

Trójwymiarowa analiza sieci porowej w skale węglanowej z cechsztyńskiej rafy Wielichowa na wale wolsztyńskim (zachodnia Polska) – czynniki ograniczające przepuszczalność

Adam Fheed¹



3D pore network analysis in a carbonate rock sample from the Zechstein Wielichowo Reef (Wolsztyn Ridge, western Poland) – factors constraining permeability. *Prz. Geol.*, 73: 364–367; doi: 10.7306/2025.36

Abstract. Reef rocks typically have complex porosity, which requires advanced imaging techniques to be analyzed. This study investigates the pore network of a carbonate rock sample from the Zechstein Limestone (Ca1) Wielichowo Reef located on the Wolsztyn Ridge (Western Poland). The paper focuses on factors constraining permeability. Using X-ray microtomography, two 3D pore diameter models were obtained based on the skeletonized connected pore mask. All skeleton points had diameters computed as twice the values derived from MATLAB's *bwdist* function, while the remaining voxel values were determined using Nearest Neighbor and Scattered Interpolant algorithms. It was shown that the rock has an irregular pore structure with a significant proportion of small pores of sizes around 0.2 mm. The bulk nitrogen gas permeability is low due to advanced calcite cementation and high level of fragmentation of bryozoan aneups which could not be continuously dissolved to ensure better pore space connectivity. Wherever larger bioclasts had been dissolved, greater pore diameters approaching 1 mm occurred. These findings highlight the utility of digital image analysis in reef rock research, with particular emphasis on its potential applications in CO₂ storage or hydrocarbon exploitation-related risk assessment.

of small pores of sizes around 0.2 mm. The bulk nitrogen gas permeability is low due to advanced calcite cementation and high level of fragmentation of bryozoan aneups which could not be continuously dissolved to ensure better pore space connectivity. Wherever larger bioclasts had been dissolved, greater pore diameters approaching 1 mm occurred. These findings highlight the utility of digital image analysis in reef rock research, with particular emphasis on its potential applications in CO₂ storage or hydrocarbon exploitation-related risk assessment.

Keywords: X-ray microtomography, pore network, carbonate reservoir, Permian

Rafy kopalne mogą pełnić rolę zbiorników węglodorów, wód złożowych lub stanowić miejsce sekwestracji CO₂ (Barnes i in., 2013). W zachodniej Polsce występują rafy wapienia cechsztyńskiego (Ca1) o nieregularnej sieci porowej (Peryt i in., 2012; Fheed i in., 2018). Niektóre części raf mają niską przepuszczalność. Przyczyny tego zjawiska nie zostały jeszcze w pełni wyjaśnione, co ogranicza ich pełne wykorzystanie przemysłowe. Aby lepiej zrozumieć mechanizmy kontrolujące przepuszczalność raf Ca1, konieczne jest zastosowanie nowoczesnych technik obrazowania, takich jak mikrotomografia rentgenowska, oraz przeprowadzenie szczegółowej analizy obrazu (np. Leśniak, 1999).

Dzięki różnicom w absorpcji promieniowania, technika ta pozwala na wydzielenie sieci porowej z obrazu i jej trójwymiarową rekonstrukcję (np. Krakowska i in., 2016). Stwarza to możliwość analizy geometrii, stopnia połączenia i objętości pustek lub ziaren w skałach (Strzelecki i in., 2021).

Celem niniejszego artykułu jest analiza mikrostruktury porowej wybranej skały rafowej Ca1 na podstawie obrazu mikrotomograficznego, ze szczególnym uwzględnieniem rozkładu średnic porów, który ma duży wpływ na przepuszczalność.

MATERIAŁ I METODY

Badaniom poddano próbkę wapienia cechsztyńskiego (Ca1) z górnej części rafy Wielichowa, nawierconej otworem Wielichowo 8. Próbkę i materiał na płytki cienkie pobrano z głębokości 2368,85 m miary wiertniczej. Ta część rafy jest zbudowana głównie z fragmentów mszywiolów

i skorup ramienionogów (Fheed i in., 2015). Próbka miała kształt walca o średnicy 2,54 cm i wysokości ok. 4,5 cm. O jej wyborze do badań zadecydowała niska przepuszczalność, określona metodą azotową. Badanie przeprowadzono w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie za pomocą przepuszczalnościomierza gazowego firmy Temco. Wartość współczynnika przepuszczalności uzyskano z równania [1], uwzględniając poprawki na efekt Klinkenberga:

$$k_p = \frac{2\mu Q_b p_b L T_f}{A(P_1^2 - P_2^2) T_{ref}} \quad [1]$$

gdzie:

k_p – współczynnik przepuszczalności pionowej [mD],
 μ – lepkość azotu w temperaturze 294 K: 0,01737 [cP],
 Q_b – natężenie przepływu gazu [cm³/s],
 p_b – standardowe ciśnienie odniesienia dla przepływu masy na długości 1 m: 1,00 [atm],
 L – długość próbki [cm],
 A – pole przekroju poprzecznego próbki [cm²],
 P_1 – ciśnienie wlotowe azotu [atm],
 P_2 – ciśnienie wylotowe azotu [atm],
 T_f – temperatura przepływu azotu [K],
 T_{ref} – temperatura referencyjna: 294 K.

Następnie wykonano badania mikroskopowe w świetle przechodzącym i w katodoluminescencji (CL) przy napięciu 15 kV i natężeniu prądu 350 mA. W tym celu przygotowano dwie płytki cienkie nasycone żywicą z niebieskim barwnikiem.

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; fheed@agh.edu.pl; ORCID ID: 0000-0002-7320-5301

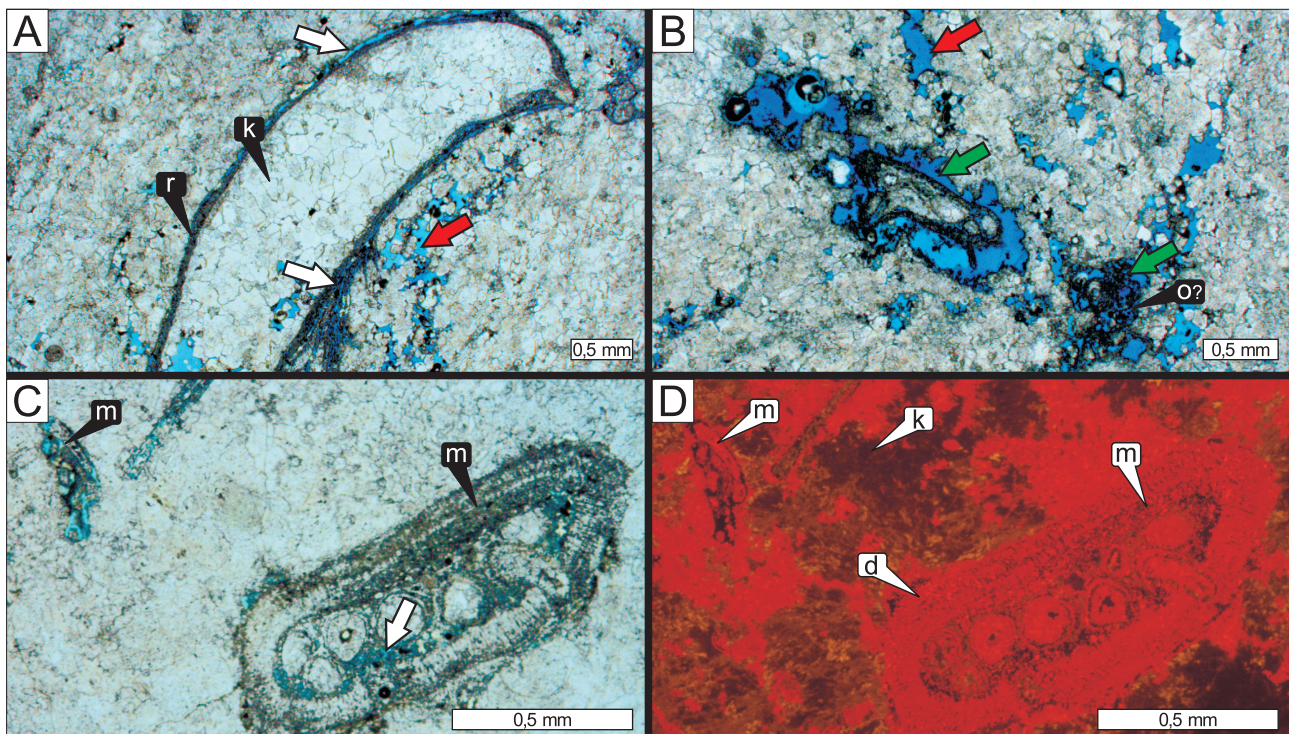
WYNIKI BADAŃ

Badania mikrotomograficzne przeprowadzono na tomografie GE Nanotom S, wykonując 1800 pięciokrotnie uśrednionych projekcji. Po usunięciu zakłóceń, pozostawiono 1520 warstw obrazu 16-bitowego o rozdzielczości 0,0225 mm. Obraz przeanalizowano w programie MATLAB. Rozpoznane pory przekształcono do 8-bitowej maski binarnej o wymiarach ok. $24 \times 24 \times 34$ mm, poddanej trójwymiarowej filtracji medianowej. Następnie wykonano analizę komponentów połączonych (*bwconncomp*), stosując typ połączeń 26, który uwzględnia woksele połączone narożami lub krawędziami. Otrzymano maskę z etykietami porów, z której wyodrębniono największy obiekt tworzący porowatość otwartą. Pozostałe obiekty sklasyfikowano jako pory zamknięte. Wartość porowatości całkowitej, otwartej i zamkniętej wyznaczono na podstawie objętości porów w danych grupach, obliczonych dzięki funkcji *regionprops3*. Celem dalszej analizy było uzyskanie przestrzennego modelu średnic porów otwartych.

Najpierw obliczono mapę dystansów euklidesowych (*bwdist*), reprezentującą odległości wokseli od krawędzi porów. Aby uwzględnić geometrię sieci porowej, za pomocą funkcji *bwskel* wyznaczono jej szkielet, który otrzymał podwójną wartość z mapy *bwdist*. Aby przypisać średnice wokselom spoza szkieletu, zastosowano dwa algorytmy: 1) metodę najbliższego sąsiada (*Nearest Neighbor*, NN) i 2) interpolację przestrzenną (*Scattered Interpolant*, SI). W algorytmie NN woksele otrzymywały średnicę z najbliższego punktu szkieletu, z kolei w podejściu SI wartości były interpolowane liniowo. Otrzymane modele zwizualizowano w programie ParaView.

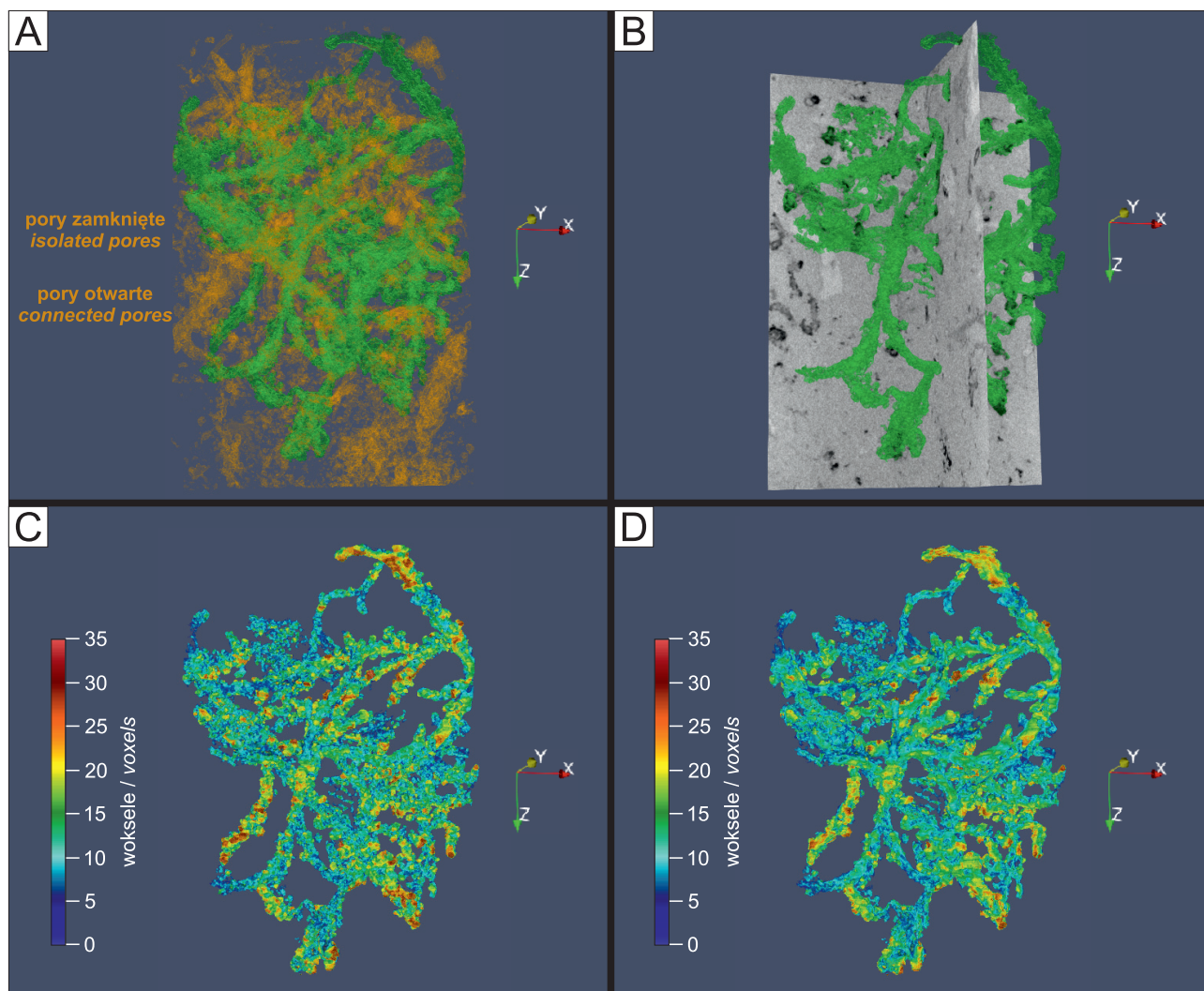
Badana skała jest silnie zrekrytalizowanym, bioklastycznym wapieniem dolomitycznym (ryc. 1). Zawiera częściowo rozpuszczone fragmenty mszywiolów i muszli ramienionogów oraz duże ilości sparytowego cementu kalcytowego (ryc. 1A), często zastąpionego dolomitom (ryc. 1D). Przeważają rzadko rozmieszczone pory moldyczne i druzowe (ryc. 1A–B). Porowatość całkowita skały wynosi ok. 4%, z czego porowatość otwarta stanowi ok. 60%. Pory otwarte tworzą krętą sieć o objętości $353,6 \text{ mm}^3$ (0,35 ml), która kształtem nawiązuje do rozpuszczonych fragmentów łodyg mszywiolów i muszli ramienionogów (ryc. 1A–C, 2A–B). Współczynnik przepuszczalności badanej skały wynosi zaledwie 2,24 mD, czyniąc ją praktycznie nieprzepuszczalną.

Parametry próbki i wyniki analizy średnic przedstawiono w tabeli 1. Wartości średnic na obu modelach sugerują dominację małych rozmiarów porów, przeważnie poniżej 15 wokseli (ryc. 2C–D). Taki rozmiar odpowiada kuli o średnicy ok. 0,35 mm. Lokalnie pojawiają się większe pory, o maksymalnych średnicach zbliżających się do 35 wokseli (tab. 1, ryc. 2C–D), co w 2D odpowiada ok. 0,8 mm. Średnia średnica wg algorytmów NN i SI wynosi odpowiednio ok. 10 i 9 wokseli. Mediana wartości średnicy jest również nieco wyższa dla algorytmu NN – 9,17 wokseli, w porównaniu do 8,67 wokseli z metody SI. Model SI ma natomiast niższą wartość odchylenia standardowego (3,58 wokseli) w porównaniu do 4,35 wokseli dla NN (tab. 1). Jest to efekt zastosowania interpolacji między punktami, dobrze widoczny na histogramach wartości średnic z regionalnych maksimum (ryc. 3). Wyniki dla



Ryc. 1. Zdjęcia mikroskopowe. A–C – światło przechodzące przy 1N; D – CL. Białe strzałki wskazują porowatość wewnątrzkomponentową, zielone – moldyczną, czerwone – druzową. Symbole: m – mszywiol, o – otwornice (rozpuszczone skorupki), r – ramienionogi, d – dolomit drobnokrystaliczny, k – sparytowy cement kalcytowy

Fig. 1. Photomicrographs. A–C – 1N transmitted light view; D – CL view. Arrows: white – intraparticle porosity, green – moldic pores, red – dissolution vugs. Legend: m – bryozoans, o – dissolved shells of foraminifers, r – brachiopods, d – fine-crystalline dolomite, k – sparry calcite cement



Ryc. 2. Rekonstrukcja porowatości otwartej i zamkniętej (A), pory otwarte na tle przekrojów przez oryginalny obraz (B) i modele 3D średnic porów (C – NN, D – SI)

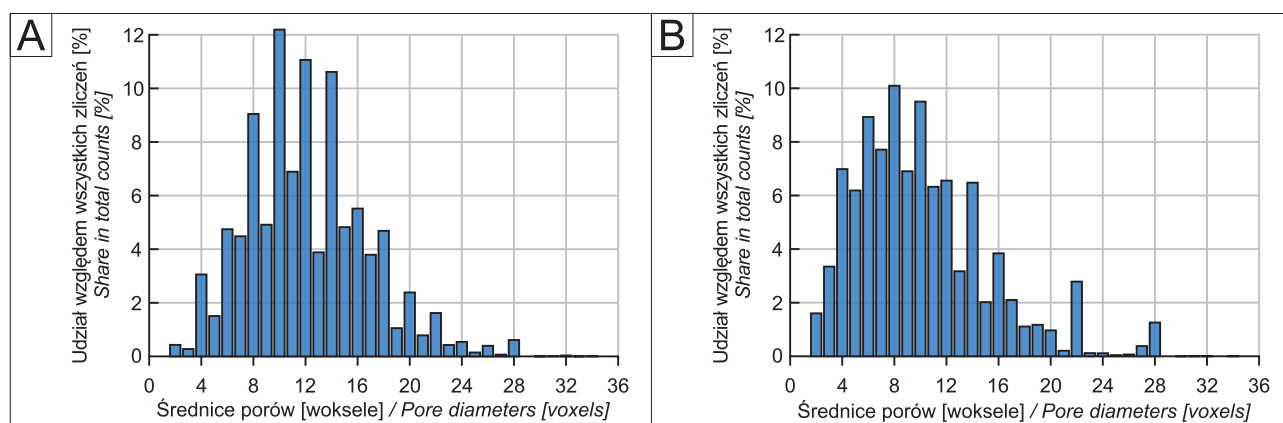
Fig. 2. Reconstruction of connected and isolated porosity (A), connected pores overlaid on cross-sections of the original image (B), and 3D pore diameter models (C – NN, D – SI)

Tab. 1. Parametry sieci porowej i wyniki analizy średnic porów

Table 1. Pore network parameters including the results of pore diameter analysis

Podstawowe parametry sieci porowej / Basic pore network parameters		
Parametr / Parameter	Wartość / Value	
Porowatość zamknięta / Isolated porosity	1,6%	
Porowatość otwarta / Connected porosity	2,3%	
Porowatość całkowita / Total porosity	3,9%	
Przepuszczalność azotowa / Nitrogen gas permeability	2,24 mD	
Parametry opisujące średnice porów [woksele] / Parameters describing pore diameters [voxels]		
Parametr / Parameter	Wartość / Value	
	Nearest Neighbor	Scattered Interpolant
Maksimum / Maximum	34,58	34,70
Średnia arytmetyczna / Mean	9,91 (12,59)	9,12 (10,54)
Mediana / Median	9,17 (12,17)	8,67 (9,80)
Odchylenie standardowe / Standard deviation	4,36 (4,66)	3,58 (5,17)

W nawiasach podano wyniki analizy regionalnych maksimów średnic.
 Values in brackets correspond to regional maxima of the modelled diameters.



Ryc. 3. Histogramy wartości średnic porów z regionalnych maksimów: A – NN, B – SI
 Fig. 3. Histograms of pore diameter values from the regional maxima: A – NN, B – SI

algorytmu NN charakteryzują się większymi zmianami wartości średnic. W przypadku algorytmu SI dominują mniejsze wartości i stąd średnia i mediana są niższe. Największe różnice wartości średniej i mediany dla średnic zaobserwowano jednak w regionalnych maksimach (tab. 1).

DYSKUSJA I WNIOSKI

Wizualizacja rozkładu porów w skałach rafowych ułatwia zrozumienie mechanizmów kontrolujących przepuszczalność. Badania wykazały dominację porów o niewielkich średnicach, średnio ok. 0,2 mm, tworzących nieregularną sieć, często spotykaną w węglanach (Lucia, 2007). Lokalne wystąpienia większych porów o średnicy bliskiej 1 mm nie wpływają istotnie na wzrost przepuszczalności. Parametr ten jest również obniżony z uwagi na zaawansowaną cementację kalcytową (por. Moore, 2001) i znaczące rozczłonowanie łodyg mszywiolów. Fragmentacja prawdopodobnie wynika z dużej energii wody w czasie depozycji górnej części rafy. Obniżyła ona potencjał rozpuszczania ciągłych fragmentów szkieletu ziarnowego, tym bardziej, że mszywioly były często otoczone łatwo rozpuszczalnymi skorupkami otwornic inkrustujących (Raczyński i in., 2017).

Histogramy wartości średnic porów pokazały, że metoda NN lepiej zachowuje lokalne maksima, natomiast algorytm SI zapewnia płynniejsze odwzorowanie zmian, ale może pomijać istotne szczegóły. Kluczowy pozostaje wybór właściwego modelu matematycznego do opisu geometrii porów. Model euklidesowy może bowiem nie oddawać w pełni natury nieregularnych porów. Alternatywę stanowią procedury segmentacji *watershed* (np. Rabbani i in., 2016) i dopasowania elipsoid (Druoton i in., 2018), które jednak mogą być wolniejsze i wymagać ręcznego doboru parametrów. Będzie to temat kolejnych artykułów.

Szczegóły sieci porowej uzyskiwane dzięki analizie obrazu odzwierciedlają złożoną historię sedimentacyjną i diagenetyczną raf (Moore, 2001). Mogą okazać się cenne przy wyborze miejsc odpowiednich do sekwestracji CO₂ lub dalszych poszukiwań naftowych w rafach Ca1 oraz ich światowych odpowiednikach. W tym aspekcie górna część rafy Wielichowa może mieć ograniczony potencjał, którego ustalenie wymaga dalszych badań.

Autor artykułu składa serdeczne podziękowania recenzentowi, prof. Tadeuszowi Perytowi, za cenne uwagi, które przyczyniły się do udoskonalenia pierwszej wersji manuskryptu. Badania zostały dofinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego z funduszy statutowych AGH (grant nr 16.16.140.315/05) oraz Narodową Agencję Wymiany Akademickiej (NAWA, program Bekkera BPN/BEK/2023/1/00375).

LITERATURA

- BARNES D., HARRISON B., GRAMMER G.M., ASMUS J. 2013 – CO₂/EOR and Geological Carbon Storage Resource Potential in the Niaganan Pinnacle Reef Trend, Lower Michigan, USA. *Energy Procedia*, 37: 6786–6799.
- DRUOTON L., MICHELUCCI D., MONGA O., BOURAS A. 2018 – Approximation of pore space with ellipsoids: a comparison of a geometrical method with a statistical one. *SITIS 14th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems*. Las Palmas de Gran Canaria, Spain, hal-02447760.
- FHEED A., ŚWIERCZEWSKA A., KRZYŻAK A. 2015 – The isolated Wuchiapingian (Zechstein) Wielichowo Reef and its sedimentary and diagenetic evolution, SW Poland. *Geological Quarterly*, 59: 762–780.
- FHEED A., KRZYŻAK A., ŚWIERCZEWSKA A. 2018 – Exploring a carbonate reef reservoir – nuclear magnetic resonance and computed microtomography confronted with narrow channel and fracture porosity. *Journal of Applied Geophysics*, 151: 343–358.
- KRAKOWSKA P., DOHNALIK M., JARZYNA J., WAWRZYŃIAK-GUZ K. 2016 – Computed X-ray microtomography as the useful tool in petrophysics: A case study of tight carbonates Modryn formation from Poland. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 31: 67–75.
- LEŚNIAK G. 1999 – Zastosowanie komputerowej analizy obrazu w badaniach petrofizycznych. *Przegląd Geologiczny*, 47: 644–651.
- LUCIA F.J. 2007 – Carbonate Reservoir Characterization: An Integrated Approach. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- MOORE C.H. 2001 – Carbonate Reservoirs: Porosity, Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. Vol. 55, *Development in Sedimentology*, Elsevier Science, 55, Amsterdam.
- PERYT T.M., RACZYŃSKI P., PERYT D., CHŁÓDEK K. 2012 – Upper Permian reef complex in the basinal facies of the Zechstein Limestone (Ca1), western Poland. *Geological Journal*, 47: 537–552.
- RABBANI A., AYATOLLAHI S., KHARRAT R., DASHTI N. 2016 – Estimation of 3-D pore network coordination number of rocks from watershed segmentation of a single 2-D image. *Advances in Water Resources*, 94: 264–277.
- RACZYŃSKI P., PERYT T.M., STROBEL W. 2017 – Sedimentary and environmental history of the Late Permian Bonikowo Reef (Zechstein Limestone, Wuchiapingian), western Poland. *Journal of Palaeogeography*, 6: 183–205.
- STRZELECKI P.J., ŚWIERCZEWSKA A., KOPCZEWSKA K., FHEED A., TARASIUK J., WROŃSKI S. 2021 – Decoding Rocks: An Assessment of Geomaterial Microstructure Using X-ray Microtomography, Image Analysis and Multivariate Statistics. *Materials*, 14, 3266.

Praca wpłynęła do redakcji 9.02.2025 r.
 Akceptowano do druku 18.03.2025 r.