

Charakterystyka utworów czerwonego spągowca w aspekcie badań rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej i mikroskopii optycznej

Characteristics of Rotliegend sediments in view of X-ray microtomography and optical microscopy investigations

Marek Dohnalik, Konrad Ziemiainin

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Artykuł prezentuje wyniki analiz mikrotomograficznych oraz petrograficznych piaskowców czerwonego spągowca pobranych z materiału rdzeniowego z otworów wiertniczych zlokalizowanych na obszarze monokliny przedsudeckiej, w jej części środkowej i północnej, oraz na granicy monokliny przedsudeckiej i synklinorium mogileńsko-łódzkiego. Do badań wytypowano 3 rejon: Czarna Wieś–Paręczewo (19 próbek), Środa Wielkopolska–Kromolice (21 próbek) oraz Siekierki–Miłosław (21 próbek). Celem przeprowadzonych badań petrologicznych oraz mikrotomograficznych było zbadanie, w jaki sposób odmienne właściwości zbiornikowe piaskowców znajdą odzwierciedlenie w wynikach zastosowanych metod. Wykazano zdecydowane zróżnicowanie pomiędzy próbkami z rejonu Środa Wielkopolska–Kromolice a pozostałymi przebadanymi obszarami. Dla wspomnianego obszaru otrzymano najwyższą średnią wartość porowatości efektywnej, najwyższy średni udział podsystemów zaliczanych do VII klasy objętości porów, trzykrotnie większą średnią wartość współczynnika porowatości CT oraz największą długość średniej cięciwy. Również pod kątem petrograficznym (skład szkieletu ziarnowego, typ cementu) jest to region, gdzie zaznaczają się wyraźne różnice, zwłaszcza w porównaniu z rejonem Czarna Wieś–Paręczewo. Na podstawie uzyskanych wyników możliwe było uszeregowanie przebadanych rejonów pod kątem własności zbiornikowych – od najgorszych (Czarna Wieś–Paręczewo) do najlepszych (Środa Wielkopolska–Kromolice). Wyciągnięte wnioski znajdują także potwierdzenie w innych analizach petrofizycznych (np. porozymetria ręciovą, analizy przepuszczalności). Połączenie otrzymanych wyników mikrotomograficznych i petrograficznych pozwoliło na uzyskanie pełnej charakterystyki badanych próbek – zarówno pod kątem składu mineralogicznego szkieletu ziarnowego, jak też wykształcenia przestrzeni porowej. Dane te, zwłaszcza w połączeniu z wynikami analizy gęstości i porowatości metodami piknometrii helowej oraz porozymetrii ręciovą, otwierają szereg możliwości przeprowadzenia różnego typu modeli (porowatość, przepuszczalność) zarówno w skali samej próbki, jak też w skali otworu lub nawet całego basenu, co ma kluczowe znaczenie dla tworzenia strategii poszukiwań złóż węglowodorów.

Słowa kluczowe: czerwony spągowiec, mikrotomografia, petrografia, własności zbiornikowe.

ABSTRACT: The article presents the results of microtomographic and petrographic investigations of Rotliegend sandstones collected from core material from wells located in the area of the Fore-Sudetic Monocline in its central and northern parts and also on the border of the Fore-Sudetic Monocline and the Mogilno – Łódź Synclinorium. Three areas were selected for the study: Czarna Wieś–Paręczewo (19 samples), Środa Wielkopolska–Kromolice (21 samples) and Siekierki–Miłosław (21 samples). The aim of the petrologic and microtomographic studies was to investigate how the different reservoir properties of sandstones will be reflected in the results of the methods used. Strong differences between samples from the region of Środa Wielkopolska–Kromolice and the other studied areas have been demonstrated. In the case of this area several key factors were noticed: the highest average value of effective porosity; the highest average content of pores belonging to class VII (pore volume subsystem classification); three times higher average value of the CT porosity coefficient and the largest length of the average chord. Also in terms of petrography (composition of grains, cement type) it is a region where major differences, especially compared to the region of Czarna Wieś–Paręczewo, can be seen. Based on the obtained results, it was possible to rank the examined regions in terms of their reservoir properties – from the worst (Czarna Wieś–Paręczewo) to the best (Środa Wielkopolska–Kromolice). These conclusions are also confirmed by other petrophysical analyses (eg. mercury porosimetry, permeability analysis). Combination of the obtained microtomographic and petrographic results allowed to obtain a full characterization of the investigated samples – both in terms of the mineralogical composition of grains, as well as the development of the pore space. These data, especially in combination with the results of density and porosity analyses (helium pycnometry and mercury porosimetry), open up a number of possibilities to carry out different types of modeling (porosity, permeability) both on the scale of the sample itself, as well as the scale of a single well or even the whole basin, which is crucial for creating a hydrocarbon exploration strategy.

Key words: Rotliegend, microtomography, petrography, reservoir properties.

Autor do korespondencji: K. Ziemiainin, e-mail: konrad.ziemiainin@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 03.12.2019 r. Zatwierdzono do druku: 15.10.2020 r.

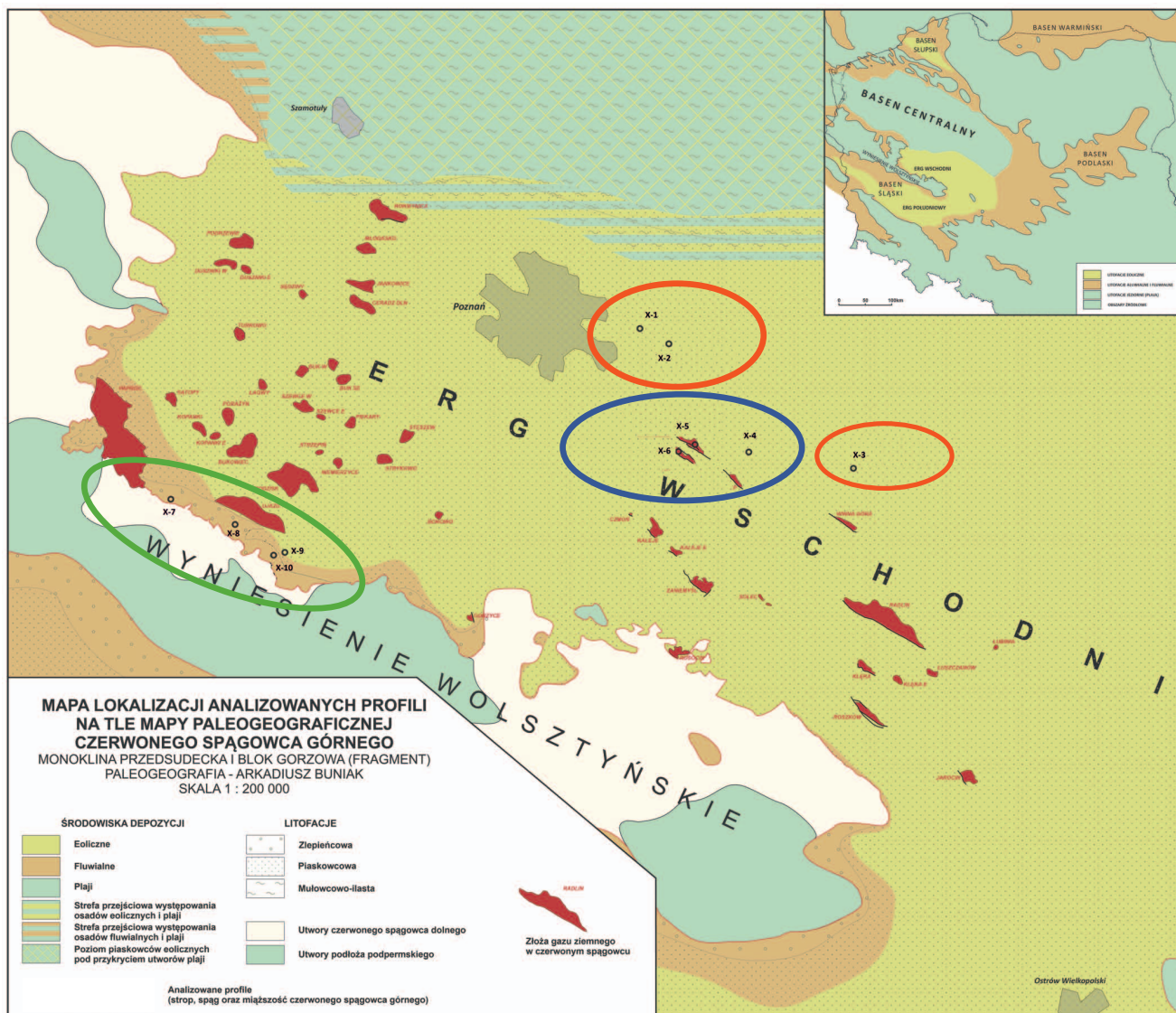
Wstęp

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań próbek piaskowców czerwonego spągowca uzyskane dwiema różnymi metodami obrazowania. Pierwszą z nich była rentgenowska mikrotomografia komputerowa, a drugą obserwacje wykonane przy użyciu mikroskopu optycznego (petrograficznego). Badaniom poddane zostały próbki reprezentujące trzy obszary o różnych właściwościach zbiornikowych. Zróżnicowanie to zostało potwierdzone za pomocą badań przeprowadzonych na próbkach rdzeni, z wykorzystaniem m.in. piknometru helowego, spektrometru jądrowego rezonansu magnetycznego, porozymetru rtęciowego, oraz analizami przepuszczalności dla gazu (azotu). Celem przeprowadzonych badań petrologicznych oraz mikrotomograficznych było określenie, w jaki sposób odmienne właściwości zbiornikowe próbek znajdują odzwierciedlenie w wynikach tych dwóch metod.

Materiał badawczy

Badaniami objęte zostały piaskowce górnego czerwonego spągowca, pochodzenia eolicznego, pobrane z otworów wiertniczych zlokalizowanych na obszarze monokliny przedsudeckiej w jej części środkowej i północnej oraz na granicy monokliny przedsudeckiej i synklinorium mogileńsko-łódzkiego. W paleogeografii górnego czerwonego spągowca obszar ten, nazwany ergiem wschodnim (Kiersnowski, 1997), charakteryzuje się występowaniem znacznych miąższości utworów o genezie eolicznej. Na obszarze ergu wschodniego miąższość osadów górnego czerwonego spągowca wynosi około 400–600 m w rowie Poznania i około 1100 m w rowie Kórnika. W strefie krawędziowej wyniesienia wolsztyńskiego miąższość tych osadów jest bardzo zróżnicowana i wynosi od kilku do kilkuset metrów.

Do badań wybrano dwa obszary: Czarna Wieś–Parzęczewo (**rejon 1**, oznaczony zieloną elipsą na rys. 1),



Rys. 1. Analizowane regiony na tle utworów czerwonego spągowca (Buniak et al., 2008)

Fig. 1. Investigated regions on the map of the Rotliegend sediments (Buniak et al., 2008)

znajdujący się w części brzeżnej ergu wschodniego, oraz Siekierki–Kromolice–Miłosław, leżący w jego środkowej części. Na obszarze Siekierki–Kromolice–Miłosław obserwuje się niewielką zmienność w wykształceniu petrograficznym piaskowców eolicznych, za to różnice we właściwościach zbiornikowych są znaczne (Buniak et al., 2009). Ze względu na spore zróżnicowanie właściwości zbiornikowych obszar ten można podzielić na dwie strefy. Do pierwszej strefy, o dobrych właściwościach zbiornikowych, możemy zaliczyć otwory X-4, X-5 oraz X-6 (**rejon 2**, oznaczony niebieską elipsą na rys. 1), a do strefy drugiej, o niskich właściwościach, zaliczono otwory X-1, X-2 oraz X-3 (**rejon 3**, oznaczony czerwonymi elipsami na rys. 1). Na obszarach o niskich właściwościach zbiornikowych gaz ziemny występuje jako gaz zamknięty (Kiersnowski et al., 2010; Wójcicki et al., 2014).

Metodyka

Rentgenowski mikrotomograf komputerowy

Badania mikrotomograficzne (Zalewska et al., 2010; Dohnalik, 2014; Dohnalik i Jarzyna, 2015; Urbaniec et al., 2018) wykonano na próbkach rdzeni o średnicy 1 cm i wysokości około 3 cm. Analizowany wycinek badanych próbek miał rozmiar woksela $5,8 \times 5,8 \times 5,8 \mu\text{m}^3$.

Analiza otrzymanego obrazu struktury porowej pozwoliła na otrzymanie przedstawionych niżej parametrów.

• Współczynnik porowatości

W pierwszym etapie obliczeń po wykonaniu binaryzacji, prowadzących do wyznaczenia parametrów charakteryzujących strukturę porową skały, określa się współczynnik porowatości próbki (Kp) na podstawie równania (1):

$$Kp = Vp / (Vp + Vsz) \quad (1)$$

gdzie:

Vp – objętość wokseli reprezentujących pory,

Vsz – objętość wokseli reprezentujących szkielet.

• Współczynnik jednorodności rozkładu struktury porowej metodą badania lokalnej porowatości

Badanie wykonano, dzieląc próbkę na mniejsze sześciiany i wyznaczając tzw. porowatość lokalną podpróbek. Analizę porowatości lokalnej wejściowych obrazów o rozmiarach $900 \times 900 \times 400$ wokseli wykonano dla podpróbek o wymiarze 100^3 wokseli, czyli dla każdej próbki uzyskano 324 wartości porowatości lokalnej. Jako kryterium oceny jednorodności struktury porowej przyjęto wartość względnego odchylenia standardowego (σ_r), wyrażonego wzorem (2):

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{100}}{Kp_{CT}} \quad (2)$$

gdzie:

σ_{100} – wartość odchylenia standardowego współczynnika porowatości lokalnej dla podpróbki o rozmiarze $100 \times 100 \times 100$ wokseli,

Kp_{CT} – wartość porowatości dla obrazu $900 \times 900 \times 400$ wokseli.

• Długość średniej cięciwy

Ważnym parametrem możliwym do wyliczenia z obrazów mikrotomograficznych jest średnia długość cięciwy (*mean chord length*). Parametr ten określa średnią długość z cięciwy poprowadzonych przez warstwę porów (Młynarczuk, 2004; Osher i Schladitz, 2009).

• Znormalizowana wartość charakterystyki Eulera

W badaniach skał i gleb zwrócono uwagę, że na właściwości struktury porowej ma, obok ilości i rozmiaru porów, również sposób ich połączenia (Toriwaki i Yonekura, 2002). Charakterystyka Eulera (*Eulernumber*) została zaproponowana jako parametr opisujący połączenie wolnych przestrzeni o nieregularnych kształtach (szczeliny, kanały z korzeniami, jamy wytworzone przez robaki w glebie) (Vogel, 2002). Charakterystyka Eulera może być określona następującym wzorem (3):

$$\chi = N - C + H \quad (3)$$

gdzie:

N – liczba izolowanych porów,

C – liczba połączeń,

H – liczba ziaren szkieletu całkowicie otoczonych pustką.

Wartość współczynnika H dla obrazów skał jest praktycznie pomijalna, gdyż w naturze nie są spotykane cząstki szkieletu skalnego całkowicie otoczone powietrzem. Zatem, zgodnie z przedstawioną definicją, gdy wartość χ jest dodatnia ($N > C$), struktura porowa jest słabo połączona, w przypadku przeciwnym ($C > N$) struktura porowa posiada wiele połączeń pomiędzy porami.

• Liczba koordynacyjna

Po wyznaczeniu w programie MAVI liczby kanałów porowych, ich zakończeń oraz porów, wyliczono, korzystając z poniższego wzoru, wartość liczby koordynacyjnej dla analizowanych próbek:

$$\bar{L}_k = \frac{2 \cdot L_K - L_Z}{L_W} \quad (4)$$

gdzie:

L_K – liczba kanalików,

L_Z – liczba zakończeń,

L_W – liczba węzłów.

Analiza petrograficzna i granulometryczna

Badania petrologiczne przeprowadzono na płytkach cienkich. W trakcie obserwacji zwracano uwagę na skład mineralogiczny szkieletu ziarnowego, rodzaje i wykształcenie cementów, a także na kształt, wielkość oraz wzajemne relacje pomiędzy ziarnami. Dla lepszej prezentacji zarówno porów, jak i mikroszczelin wszystkie próbki nasączono niebieską żywicą. Analiza ilościowa została wykonana metodą punktową (dla każdej próbki zostało zliczonych minimum 300 punktów). Obserwacji dokonano przy użyciu mikroskopu petrologicznego marki Nikon, wyposażonego w cyfrową kamerę połączoną z komputerem. Próbki obserwowano przy powiększeniach od 50× do 500×. W celu uzupełnienia dokumentacji wynikowej wykonano szereg zdjęć mikroskopowych.

Analizę granulometryczną przeprowadzono przy użyciu tych samych płytek cienkich. Dla każdej próbki wykonano

350 pomiarów wielkości ziaren. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono takie parametry jak: średnia średnica, stopień wysortowania, skośność oraz spłaszczenie.

W analizie wpływu kompaktacji i cementacji na utratę pierwotnej porowatości wykorzystano parametry: COPL (utrata porowatości w wyniku kompaktacji), CEPL (utrata porowatości w wyniku cementacji) oraz ICOMPACT (współczynnik kompaktacji) (Lundegard, 1992). Parametry te wylicza się z poniższych wzorów (5, 6, 7) (Lundegard, 1992):

$$COPL = P_i - (((100 - P_i) \times P_{mc}) / (100 - P_{mc})) \quad (5)$$

$$CEPL = (P_i - COPL) \cdot (C / P_{mc}) \quad (6)$$

$$ICOMPACT = COPL / (COPL + CEPL) \quad (7)$$

gdzie: P_i oznacza inicjalną porowatość, P_{mc} to suma parametrów oznaczonych przy użyciu mikroskopu, tj. porowatości i cementacji, a C oznacza udział cementów w porach (w % obj.).

Tabela 1. Wyniki rentgenowskiej analizy mikrotomograficznej, NMR oraz porozymetrii rtęciowej i piknometrii helowej

Table 1. Results of X-ray microtomography, NMR, mercury porosimetry and helium pycnometry analyses

Parametr/rejon	Lp. parametrów	Rejon 1 Czarna Wieś–Parzęczewo	Rejon 2 Środa Wielkopolska–Kromolice	Rejon 3 Siekierki–Miłosław
Liczba próbek		19	21	21
Przedział głębokości		2564,9–2785,5	3556,2–3732,7	3670,9–4230,8
I	1	11,14	2,15	5,77
II	2	15,29	5,94	20,49
III	3	16,96	2,60	12,16
IV	4	21,32	2,48	18,00
V	5	10,48	1,20	10,88
VI	6	6,19	0,40	3,09
VII	7	18,62	85,24	29,61
Porowatość CT	8	3,56	14,18	6,71
Jednorodność	9	0,55	0,24	0,24
Średnia cięciwa (µm)	10	18,24	26,11	16,88
Euler norm.	11	0,40	-0,68	0,12
Liczba koordynacyjna	12	2,24	2,39	2,12
X	krętość	13	0,42	1,02
Y		14	0,40	1,19
Z		15	0,86	1,17
Porowatość efektywna (NMR)	16	6,45	13,85	8,32
Przepuszczalność [mD]	17	1,73	10,29	0,20
Porowatość Hg [%]	18	8,50	16,58	11,65
Porowatość He [%]	19	10,54	15,40	11,70

1–7 – udział I, II, III, IV, V, VI, VII klasy objętości, 8 – wartość współczynnika porowatości uzyskana z analizy obrazu przy rozdzielczości wokse-la 5,8 µm [%], 9 – współczynnik jednorodności rozkładu struktury porowej określony metodą badania lokalnej porowatości, 10 – długość średniej cięciwy [µm], 11 – znormalizowana wartość charakterystyki Eulera, 12 – liczba koordynacyjna, 13–15 – wartość krętości uzyskanej z analizy obrazu, wyliczonej w kierunku X, Y i Z, 16 – współczynnik porowatości efektywnej określony metodą NMR [%], 17 – współczynnik przepuszczalności absolutnej [mD], 18 – współczynnik porowatości całkowitej uzyskany metodą porozymetrii rtęciowej [%], 19 – współczynnik porowatości całkowitej określony metodą piknometrii helowej [%]

Wyniki

Badania tomograficzne

Wyniki poszczególnych parametrów dla każdej próbki można znaleźć w publikacji Dohnalika (2014), natomiast w tym artykule ograniczono się do podania średnich wartości średnich z analizy obrazu dla próbek z danego rejonu (tab. 1).

Objętość poszczególnych klas podsystemów porów występujących w obrębie próbki przedstawiona jest w tabeli 2.

Tabela 2. Klasyfikacja objętościowa podsystemów porów
Table 2. Pore size volume classification

Objętość podsystemu porów [woksel]	1–9	10–99	100–999	1000–9999	10 000–99 999	100 000–1 000 000	> 1 000 000
Objętość podsystemu porów [μm^3]	$2 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^8$	$> 2 \cdot 10^8$
Klasa	I	II	III	IV	V	VI	VII
Kolor	żółty	niebieski	czerwony	zielony	biały	fioletowy	różowy

Dane przedstawione w tabeli 1 pokazują zdecydowane zróżnicowanie pomiędzy próbkami z rejonu Środa Wielkopolska–Kromolice a pozostałymi. W tym rejonie otrzymano najwyższą średnią wartość porowatości efektywnej, równą 13,85%. Dla próbek z rejonu Siekierki–Miłosław średnia wartość tego parametru wynosi 8,32%, a dla próbek z rejonu Czarna Wieś–Parzęczewo – 6,45%.

Również większość parametrów uzyskana z analizy obrazu wykazała znaczne zróżnicowanie wartości otrzymanych z rejonu Środa Wielkopolska–Kromolice w stosunku do pozostałych. Średni udział podsystemów zaliczanych do VII klasy objętości porów na obszarze Środa Wielkopolska–Kromolice wynosił 85%, w rejonie Siekierki–Miłosław wynosił 30%, a w rejonie Czarna Wieś–Parzęczewo – 19%. Podobnie trzykrotnie większą wartość średnią uzyskano dla współczynnika porowatości CT. Próbki

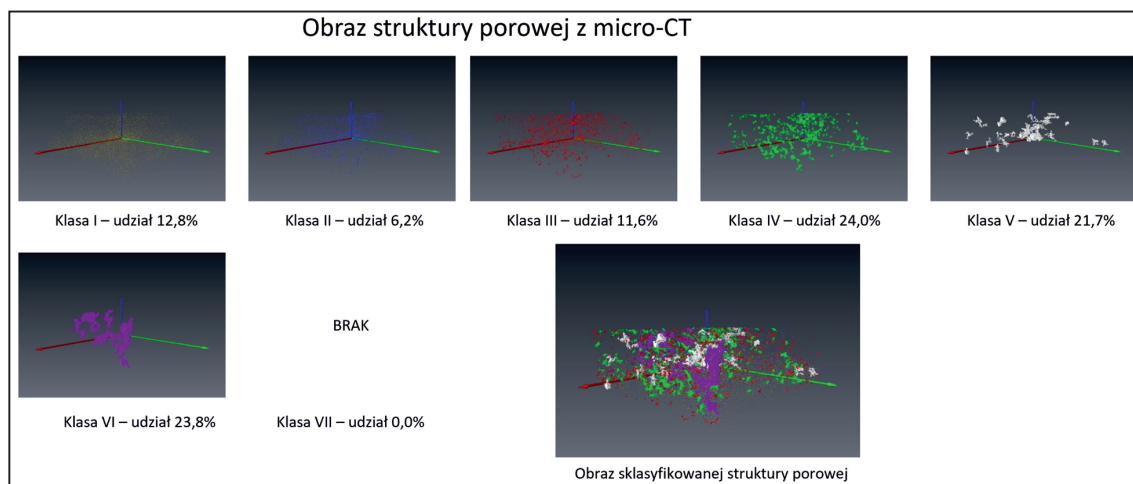
te charakteryzowały się największą długością średniej cięciwy – 26,11 μm , podczas gdy w pozostałych rejonach około 17,5 μm . Analiza krętości kanałków porowych również pokazuje, że próbki z rejonu Środa Wielkopolska–Kromolice posiadały najlepiej połączoną strukturę porową,

uzyskując najwyższą wartość średnią współczynnika porowatości CT. Wartość tę liczono w następujący sposób: próbkom, które nie posiadały połączeń w badanym kierunku, przypisywano wartość krętości równą zero. Dlatego wyższych wartości średnich nie należy traktować jako reprezentujących struktury o bardziej krętym systemie porowym, lecz jako świadczących o tym, że w badanym rejonie występowała większa liczba próbek posiadających połączenia w analizowanym kierunku. Również wartości znormalizowanej charakterystyki Eulera

zdecydowanie rozróżniają porównywane rejon. Można wnioskować, że próbki o lepszych właściwościach zbiornikowych posiadają znacznie lepiej rozwiniętą strukturę połączeń pomiędzy porami.

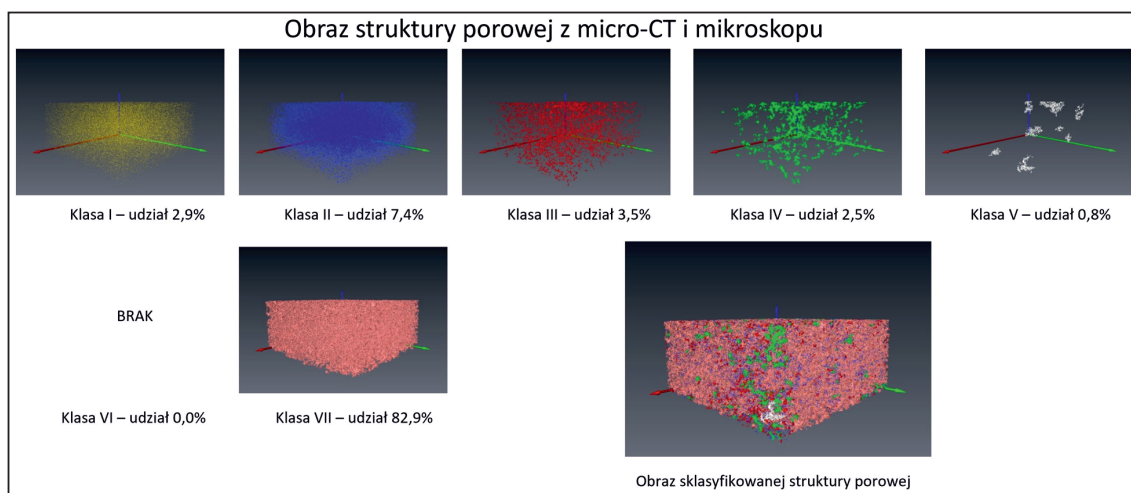
Analizując powyższe dane ze względu na otrzymane parametry, rejon można ustawić w następujący rosnący szereg (od własności zbiornikowych najgorszych do najlepszych): Czarna Wieś–Parzęczewo, Siekierki–Miłosław i Środa Wielkopolska–Kromolice. Podana klasyfikacja znajduje także potwierdzenie w innych analizach petrofizycznych (Dohnalik i Zalewska, 2013; Dohnalik 2014; Dohnalik i Jarzyna, 2015).

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono obrazy poszczególnych klas objętości podsystemów porów połączonych wraz z ich udziałem w porowatości dla próbki reprezentatywnej dla rejonu 1 (rys. 2) i próbki dla rejonu 2 (rys. 3).



Rys. 2. Przykładowe wyniki badań laboratoryjnych dla próbki reprezentatywnej dla rejonu 1

Fig. 2. Exemplary results of laboratory analysis of the representative sample of region 1



Rys. 3. Przykładowe wyniki badań laboratoryjnych dla próbki reprezentatywnej dla rejonu 2

Fig. 3. Exemplary results of laboratory analysis of the representative sample of region 2

Wyniki analizy petrograficznej

Przebadane skały są drobno- i bardzo drobnoziarnistymi arenitami kwarcowymi, subarkozowymi, sublitycznymi oraz litycznymi. Stopień wysortowania ziaren jest zmienny (od umiarkowanego do dobrego). Spotyka się zarówno ziarna ostrokrawędziste, jak i dobrze oraz bardzo dobrze obtoczone. Tekstura jest najczęściej bezładna, aczkolwiek w niektórych przypadkach w obrębie generalnie bardzo drobnoziarnistych ziaren spotyka się warstewki zbudowane z materiału średnioziarnistego (tablica I, fot. A).

Szkielet ziarnowy zbudowany jest głównie z ziaren kwarcu, zarówno monokrystalicznego, jak i polikrystalicznego. Obok ziaren kwarcu istotnym składnikiem są litoklasty skał magmowych (reprezentowanych przez różnego rodzaju granitoidy, jak również skały wylewne), metamorficznych (łupki i kwarcyty) i osadowych (iłowce, rzadziej mułowce). Największy udział mają skały magmowe, natomiast klasty skał metamorficznych i osadowych są rzadsze. Kolejnym bardzo istotnym składnikiem szkieletu ziarnowego są skaleni, zarówno potasowe, jak i plagioklasy. Ziarna skaleni często są w różnym stopniu dotknięte procesem rozpuszczania, co prowadzi do powstania wtórnej porowatości.

Głównymi spoiwami obecnymi w analizowanych arenitach są cementy węglanowe oraz minerały ilaste. Cement węglanowy występuje w przestrzeni porowej w postaci zarówno automorficznych kryształów (romboedrów) dolomitu (tablica I, fot. B), jak też kalcytu, zwykle szczelnie wypełniającego pory, a rzadziej mającego charakter podstawowy (tablica I, fot. C). Minerały ilaste obserwowane są w postaci cienkich obwódek wokół ziaren, mogą również wypełniać przestrzeń porową (tablica I, fot. D, E). Często obserwuje się je także w postaci mieszaniny z minerałami nieprzeźroczystymi

(matriks ilasto-żelazista). Sporadycznie spotykany jest również cement kwarcowy (tablica I, fot. F), głównie wypełniający pory (rzadziej w postaci obwódek), oraz anhydryt (tablica I, fot. G).

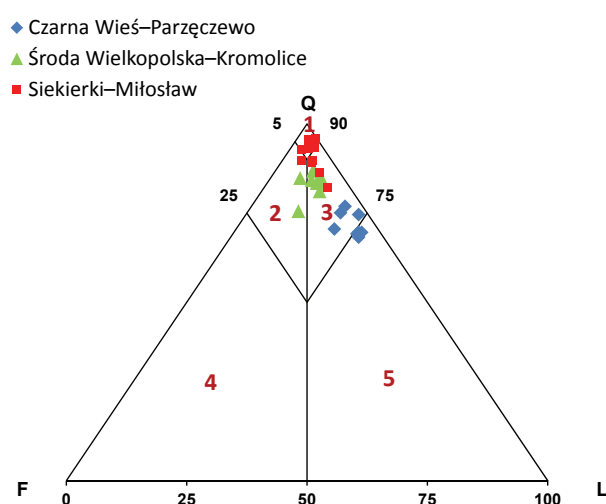
Analizowane arenity wykazują znaczne różnice pod kątem porowatości, której zakres wynosi od < 1% obj. do ok. 25% obj. (tablica I, fot. H). Z analizy wpływu kompaktacji i cementacji na porowatość (rys. 4) wynika, że głównym czynnikiem, jaki przyczynił się do utraty pierwotnej porowatości, jest kompaktacja. Tylko w przypadku jednej próbki (z otworu X-10) dominującym czynnikiem była cementacja – próbka ta charakteryzuje się bardzo wysokim udziałem cementu węglanowego (kalcytowego).

Wyniki w odniesieniu do badanych regionów przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunkach 4–6. Spośród przebadanych regionów największe różnice zarówno w składzie szkieletu ziarnowego, jak i wykształceniu spoiwa obserwuje się pomiędzy skałami z rejonów Środa Wielkopolska–Kromolice i Czarna Wieś–Parzęczewo. W regionie Czarna Wieś–Parzęczewo w szkielecie ziarnowym analizowanych próbek daje się zauważyć zdecydowanie większą zawartość litoklastów niż w rejonie Środa Wielkopolska–Kromolice. Dodatkowo wyraźnie zaznaczają się różnice w rodzaju obserwowanych cementów. Mianowicie dla regionu Czarna Wieś–Parzęczewo obserwuje się dominację porowego i podstawowego cementu kalcytowego oraz cementu ilastego wypełniającego pory lub występującego w postaci obwódek na detrytycznych ziarnach. W przypadku regionu Środa Wielkopolska–Kromolice sytuacja jest inna. Dominuje tutaj cement dolomitowy w postaci automorficznych romboedrów. Dużo częściej spotyka się również ilasto-żelazistą matriks. Różnice w wykształceniu cementów mają istotny wpływ na średnie wartości porowatości, które dla regionu Czarna Wieś–Parzęczewo są wyraźnie niższe od tych osiągniętych w regionie Środa Wielkopolska–Kromolice.

Tabela 3. Wyniki analizy petrograficznej analizowanych arenitów

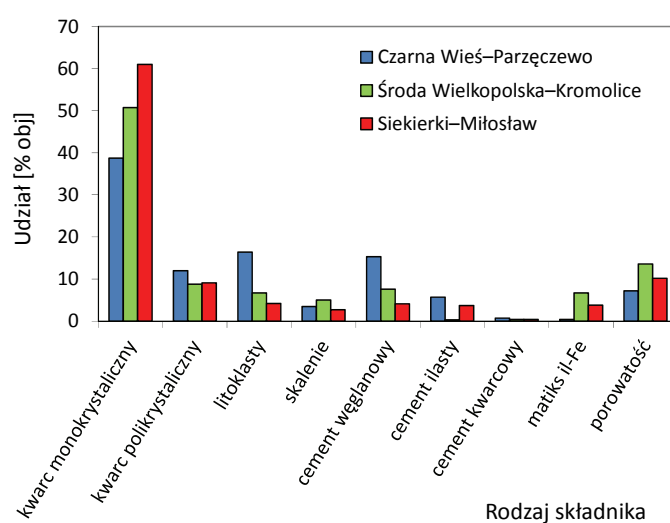
Table 3. Petrographic analysis results for the investigated arenites

Rejon	Czarna Wieś–Parzęczewo	Środa Wielkopolska–Kromolice	Siekierki–Miłosław
Klasyfikacja	drobno- i bardzo drobnoziarniste arenity sublityczne	drobnoziarniste arenity sublityczne, rzadziej subarkozowe	drobnoziarniste arenity kwarcowe i sublityczne, rzadziej subarkozowe
Stopień wysortowania	od umiarkowanego do dobrego	od umiarkowanego do dobrego	od umiarkowanego do dobrego
Tekstura	bezlądna	bezlądna lub z wkładkami grubszego materiału	bezlądna lub z wkładkami grubszego materiału
Szkielet ziarnowy			
– kwarc monokrystaliczny	29,9–51,8% obj. (śr. 38,7% obj.)	45,1–55,5% obj. (śr. 50,7% obj.)	54,2–67,5% obj. (śr. 61,0% obj.)
– kwarc polikrystaliczny	3,8–19,5% obj. (śr. 12,0% obj.)	6,3–15,1% obj. (śr. 8,8% obj.)	5,6–18,1% obj. (śr. 9,1% obj.)
– litoklasty	14,0–19,8% obj. (śr. 16,4% obj.)	4,6–8,7% obj. (śr. 6,7% obj.)	1,8–11,5% obj. (śr. 4,2% obj.)
– skalenie	1,4–6,8% obj. (śr. 3,5% obj.)	3,5–10,2% obj. (śr. 5,0% obj.)	1,1–4,9% obj. (śr. 2,7% obj.)
Spoiwo			
– cement węglanowy	4,4–38,8% obj. (kalcyt, śr. 15,3% obj.)	1,3–12,6% obj. (dolomit, śr. 7,6% obj.)	śląd. –12,8% obj. (gł. dolomit, śr. 4,1% obj.)
– cement ilasty	0,6–16,1% obj. (śr. 5,7% obj.)	do 1,0% obj. (śr. 0,3% obj.)	śląd. –8,0% obj. (śr. 3,7% obj.)
– cement kwarcowy	do 3,3% obj. (śr. 0,7% obj.)	do 1,5% obj. (śr. 0,4% obj.)	do 2,1% obj. (śr. 0,4% obj.)
– matksil-Fe	do 1,2% obj. (śr. 0,4% obj.)	1,8–10,7% obj. (śr. 6,7% obj.)	0,3–8,0% obj. (śr. 3,8% obj.)
Porowatość	0,6–25,4% obj. (śr. 7,2% obj.)	2,8–24,9% obj. (śr. 13,6% obj.)	5,2–19,0% obj. (śr. 10,2% obj.)
Granulometria			
Średnia średnica [Φ]	2,09–3,33	1,98–3,06	2,02–3,19
Wysortowanie	0,43–0,72	0,42–0,93	0,44–0,79
Skośność	–0,12–0,16	–0,28–0,14	–0,18–0,18
Splaszczanie	0,86–1,38	0,87–1,76	0,84–1,47
Inne parametry			
COPL	4,03–21,17 (śr. 14,30)	6,22–18,57 (śr. 11,62)	3,90–12,93 (śr. 8,70)
CEPL	14,05–30,90 (śr. 24,33)	15,20–26,59 (śr. 22,75)	24,16–37,39 (śr. 28,90)
ICOMPACT	0,52–0,88 (śr. 0,64)	0,57–0,80 (śr. 0,67)	0,69–0,91 (śr. 0,77)



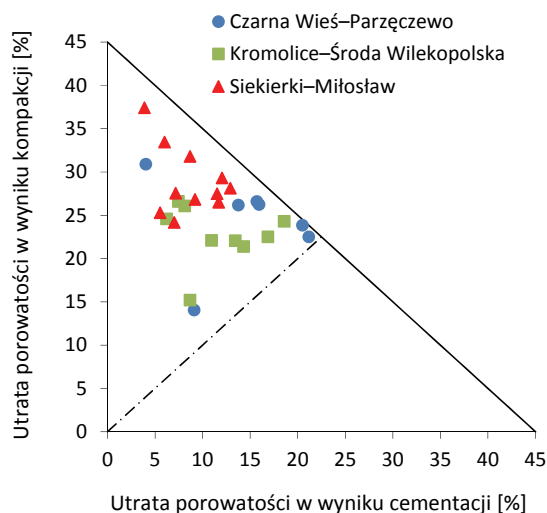
Rys. 4. Klasyfikacja analizowanych arenitów (Pettijohn et al., 1987): 1 – arenity kwarcowe, 2 – arenity subarkozowe, 3 – arenity sublityczne, 4 – arenity arkozowe, 5 – arenity lityczne

Fig. 4. Classification of the investigated arenites (Pettijohn et al., 1987): 1 – quartz arenites, 2 – subarkose, 3 – sublitharenites, 4 – arkosic arenites, 5 – lithic arenites



Rys. 5. Średnie udziały ziaren, spoiwa i porowatości w odniesieniu do analizowanych regionów

Fig. 5. Average content of grains, cements and porosity in relation to the investigated regions



Rys. 6. Wpływ procesów kompaktacji i cementacji na utratę pierwotnej porowatości w analizowanych arenitach

Fig. 6. Impact of compaction and cementation processes on reduction of primary porosity in the investigated arenites

Na tle dwóch omówionych wyżej obszarów region Siekierki-Miłosław nie jest tak charakterystyczny. Choć w szkieletce ziarnowym średnie zawartości zarówno skałeni, jak i litoklastów są najmniejsze, to jednak nie odbiegają one znacznie od tych notowanych w próbkach z regionu Kromolice-Środa Wielkopolska. Najmniejsze są też zawartości cementu węglanowego, który występuje zarówno w postaci automorficznych kryształów dolomitu, jak i kalcytu (ma zatem cechy obu wyżej wymienionych regionów). Średnie zawartości zarówno ilasto-żelazistej matriks, jak i obwódki ilastych mieszczą się pomiędzy tymi notowanymi w rejonach Kromolice-Środa Wielkopolska oraz Czarna Wieś-Parzęczewo. Podobnie jest ze średnimi wartościami porowatości. Biorąc pod uwagę wszystkie wyżej wymienione fakty, można wnioskować, że pomimo iż większość notowanych cech znajduje się raczej pomiędzy skrajnymi wartościami osiąganymi w przypadku dwóch pozostałych regionów, to ostatecznie bardziej jest on zbliżony (wykazuje więcej cech wspólnych) do regionu Kromolice-Środa Wielkopolska.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań wnioskować można, że najlepsze parametry zbiornikowe obserwuje się dla próbek z rejonu Środa Wielkopolska-Kromolice, nieco gorsze natomiast dla rejonu Siekierki-Miłosław, a najgorsze dla rejonu Czarna Wieś-Parzęczewo.

Obie zastosowane metody wykazały różnice w próbkach z 3 analizowanych regionów. Analiza petrograficzna (wraz z analizą granulometryczną) scharakteryzowała skład mineralogiczny

ziaren, ich wielkość oraz stopień wysortowania, a także dostarczyła informacji o typie i formie występowania cementów. Wyliczono również porowatość i okazało się, że koreluje ona z wynikami analizy tomograficznej. Analiza tomograficzna dostarczyła bardzo istotnej informacji o charakterze i sposobie wykształcenia przestrzeni porowej badanych próbek. Połączenie wyników obu tych typów analiz pozwoliło na otrzymanie pełnej charakterystyki badanych próbek. Uzyskane informacje, zwłaszcza w połączeniu z wynikami analizy gęstości i porowatości metodami piknometrii helowej oraz porozymetrii rtęciowej, otwierają szereg możliwości przeprowadzenia różnego typu modelowań (porowatość, przepuszczalność) zarówno w skali samej próbki, jak też w skali otworu lub nawet całego basenu.

Literatura

Buniak A., Kiersnowski H., Kuberska M., 2008. Perspektywy poszukiwań złóż gazu ziemnego w piaskowcach czerwonego spągowca o słabych właściwościach zbiornikowych w strefie Poznań-Konin-Kalisz. [W:] *IV Krajowy Zjazd Branży Górnictwa Naftowego. Materiały konferencyjne. Łągów Lubuski, 11-13.09.2008: 125-138.* PGNiG SA w Warszawie, Oddział w Zielonej Górze.

Buniak A., Kuberska M., Kiersnowski H., 2009. Petrograficzno-petrofizyczna charakterystyka piaskowców eolicznych strefy Siekierki-Winna Góra (koło Poznania) w aspekcie poszukiwań złóż gazu zamkniętego w osadach czerwonego spągowca. *Przegląd Geologiczny*, 57(4): 328-334.

Dohnalik M., 2014. Zwiększenie możliwości wyznaczania parametrów zbiornikowych skał z wykorzystaniem rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu - PIB*, 193: 1-162.

Dohnalik M., Jarzyna J., 2015. Determination of reservoir properties through the use of computed X-ray microtomography - eolian sandstone examples. *Geology, Geophysics & Environment*, 41(3): 233-248. DOI: 10.7494/geol.2015.41.3.223.

Dohnalik M., Zalewska J., 2013. Korelacja wyników badań laboratoryjnych uzyskanych metodą rentgenowskiej mikrotomografii, jądrowego rezonansu magnetycznego i porozymetrii rtęciowej. *Nafta-Gaz*, 10, 735-743.

Kiersnowski H., 1997. Depositional development of the Polish Upper Rotliegend Basin and evolution of its sediment source areas. *Geological Quarterly*, 41(4): 433-456.

Kiersnowski H., Buniak A., Kuberska M., Srokowska-Okońska A., 2010. Występowanie gazu ziemnego zamkniętego w piaskowcach czerwonego spągowca Polski. *Przegląd Geologiczny*, 58(4): 335-346.

Lundegard P.D., 1992. Sandstone porosity loss - A „big picture” view of the importance of compaction. *Jour. Sed. Petrol.*, 62: 250-260.

Młynarczuk M., 2004. Zastosowanie automatycznej analizy obrazów w pomiarach struktur skał. *Geotechnika i budownictwo specjalne.* [W:] *XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Zakopane 14-19.03.2004, KGBiG AGH, Kraków:* 305-318.

Osher J., Schladitz K., 2009. 3D Images of Material Structures. *Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA.*

Pettijohn F.J., Potter E., Siever R., 1987. Sand and Sandstone. *Springer-Verlag, New York:* 1-553.

Toriwaki J., Yonekura T., 2002. Euler Number and Connectivity Indexes of a Three Dimensional Digital Picture. *Forma*, 17: 183-209.

- Urbaniec A., Drabik K., Dohnalik M., 2018. Selected features of carbonate rocks based on the X-ray computed tomography method (CT). *Nafta-Gaz*, 3: 183–192. DOI: 10.18668/NG.2018.03.01.
- Vogel H.-J., 2002. Morphology of Condensed Matter, Physics and Geometry of Spatially Complex Systems. [W:] Mecke K., Stoyan D. (eds): *Topological Characterization of Porous Media*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 75–92.
- Wójcicki A., Kiersnowski H., Dyrka I., Adamczak-Biały T., Becker A., Głuszyński A., Janas M., Kozłowska A., Krzemiński L., Kuberska M., Paczeńska J., Podhalańska T., Roman M., Skowroński L., Waksmundzka M.I., 2014. Prognostyczne zasoby gazu ziemnego w wybranych zwięzłych skałach zbiornikowych Polski. *Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa*.
- Zalewska J., Kaczmarczyk J., Dohnalik M., Cebulski D., Poszytek A., 2010. Analiza własności zbiornikowych skał węglanowych z wykorzystaniem mikrotomografii rentgenowskiej. *Nafta-Gaz*, 8: 653–662.

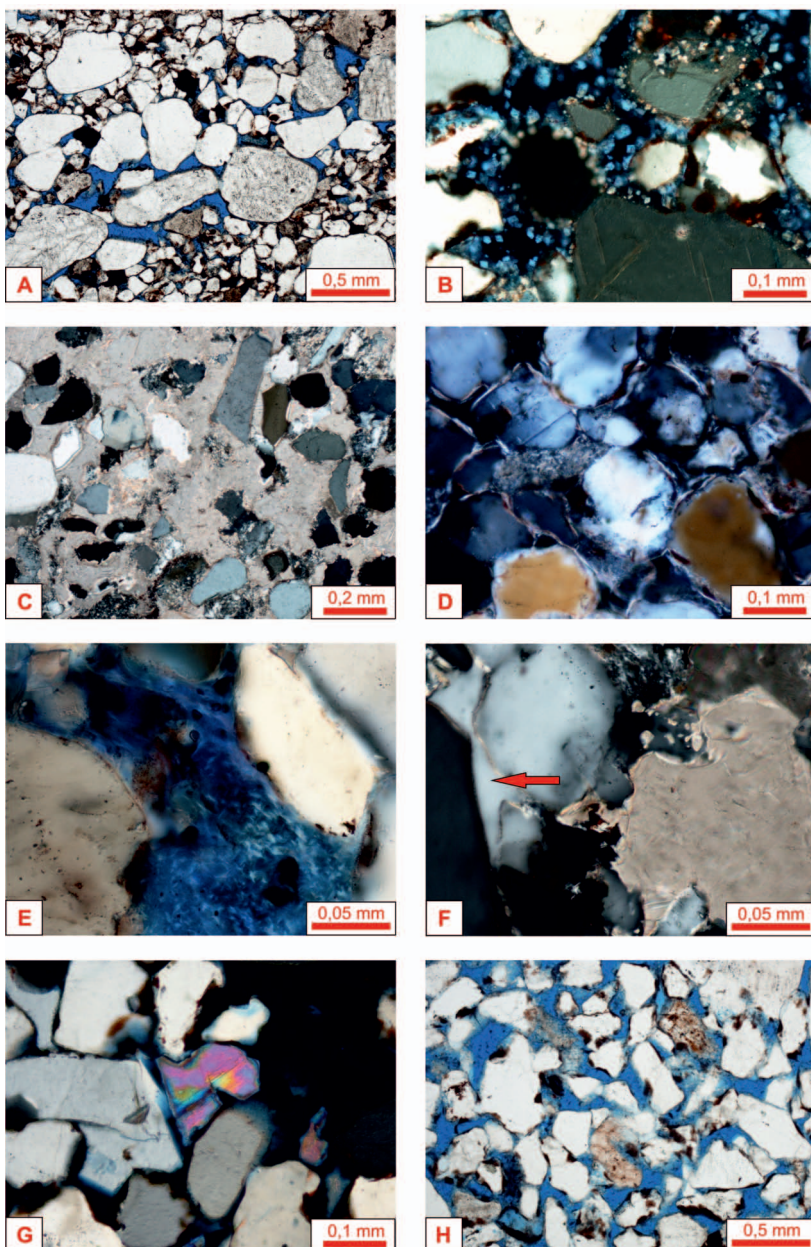


Dr inż. Marek DOHNALIK
Adiunkt, Kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: marek.dohnalik@inig.pl



Mgr Konrad ZIEMIANIN
Asystent w Zakładzie Geologii i Geochemii
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: konrad.ziemianin@inig.pl

TABLICA 1



Tablica 1.

- A. X-6. Wkładka grubszego materiału, wyraźnie wpływająca na wzrost porowatości i przepuszczalności. Porowatość w obrębie drobniejszej frakcji jest redukowana m.in. przez obecność ilasto-żelazistej matriks. Nikole równoległe.
- B. X-4. Kryształy dolomitu w przestrzeni porowej. Nikole skrzyżowane.
- C. X-10. Bazalny cement kalcytowy, znacząco redukujący pierwotną porowatość. Nikole skrzyżowane.
- D. X-3. Obwódki autigenicznego illitu na ziarnach kwarcu. Nikole skrzyżowane.
- E. X-2. Autigeniczny illit stopniowo wypełniający pory. Nikole skrzyżowane.
- F. X-8. Porowy cement kwarcytowy (strzałka). Nikole skrzyżowane.
- G. X-6. Anhydryt, krystalizujący w przestrzeni porowej. Nikole skrzyżowane.
- H. X-6. Wysoka porowatość, sięgająca około 25% obj. Nikole równoległe.

Plate 1.

- A. X-6. Intersection of coarse grains, clearly increasing porosity and permeability. Porosity within the finer fraction is reduced by clay-ferrous matrix. Plane-polarized light.
- B. X-4. Dolomite crystals in the pore space. Crossed polars.
- C. X-10. Calcite cement significantly reducing primary porosity. Crossed polars.
- D. X-3. Rims of autigenic illite on quartz grains. Crossed polars.
- E. X-2. Autigenic illite filling the pores. Crossed polars.
- F. X-8. Quartz cement in pores (arrow). Crossed polars.
- G. X-6. Anhydrite crystallizing in the pore space. Crossed polars.
- H. X-6. High porosity reaching 25 vol. %. Plane-polarized light.