

Konrad Ziemianin
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Korelacja parametrów petrofizycznych z analizą facji w otworach Bonikowo-1, Bonikowo-2 oraz Kokorzyn-2

Wstęp

Cel pracy

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań petrofizycznych, mikroskopowych oraz dokonano makroskopowego opisu rdzeni pochodzących z 3 odwiertów: Bonikowo-1, Bonikowo-2 oraz Kokorzyn-2. Celem pracy było w pierwszej kolejności dokonanie opisu badanych rdzeni, by możliwe było podzielenie ich na odpowiednie facje litologiczne i pobranie takiej ilości próbek do dalszych badań, by wyniki można było uznać za reprezentatywne dla badanych interwałów. Istotą przeprowadzonych badań mikroskopowych i petrofizycznych było w pierwszej kolejności zbadanie właściwości analizowanych skał w obrębie każdej z wydzielonych wcześniej facji, a następnie udzielenie odpowiedzi na pytanie, czy i w jakim stopniu właściwości każdej z wydzielonych facji różnicują się między sobą.

Opróbowanie rdzeni

Badane rdzenie zostały opróbowane odpowiednio w interwałach: 2327÷2411,40 m (Bonikowo-1), 2448,6÷2453,50 m (Bonikowo-2) oraz 2313÷2332,45 m (Kokorzyn-2). Na potrzeby niniejszej pracy pobrano ogółem 58 próbek. Taka ilość próbek, w uznaniu autora, jest wystarczająca, by uzyskane wyniki w sposób rzetelny i reprezentatywny oddawały charakterystykę petrologiczno-petrofizyczną badanych skał. Szczegółowy wykaz pobranych próbek przedstawiono w tabelicy 1.

Zarys geologii obszaru

W czasie permu zachodnia część Polski należała do tzw. Południowego Basenu Permskiego, który uformował się w późnym karbonie-wczesnym permie, jako rezultat subsydencji, wywołanej rozwojem strefy ryftowej [2, w: 6]. Badane w niniejszej pracy rdzenie są utworami permu górnego, zwanego cechsztynem, reprezentowanego w Polsce przez utwory morskie, lagunowe, rzadziej lądowe. Podstawą podziału cechsztynu są zespoły utworów osadzonych w jednym megacyklu chemicznej sedimentacji ewaporatów. Pojedynczy zespół nazywa się cyklotemem solnym [10]. I tak, cechszтын dzieli się na cztery piętra (cyklotemy solne). Są to (od dołu): Werra – Z₁, Stassfurt – Z₂, Leine – Z₃ oraz Aller – Z₄ [8, 9]. Dla celów pracy najważniejszy jest cyklotem Werra, gdyż badane rdzenie reprezentują jego dolną część. Cyklotem, o którym mowa,

dzieli się kolejno na (od dołu): piaskowce białego spagowca lub (na obszarach bardziej wyniesionych) transgresyjny zlepieniec podstawowy, następnie łupek miedzionośny, wapień cechsztyński, anhydryt dolny, sól najstarsza i anhydryt górny [4]. Podział utworów cechsztynu prezentuje rysunek 1. Przedstawione

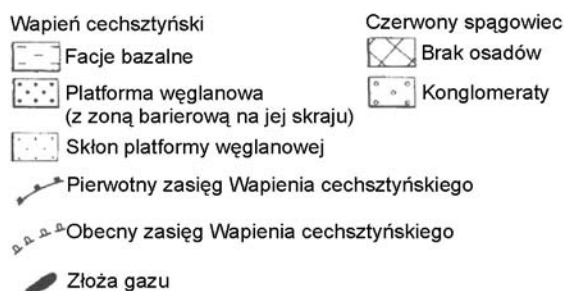
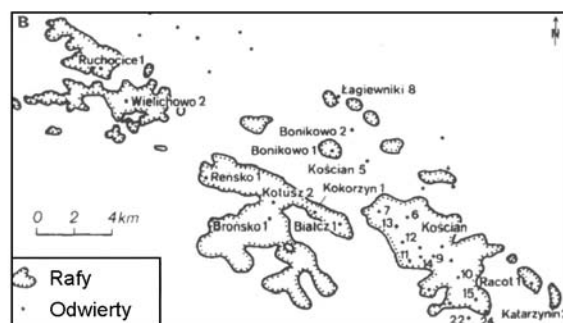
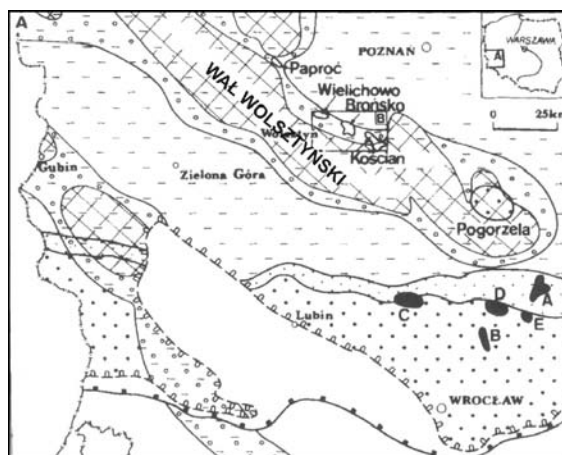
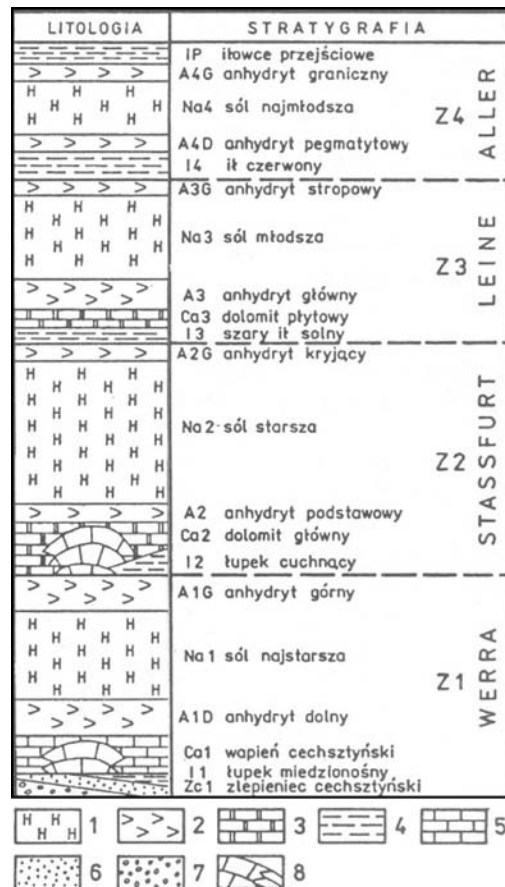
Tablica 1. Wykaz pobranych próbek

Odwiert	Facja	Ilość pobranych próbek
Bonikowo-1	A	7
	B	19
	C	13
	D	6
	E	1
Bonikowo-2	F	3
	G	3
Kokorzyn-2	H	6

wydzielenia opierają się na starej, tradycyjnie używanej dla tego regionu nomenklaturze. Obecnie istnieje również nowy podział, rekomendowany przez Międzynarodową Komisję Stratygraficzną [3]. Znaczna część analizowanych utworów z otworów Bonikowo-1 oraz Kokorzyn-2 należy do utworów rafowych (otwór Bonikowo-2 znajduje się już poza rafą). Rify wapienia cechsztyńskiego opisywane są z różnych części Południowego Basenu Permskiego. Notuje się je także w Niemczech i w Anglii. W Polsce są one ważnymi skałami zbiornikovymi dla złóż gazu ziemnego [1]. Paleogeografię wapienia cechsztyńskiego, wraz z odkrytymi rafami przedstawia rysunek 2.

Rys. 1. Profil litologiczny utworów cechsztynu [4]

- 1 – sole, 2 – anhydryty, 3 – dolomity,
- 4 – łupki, 5 – wapienie, 6 – piaskowce,
- 7 – zlepieńce, 8 – biohermy i rify



Rys. 2. a) Paleogeografia wapienia cechsztyńskiego, b) obszar z odkrytymi rafami [7, 5 w: 1]

Metodyka

Metodyka pomiarów petrofizycznych

Badaniom petrofizycznym poddano fragmenty 58 pobranych próbek. Z każdego pobranego fragmentu rdzenia starano

się uzyskać walec o średnicy 1 cala oraz długości 3÷4 cm, który służył do późniejszych pomiarów współczynnika przepuszczalności, oraz mniejszy fragment, który wykorzystano zarówno do pomiaru gęstości, jak i analiz porozymetrycznych.

Pomiaru gęstości dokonano przy pomocy piknometru helowego AccuPyc 1330. Urządzenie to wykorzystuje doskonałe właściwości helu w penetrowaniu nawet najmniejszych submikroporów. Dzięki temu, podczas pomiaru uzyskuje się dokładną wartość gęstości szkieletowej. Aparat wymaga podania masy próbki z dokładnością do 0,001 g i wykonuje 3 pomiary objętości z dokładnością do 0,0005 cm³, z których następnie wylicza wartość średnią i odchylenie standardowe.

Po wykonaniu analiz gęstości próbki umieszczano w porozymetrze rtęciowym AutoPore 9220. Analiza wyników badań porozymetrycznych polega na wyliczeniu i zinterpretowaniu szeregu wielkości liczonych z krzywych ciśnień kapilarnych oraz na analizie ich kształtu. Z pomiarów porozymetrycznych wyliczyć można szereg parametrów, np.: porowatość, wielkość średniej kapilary czy powierzchnię właściwą. Błąd pomiaru jest zaniebdwany przy błędach statystycznych metody (np. efekt brzegowy jest zdecydowanie większy od potencjalnych błędów związanych z dokładnością pomiarów).

Oznaczanie współczynnika przepuszczalności efektywnej wykonuje się przy użyciu gazu. Jako gazu roboczego użyto azotu. Pomiar polegał na doprowadzeniu do ustalonego, laminarnego przepływu gazu przez badaną próbkę i wyliczeniu współczynnika przepuszczalności przy pomocy równania Darcy'ego. Pomiary współczynnika przepuszczalności wykonane zostały dla tzw. geometrii liniowej, tj. gaz płynie przez próbkę o stałym przekroju i długości.

Niepewność wyznaczenia średnich porowatości i przepuszczalności została oszacowana na podstawie odchylenia standardowego z serii pomiarów.

Badania makroskopowe i mikroskopowe

Badaniom makroskopowym poddano dostępne rdzenie wiertnicze. Sporządzono dokładny opis badanych skał, zwracając szczególną uwagę na zmienności zachodzące w rdzeniach. Starano się pobrać możliwe jak najbardziej reprezentatywne próbki do dalszych badań. Opis rdzeni uzupełniony został przez dokumentację fotograficzną. Zdjęcia wykonano przy użyciu cyfrowego aparatu marki Nikon.

W celu uzyskania dokładniejszych informacji o składzie i wykształceniu analizowanych próbek skalnych wykonano z nich cienkie płytki. Obserwacji dokonano przy użyciu mikroskopu petrologicznego marki Nikon, wyposażonego w cyfrową kamerę połączoną z komputerem. Przy dokonywaniu obserwacji zwracano szczególną uwagę na formę i wzajemne relacje pomiędzy minerałami budującymi analizowane skały, a także – na rodzaj fauny w nich spotykany, jak również na wykształcenie przestrzeni porowej. Dla lepszej prezentacji zarówno porów, jak i mikroszczelin wszystkie próbki nasączono niebieską żywicą. W celu uzupełnienia dokumentacji wynikowej wykonano szereg zdjęć mikroskopowych, przy różnych powiększeniach.

Wszystkie badania (za wyjątkiem makroskopowego opisu rdzeni) przeprowadzone zostały w Zakładzie Geologii i Geochemii Instytutu Nafty i Gazu.

Wyniki

Bonikowo-1

W otworze Bonikowo-1 skały wiekowo odpowiadające utworom od spągu cechsztynu po wapień cechsztyński Ca1 włącznie znajdują się na głębokości od 2327 m do 2411,40 m. W części stropowej badane skały graniczą z anhydrytem dolnym, a w części spągowej z kolei zalegają na utworach karbońskich. Analizowany interwał, ze względu na różnice we właściwościach makroskopowych, podzielono na 5 facji. Wyznaczone facje litologiczne to kolejno (w kierunku od stropu do spągu):

- facja A – szare wapienie charakteryzujące się obecnością laminacji, z drobną fauną, a także niewielkimi szczelinami,
- facja B – szare wapienie z klastami o różnej wielkości (najczęściej kilka cm) i częstymi zaburzeniami w strukturach sedymentacyjnych, drobną fauną, a także niewielkimi gniazdami anhydrytu,

- facja C – jaśniejsze, bardziej porowate wapienie z licznymi, dużymi gniazdami anhydrytu,
- facja D – jasnoszare i jasnobrązowe wapienie z nieznacznie większymi wkładkami ciemniejszych wapieni, o stosunkowo niezaburzonym i jednorodnym wykształceniu, z większymi fragmentami fauny i drobnymi gniazdami anhydrytu,
- facja E – zlepieniec z klastami karbońskimi o różnej wielkości (od mniej niż 1 cm do kilku cm).

Facja A

Utwory odpowiadające facji A mieszczą się w interwale 2327÷2347 m. Górną granicę wyznacza tu spąg anhydrytu dolnego. Dolna granica, ze względu na brak dobrze widocznej różnicy w cechach makroskopowych w porównaniu z najbardziej stropową częścią utworów należących do facji B, ma charakter umowny. Wapienie budujące ten inter-

wał charakteryzują się licznymi laminacjami, szczególnie w górnej oraz dolnej części rdzenia. Widoczne są także szczątki fauny, jak również niewielkie gniazda anhydrytu oraz drobne wypełnione szczeliny. Z badanego interwału pobrano 7 próbek w celu przeprowadzenia dalszych analiz petrofizycznych i mikroskopowych. Wyniki analiz petrofizycznych przedstawia tablica 2.

Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzić można, że analizowane wapienie zbudowane są najczęściej z mikrytowych lub nieco większych kryształów kalcytu. Fauna w stropie badanego interwału nie pojawia się, dopiero w nieco głębszych partiach rdzenia pojawiają się dość liczne kolonie mszywiolów (rysunek 5, fot. 1), rzadziej otwornice i małżoraczki. W stosunkowo małych ilościach występuje anhydryt, jeszcze rzadziej gips. Spotykane są tu dwie różne odmiany porowatości – porowatość międzykrystaliczna oraz porowatość związana z obecnością kolonii mszywiolowych. Porowatość międzykrystaliczna cechuje się dużą zmiennością, nawet w obrębie tej samej próbki. Ponadto często spotyka się system drobnych mikroszczelin.

Wyniki badań petrofizycznych wskazują, że spośród analizowanych próbek największą porowatością całkowitą, wynoszącą 20,29%, charakteryzuje się próbka nr 4, najmniejszą zaś osiąga próbka nr 3, dla której wynosi ona 3,21%. Średnia wartość porowatości całkowitej dla próbek z analizowanej facji wynosi 11,34% ($\sigma = 6,44\%$). W przypadku przepuszczalności, największe wartości notuje się dla próbki nr 2, gdzie osiąga ona 115,232 mD, najmniejsze zaś dla próbki nr 7 – 0,091 mD. Średnia wartość przepuszczalności w analizowanym interwale (wykluczając próbkę nr 2 o skrajnie wysokiej przepuszczalności) wynosi 2,549 mD ($\sigma = 2,948$ mD). Na rysunku 3A przedstawiono wartości porowatości całkowitej i przepuszczalności w odniesieniu do głębokości. Jak widać, parametry te wydają się nie mieć związku ze sobą.

Facja B

Utwory odpowiadające facji B mieszczą się w interwale 2347÷2376,60 m. Górną granicę wyznacza tu umowny spąg utworów facji A, dolna zaś daje się stosunkowo dobrze wyznaczyć i stanowi ona granicę pomiędzy facją B i C. Wapienie budujące ten interwał charakteryzują się obecnością licznych klastów i zaburzeń w strukturach sedymentacyjnych. Spotyka się również mniejsze lub większe gniazda i żyły anhydrytu. Widoczne są także szczątki fauny. Klasty i zaburzenia w strukturach sedymentacyjnych są szczególnie dobrze widoczne w górnej części profilu, podczas gdy w dolnej rdzeń jest bardziej jednorodny.

Z badanego interwału pobrano 19 próbek. Wyniki analiz petrofizycznych przedstawia tablica 2.

Z obserwacji mikroskopowych wynika, że analizowane wapienie zbudowane są najczęściej z mikrytowych lub nieco większych kryształów kalcytu. Fauna, reprezentowana głównie przez kolonie mszywiolów, a także różnego rodzaju otwornice, małżoraczki i krynoidy (rysunek 5, fot. 5), występuje dość powszechnie, aczkolwiek zdarzają się próbki, gdzie albo nie jest ona obecna w ogóle, albo pojawia się w śladowych ilościach. Anhydryt występuje najczęściej w postaci pojedynczych, automorficznych kryształów, z nielicznymi wyjątkami, gdzie notuje się większe ilości tego minerału lub też nie występuje on wcale. Gips jest generalnie rzadko spotykany. Podobnie jak to było dla wapieni z facji A, spotyka się tu dwie różne odmiany porowatości – porowatość międzykrystaliczną oraz porowatość związana z obecnością kolonii mszywiolowych. W niektórych próbkach notuje się także dość dobrze rozwinięty system mikroszczelin.

Na podstawie analizy wyników petrofizycznych stwierdzić można, że spośród badanych próbek największą porowatością całkowitą, wynoszącą 22,14%, charakteryzuje się próbka nr 20, najmniejszą zaś osiąga próbka nr 10, dla której wynosi ona 3,91%. Średnia wartość porowatości całkowitej dla próbek z analizowanej facji wynosi 11,08% ($\sigma = 5,13\%$). W przypadku przepuszczalności, największe wartości notuje się dla próbki nr 21, gdzie osiąga ona 154,923 mD, najmniejsze zaś dla próbki nr 9 – 0,034 mD. Średnia wartość przepuszczalności w analizowanym interwale (wykluczając próbkę nr 21 o skrajnie wysokiej przepuszczalności) wynosi 9,003 mD ($\sigma = 13,438$ mD). Na rysunku 3B przedstawiono wartości porowatości całkowitej i przepuszczalności w odniesieniu do głębokości. Również w przypadku tej facji parametry te wydają się nie mieć związku ze sobą.

Facja C

Utwory odpowiadające facji C mieszczą się w interwale 2376,60÷2398,50 m. Górną granicę wyznacza tu spąg utworów facji B. Granica ta daje się dość dobrze wyznaczyć. Dolną granicę stanowi wkładka ciemniejszych wapieni, którą autor przypisał do utworów facji D. Wapienie budujące ten interwał charakteryzują się generalnie jaśniejszą barwą, wysoką porowatością oraz obecnością dużych gniazd i żył anhydrytu. Miejscami spotyka się również klasty. Z badanego interwału pobrano 13 próbek. Wyniki analiz petrofizycznych przedstawia tablica 2.

Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzić można, iż analizowane wapienie tworzące fację C

są zbudowane najczęściej z drobnych, automorficznych kryształów kalcytu, który tworzyć może również większe, hipautomorficzne kryształy. W górnej oraz dolnej części profilu nie spotyka się fauny, pojawia się ona natomiast, często dość licznie, w części środkowej. Reprezentowana jest ona głównie przez kolonie mszywiolów, a w mniejszym stopniu również przez otwornice, małżoraczki i krynoidy (rysunek 5, fot. 2, 3). W obrębie całego badanego rdzenia spotyka się kryształy anhydrytu (rysunek 5, fot. 6), rzadziej gipsu. Porowatość w górnej części analizowanego interwału jest bardzo wysoka, podczas gdy w częściach leżących niżej nie osiąga już ona tak dobrych wartości. Często notuje się również systemy otwartych mikroszczelin.

Przeprowadzone badania petrofizyczne pozwoliły na stwierdzenie, że spośród analizowanych próbek największą porowatością całkowitą, wynoszącą 33,67%, charakteryzuje się próbka nr 30, najmniejszą zaś osiąga próbka nr 37, gdzie wynosi ona 2,12%. Średnia wartość porowatości całkowitej dla próbek z analizowanej facji wynosi 17,45% ($\sigma = 10,24\%$). W przypadku przepuszczalności, największe wartości notuje się dla próbki nr 27, gdzie osiąga ona 1527,881 mD, najmniejsze zaś dla próbki nr 34, dla której wynosi ona 0,013 mD. Średnia wartość przepuszczalności w analizowanym interwale wynosi 277,543 mD, co nie jest jednak miarodajną wartością. Bardziej rozsądne, ze względu na heterogeniczność rozkładu wartości tego parametru w obrębie badanego interwału, wydaje się podanie dwóch średnich wartości przepuszczalności – dla części górnej, bardziej przepuszczalnej oraz dolnej, gdzie wartości te są wyraźnie niższe. I tak, są to odpowiednio – 841,825 mD ($\sigma = 508,362$ mD) oraz 26,751 mD ($\sigma = 62,960$ mD). Na rysunku 3C przedstawiono wartości porowatości całkowitej i przepuszczalności w odniesieniu do głębokości. Dobrze widoczne są bardzo duże wartości przepuszczalności dla próbek z górnego interwału. Warto zaznaczyć również, iż dla próbek o wartościach porowatości $<10\%$ wartości przepuszczalności nie przekraczają 4 mD (a najczęściej są mniejsze niż 1 mD), podczas gdy próbki o porowatościach $>24\%$ charakteryzują się wartościami przepuszczalności większymi niż 100 mD.

Facja D

Utwory odpowiadające facji D mieszczą się w interwale 2398,50÷2410 m. Górną granicę wyznacza tu spąg utworów facji C, stosunkowo dobrze widoczny. Za dolną granicę przyjęto pojawienie się w rdzeniu zlepieńców z klastami karbońskimi. Analizowany interwał, stosunkowo homogeniczny, zbudowany jest z jasnych wapieni z fauną, szczególnie liczną w środkowej części profilu.

Notuje się pojedyncze wkładki ciemniejszych wapieni/dolomitów oraz drobne gniazda anhydrytu. Z badanego interwału pobrano 6 próbek. Wyniki analiz petrofizycznych przedstawia tablica 2.

W oparciu o badania mikroskopowe stwierdza się, że wapienie w obrębie badanego interwału zbudowane są z mikrytowego kalcytu, tworzącego również większe kryształy. Fauna w analizowanych skałach obecna jest najczęściej w dużych ilościach i reprezentowana przez mszywiolę, krynoidy, małżoraczki, a także przez ramienionogi (rysunek 5, fot. 4). Anhydryt najczęściej nie jest spotykany, choć w pojedynczych próbkach bywa powszechny. Gips zaobserwowano tylko w jednej próbce (próbka 41), w bardzo niewielkich ilościach. Porowatość bardzo często albo jest bliska zero, albo w ogóle się jej nie notuje, aczkolwiek w przypadku kilku próbek jest ona stosunkowo wysoka. Obserwuje się także mikroszczeliny mogące tworzyć większe systemy (rysunek 5, fot. 7).

Spośród analizowanych próbek, na podstawie wyników analiz petrofizycznych, wyróżnić można dwie próbki (nr 41 i 44) charakteryzujące się największymi wartościami porowatości całkowitej, wynoszącej odpowiednio 28,80% oraz 21,23%. Najmniejszą porowatość osiąga tu próbka nr 42 – zaledwie 0,77%, aczkolwiek na tle innych próbek nie jest to wartość drastycznie mała. Średnia porowatość (z wyłączeniem próbek o skrajnie wysokich wartościach tego parametru, tj. próbki nr 41 i 44) jest stosunkowo niska na tle innych facji i wynosi 1,66% ($\sigma = 1,01\%$). Wartości przepuszczalności pozostają tu w korelacji z wartościami porowatości całkowitej i tak – dla wcześniej wyznaczonych próbek (nr 41 i 44) o wysokiej porowatości również wartości przepuszczalności są stosunkowo wysokie i wynoszą odpowiednio 216,114 mD oraz 14,856 mD. Średnia wartość przepuszczalności dla pozostałych próbek jest dużo niższa i wynosi 0,043 mD ($\sigma = 0,045$ mD). Wspomniane zależności nie są związane z głębokością, co potwierdza się na rysunku 3D.

Facja E

Facja E jest ostatnią (licząc od stropu) facją wydzieloną w analizowanym otworze. Rozpoczyna się ona na głębokości 2410 m wraz z pojawieniem się klastów skał karbońskich, które to skały wyznaczają jednocześnie jej spąg (2411,40 m). Skałami tworzącymi tę fację są zlepieńce z bardzo charakterystycznymi, wspomnianymi wcześniej otoczkami skał karbońskich. Wielkość tych otoczek waha się od małych (o wielkości mniejszej niż 1 cm) po kilku-, a nawet kilkunastocentymetrowe. W większości są one bardzo dobrze obtoczone.

Z badanego interwału pobrano 1 próbkę w celu przeprowadzenia dalszych analiz petrofizycznych i mikroskopowych. Z obserwacji mikroskopowych wynika, że badane zlepienie zbudowane są z okruchów kwarcu oraz otoczków kwarcytów i skał wylewnych, spojonych cementem węglanowym (wykształconym w postaci romboedrów) oraz sporadycznie anhydrytem. Gipsu nie zanotowano. Porowatość jest stosunkowo wysoka.

Wyniki analizy porozymetrycznej dla badanej próbki zamieszczono w tablicy 2. Niestety, nie uzyskano w tym przypadku rdzenia o takich parametrach, by pomiar przepuszczalności był miarodajny.

Bonikowo-2

W otworze Bonikowo-2 utwory wiekowo odpowiadające interwałowi od białego spągowca po wapień cechsztyński Ca1 znajdują się na głębokości od 2448,6 m do 2453,50 m. W części stropowej badane skały graniczą z anhydrytem dolnym, w części spągowej z kolei zalegają na utworach czerwonego spągowca. Analizowany interwał podzielono na 2 facje, wyodrębnione na podstawie różnic we właściwościach makroskopowych.

Wydzielone facje to kolejno (licząc od stropu w kierunku spągu): facja F – zbudowana z ciemnych wapieni, oraz facja G – zbudowana ze zlepieńców i piaskowców.

Facja F

Utwory odpowiadające facji F mieszczą się w interwale 2448,6÷2452 m. Górną granicę wyznacza tu spąg anhydrytu podstawowego, z kolei dolną granicę stanowi pojawienie się dużych klastów. Wapienie budujące ten interwał charakteryzują się stosunkowo ciemną barwą. Rdzeń jest homogeniczny. Występujące tu gniazda anhydrytu są niewielkie. Notuje się także drobne, wypełnione szczeliny. Z badanego interwału pobrano 3 próbki. Wyniki analiz petrofizycznych przedstawia tablica 2.

Z obserwacji mikroskopowych wynika, że wapienie, z których składa się analizowany interwał, są zbudowane zarówno z drobnych, jak i nieco większych kryształów kalcytu, często występującego w formie automorficznych romboedrów (nie wyklucza się tu obecności dolomitu). Fauna obecna jest w wyższych partiach profilu i reprezentują ją kolonie mszywiolów oraz małżoraczki, otwornice, a także muszle małży lub ramienionogów. Anhydryt jest tu dość częsty, dużo rzadziej notuje się gips. Wartości porowatości są bliskie zeru. Uzyskane wyniki badań petrofizycznych pozwalają stwierdzić, że analizowane próbki charakteryzują się bardzo niskimi wartościami porowatości, co potwierdza wcześniejsze obserwacje mikroskopowe.

Największą notowaną tu porowatością charakteryzuje się próbka nr 48, gdzie wartość tego parametru wynosi zaledwie 2,71%. Dla reszty próbek nie przekracza ona 1%. Wartości przepuszczalności pozostają tutaj w ścisłym związku z porowatością i nie przekraczają 0,010 mD. Wartości porowatości i przepuszczalności w odniesieniu do głębokości przedstawiono na rysunku 3E.

Facja G

Utwory odpowiadające facji G mieszczą się w interwale 2452÷2453,5 m. Górną granicę stanowi tu spąg utworów węglanowych, dolną zaś wyznacza pojawienie się utworów czerwonego spągowca. Skały budujące ten interwał to zlepienie zbudowane z różnej wielkości otoczków (generalnie nie przekraczających kilku cm), przechodzące w dolnej części rdzenia w szare piaskowce białego spągowca. Z badanego interwału pobrano 3 próbki. Wyniki analiz petrofizycznych przedstawia tablica 2.

Na podstawie badań mikroskopowych stwierdzić można, że górną część badanego interwału stanowią zlepienie zbudowane z otoczków metamorficznych łupków, kwarcytów, skał węglanowych, a także z kwarcu i skaleni. Spoiwo jest ilaste, węglanowe i kwarcowe, a porowatość osiąga wartości praktycznie zbliżone do zerowych. Dolną część interwału tworzą z kolei piaskowce (rysunek 5, fot. 8) zbudowane głównie z ziaren kwarcu i litoklastów (metamorficznych łupków, kwarcytów, skał głębinowych i wylewnych). Obecne są również skalenie. Spoiwo jest ilaste, ilasto-kwarcowe i węglanowe. Notuje się również substancję ilastą typu matriks. Porowatość zmienia się od stosunkowo dobrej po praktycznie zerową.

Badania petrofizyczne wskazują, że maksymalną wartość porowatości, wynoszącą 16,37%, osiąga próbka nr 51, która wykazuje również największą przepuszczalność, wynoszącą 3,014 mD. Pozostałe próbki charakteryzują się niższą porowatością (co jest potwierdzeniem wcześniejszych obserwacji mikroskopowych), osiągającą wartości nie większe niż 3,52%, oraz odpowiednio niższą przepuszczalnością (0,127 mD dla próbki nr 50).

Wartości porowatości i przepuszczalności w odniesieniu do głębokości przedstawiono na rysunku 3E. Wszelkie trendy w zmianach wartości tych parametrów są tu niemożliwe do uchwycenia, ze względu na zbyt mały badany interwał.

Kokorzyn-2

W otworze Kokorzyn-2 rdzeń z utworami wiekowo odpowiadającymi wapieniowi cechsztyńskiemu Ca1 pobrano z głębokości od 2313 m do 2332,45 m. Granica z utworami nadległymi nie została uchwyciona w czasie

rdzeniowania. W części spągowej utwory te zalegają na utworach karbońskich. W analizowanym interwale wyróżniono tylko jedną fację (facja H), reprezentowaną w części górnej przez szarawe, porowate wapienie, które wraz ze wzrostem głębokości dość szybko zmieniają barwę na żółtawą. Powszechnie są tu drobne gniazda anhydrytu. Ślady fauny nie są często notowane.

Z badanego interwału pobrano 6 próbek. Wyniki analiz petrofizycznych przedstawia tabela 2.

Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe pozwalają na stwierdzenie, iż analizowane wapienie zbudowane są z mikrytowego kalcytu, rzadko występującego w formie większych kryształów. Obecna w badanych wapieniach fauna jest najczęściej nieliczna, reprezentowana przez kolonie mszywiółów, otwornice oraz małżoraczki. Powszechnie notuje się kryształy anhydrytu, dużo rzadziej gipsu. Porowatość jest na ogół, z nielicznymi wyjątkami, bardzo niska lub praktycznie zerowa (czego nie potwierdzają analizy porozymetryczne). W niektórych próbkach spotykane są mikroszczeliny.

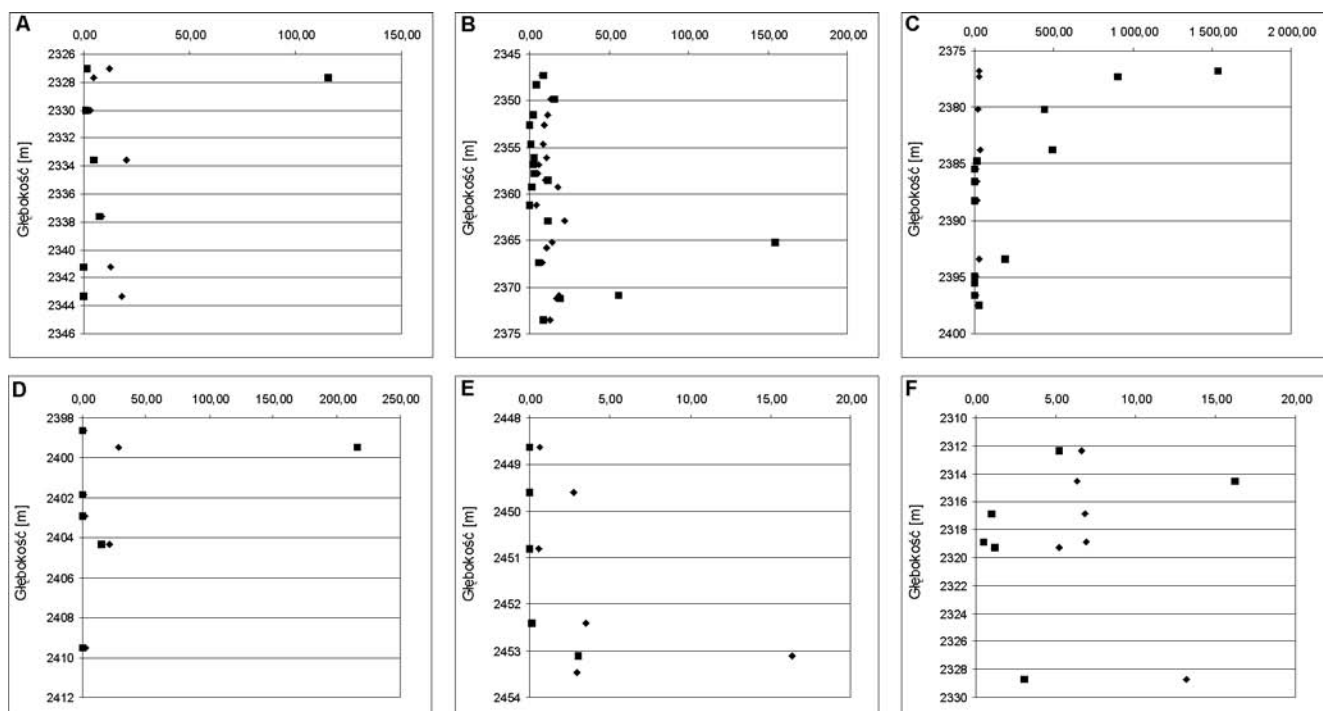
Wyniki analiz petrofizycznych wskazują, że średnia wartość porowatości w analizowanym interwale wynosi 7,69%. Charakterystyczna jest tu próbka nr 58 cechująca się porowatością wynoszącą 13,20%. Wartość ta odbiega od reszty zbadanych próbek o porowatościach

na poziomie 5÷7%. Wartości przepuszczalności nie pozostają tu w korelacji z porowatością i na ogół wynoszą 0,51÷5,24 mD, przy czym jedna próbka (nr 54) charakteryzuje się wyższą wartością tego parametru, wynoszącą 16,179 mD. Zależność porowatości oraz przepuszczalności od głębokości przedstawiona została na rysunku 3F. Choć nie notuje się tu wyraźnych trendów ani zależności zmiany analizowanych parametrów od zmian głębokościowych, to jednak dobrze widoczna jest stosunkowo stała wartość porowatości, niezależna od głębokości (za wyjątkiem próbki nr 58).

Charakterystyka facji pod kątem właściwości petrofizycznych (porowatość całkowita i przepuszczalność dla gazu)

Naturalnym krokiem po przedstawieniu zmienności parametrów porowatości i przepuszczalności w obrębie wcześniej wyznaczonych (na podstawie makroskopowych wydzielen) facji wydaje się zbadanie, czy mają one charakterystyczne dla siebie właściwości petrofizyczne.

Wartości porowatości w wyznaczonych facjach przedstawiono na rysunku 4a, c, e. Przedstawione wykresy pozwalają na dokonanie kilku spostrzeżeń. Przede wszystkim widać (choć nie jest to dość wyraźne), że w obrębie analizowanych facji tylko facje D, F oraz H



Rys. 3. Zależność porowatości całkowitej (romby) oraz przepuszczalności dla gazu (kwadraty) od głębokości w obrębie wyznaczonych facji

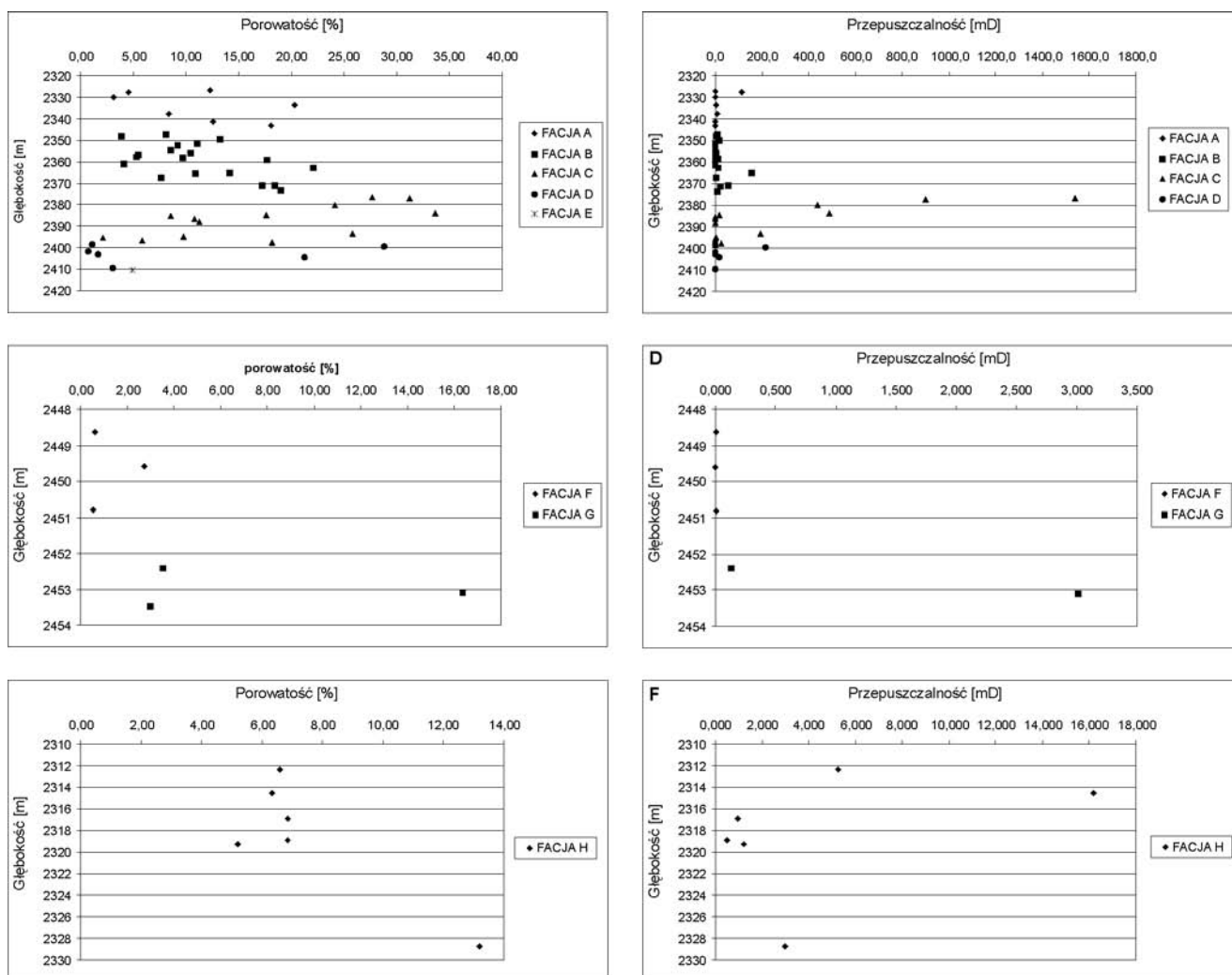
A – Bonikowo-1, facja A; B – Bonikowo-1, facja B; C – Bonikowo-1, facja C; D – Bonikowo-1, facja D; E – Bonikowo-2, facja F; G, F – Kokorzyn-2, facja H

posiadają charakterystyczne dla siebie wartości porowatości. Są to w przypadku facji F i D wartości mniejsze niż 5% (z bardzo nielicznymi odstępstwami) oraz w przypadku facji H wartości najczęściej rzędu 5÷7%. Pozostałe facje wykazują zmienność tego parametru w większych zakresach. Dla facji A, B i G są to zakresy zbliżone (i jednocześnie bardzo szerokie) wynoszące odpowiednio 3÷23% dla facji A i B oraz 3÷17% dla facji G. Facja C charakteryzuje się tutaj zarówno największymi wartościami, jak i największym zakresem zmienności porowatości, wynoszącym 2÷34%.

Wartości przepuszczalności w obrębie badanych facji przedstawiono na rysunku 4b, d, f. Z zamieszczonych wykresów wynika, że wartości przepuszczalności mogą być bardzo zbliżone w obrębie wszystkich analizowanych

interwałów, a co za tym idzie – parametr ten nie zmienia się drastycznie wraz ze zmianą facji. Wyjątkiem jest tu facja C, gdzie przepuszczalność (dla części próbek) wyraźnie różni się od wartości przepuszczalności zmierzonych w obrębie innych facji, osiągając jednocześnie największe wartości sięgające 1538 mD, oraz facja F, osiągająca bardzo niewielkie (<0,010 mD) wartości dla wszystkich przebadanych w jej obrębie próbek.

Z powyższych rozważań wynika, że choć zarówno wartości porowatości, jak i przepuszczalności mogą być w niektórych facjach dość charakterystyczne, to jednak zakresy ich zmienności pokrywają się w takim stopniu, że nie można tu mówić (z nielicznymi wyjątkami), że wydzielone facje charakteryzują się skrajnie różnymi wartościami tych parametrów.



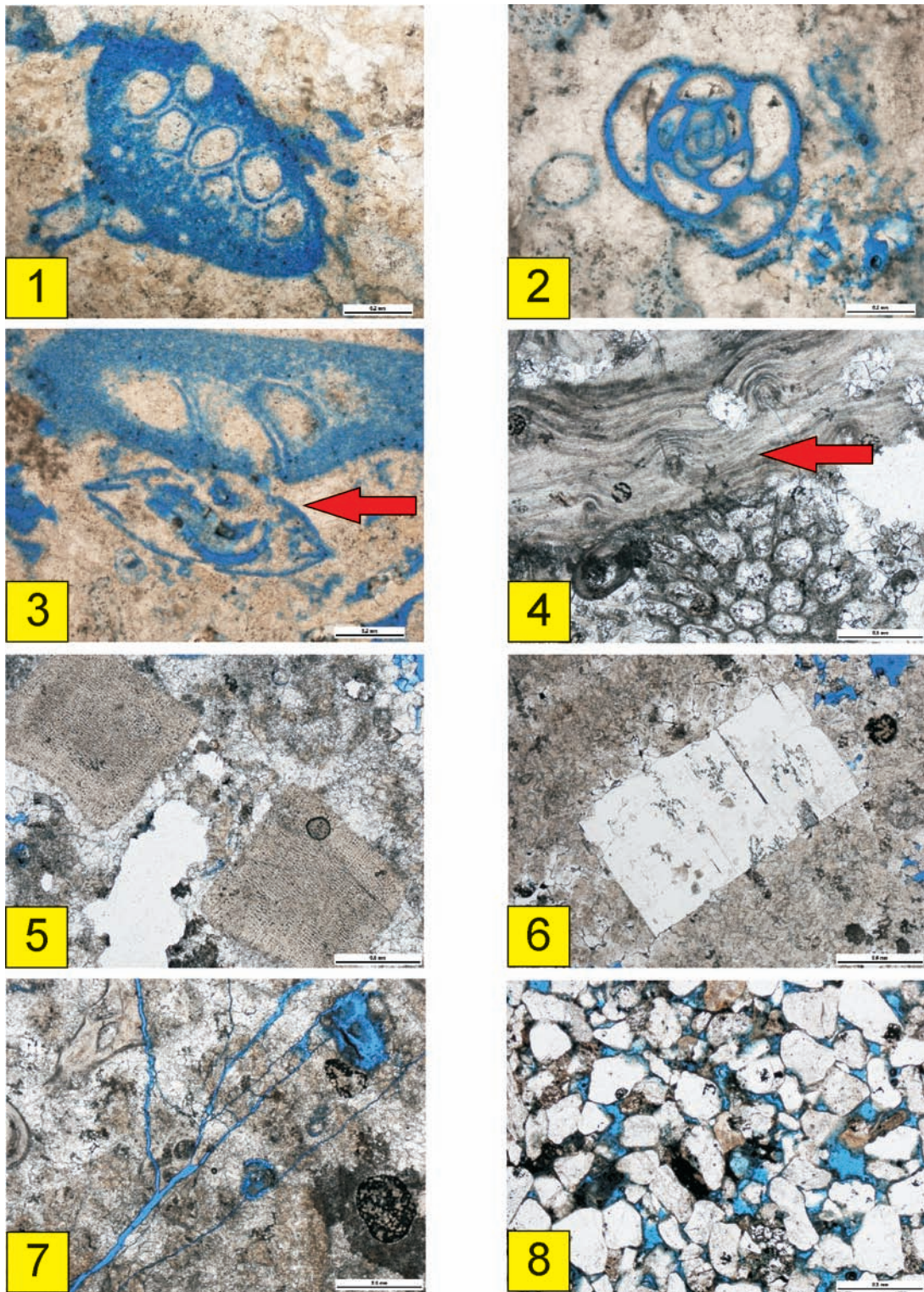
Rys. 4. Porównanie parametrów porowatości (kolumna lewa – a, c, e) i przepuszczalności (kolumna prawa – b, d, f) w wydzielonych facjach

Tablica 2. Wyniki analiz petrofizycznych

Odwiert	Facja	Nr próbki	Głęb. [m]	Gęstość material. [g/cm ³]	Porowat. całkowita [%]	Gęstość szkielec. [g/cm ³]	Gęstość z porozym. [g/cm ³]	Porowat. z porozym. [%]	Średnia kapilarna [μm]	Powierzch. właściw. [m ² /g]	Pory >1 μm [%]	Średnica progowa [μm]	Histereza [%]	Przep. [mD]
BONIKOWO-1	FACJA A	1	2327,05	2,73	12,27	2,70	2,38	11,91	1,34	0,15	86	30	58	1,499
		2	2327,72	2,72	4,58	2,72	2,60	4,58	0,22	0,33	15	2	80	115,232
		3	2330,05	2,71	3,21	2,70	2,61	3,18	0,15	0,32	29	1	78	1,264
		4	2333,55	2,71	20,29	2,71	2,16	20,29	1,53	0,25	90	60	35	4,661
		5	2337,65	2,71	8,35	2,67	2,46	8,03	0,50	0,26	75	30	59	7,536
		6	2341,27	2,71	12,58	2,74	2,38	12,97	0,48	0,45	73	90 ; 0,5	35	0,243
		7	2343,32	2,75	18,09	2,73	2,24	17,74	1,10	0,29	90	20 ; 4	65	0,091
		8	2347,30	2,73	8,11	2,71	2,49	7,95	0,36	0,35	60	60 ; 3	60	8,626
		9	2352,60	2,71	9,26	2,68	2,44	8,99	0,28	0,53	70	60	52	0,034
		10	2348,32	2,73	3,91	2,72	2,61	3,87	0,08	0,78	25	1	82	4,212
		11	2349,85	2,72	13,25	2,68	2,34	12,74	0,54	0,40	79	60 ; 5	39	15,651
	12	2351,52	2,71	11,13	2,73	2,42	11,36	0,50	0,38	70	10	45	1,938	
	13	2354,62	2,74	8,60	2,71	2,48	8,35	0,38	0,36	68	bm	51	0,779	
	14	2356,07	2,75	10,47	2,73	2,45	10,26	0,45	0,37	70	5	78	2,935	
	15	2356,85	2,71	5,46	2,70	2,56	5,41	0,22	0,38	60	5	58	1,850	
	16	2357,80	2,71	5,30	2,70	2,56	5,25	0,17	0,47	43	5	77	2,681	
	17	2358,55	2,71	9,71	2,70	2,44	9,61	0,28	0,55	76	40	41	11,440	
	18	2359,27	2,72	17,71	2,67	2,22	16,87	0,64	0,48	84	70	40	1,583	
	19	2361,22	2,72	4,09	2,69	2,59	3,97	0,15	0,48	31	5	76	0,215	
	20	2362,95	2,71	22,14	2,73	2,11	22,59	1,31	0,33	86	60	33	11,502	
	21	2365,15	2,72	14,13	2,65	2,30	13,21	0,51	0,45	87	bm	38	154,923	
	22	2365,77	2,69	10,94	2,68	2,39	10,83	0,68	0,27	78	10	60		
	23	2367,42	2,71	7,66	2,69	2,49	7,51	0,24	0,50	61	10	73	5,554	
	24	2370,92	2,74	18,50	2,67	2,21	17,29	1,29	0,24	90	25	50	56,248	
	25	2371,30	2,70	17,23	2,63	2,21	16,10	0,60	0,48	85	60	46	19,354	
	26	2373,55	2,71	12,96	2,65	2,33	12,23	0,99	0,21	85	30	53	8,455	
	27	2376,80	2,84	27,66	2,81	2,06	26,85	4,16	0,13	95	90	17	1537,881	
	28	2377,30	2,84	31,21	2,84	1,95	31,21	2,39	0,27	93	90	21	901,928	
	29	2380,20	2,83	24,17	2,78	2,14	23,02	1,74	0,25	93	50	31	438,234	

cd. Tablica 2

Odwiert	Facja	Nr próbki	Głęb. [m]	Gęstość materiał. [g/cm ³]	Porowat. całkowita [%]	Gęstość szkielet. [g/cm ³]	Gęstość z porozym. [g/cm ³]	Porowat. z porozym. [%]	Średnia kapilarna [μm]	Powierzch. właściw. [m ² /g]	Pory >1 μm [%]	Średnica progowa [μm]	Histereza [%]	Przep. [mD]	
BONIKOWO-1	FACJA C	30	2383,75	2,82	33,67	2,80	1,88	33,01	2,91	0,24	94	50	23	489,258	
		31	2384,75	2,76	17,62	2,69	2,24	16,47	1,04	0,28	90	10	40	17,590	
		32	2385,42	2,72	8,58	2,74	2,50	8,76	0,56	0,25	78	90	52	0,878	
		33	2386,52	2,77	10,86	2,73	2,44	10,44	0,41	0,42	84	bm	26	0,054	
		34	2388,20	2,73	11,29	2,70	2,40	10,96	0,24	0,77	66	30	60	0,013	
		35	2393,40	2,73	25,83	2,66	2,02	24,14	1,48	0,32	0,32	93	30	41	192,847
		36	2394,92	2,72	9,80	2,70	2,44	9,61	0,28	0,57	0,57	25	2	70	3,131
		37	2395,50	2,71	2,12	2,68	2,62	2,06	0,08	0,38	0,38	40	1	78	0,156
		38	2396,57	2,74	5,90	2,74	2,58	5,90	0,38	0,24	0,24	68	20	68	0,770
		39	2397,50	2,87	18,18	2,81	2,33	17,15	1,24	0,24	0,24	87	30	62	25,316
BONIKOWO-2	FACJA D	40	2398,62	2,72	1,10	2,73	2,70	1,11	0,05	0,32	52	0,1	60	0,001	
		41	2399,45	2,86	28,80	2,78	2,04	26,67	3,52	0,15	93	40	36	216,114	
		42	2401,85	2,71	0,77	2,70	2,68	0,76	0,07	0,16	0,16	45	0,4	53	0,066
		43	2402,92	2,76	1,71	2,76	2,71	1,71	0,05	0,48	0,48	21	0,30	67	0,096
		44	2404,30	2,70	21,23	2,68	2,12	20,81	1,51	0,26	0,26	90	20	42	14,856
		45	2409,50	2,76	3,06	2,72	2,64	2,94	0,11	0,40	0,40	63	0,30	64	0,010
		46	2410,50	2,64	4,91	2,60	2,48	4,72	0,02	3,41	3,41	10	0,1	88	
		47	2448,62	2,72	0,63	2,69	2,67	0,61	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0,009
BONIKOWO-2	FACJA F	48	2449,60	2,82	2,71	2,80	2,73	2,66	0,05	0,85	12	0,1	74	0,001	
		49	2450,80	2,83	0,53	2,79	2,78	0,51	0,10	0,07	60	0,03	46	0,010	
		50	2452,40	2,69	3,52	2,66	2,57	3,42	0,06	0,92	0,92	27	2	62	0,127
		51	2453,10	2,67	16,37	2,63	2,22	15,74	0,23	1,26	1,26	69	20	61	3,014
		52	2453,47	2,70	2,97	2,67	2,59	2,88	0,05	0,83	0,83	29	0,6	56	
KOKORZYN-2	FACJA H	53	2312,35	2,75	6,59	2,76	2,57	6,66	0,12	0,89	25	4	80	5,243	
		54	2314,52	2,75	6,34	2,75	2,57	6,34	0,19	0,51	63	bm	44	16,179	
		55	2316,87	2,91	6,84	2,88	2,69	6,64	0,51	0,20	0,20	69	6	56	0,969
		56	2318,90	2,90	6,87	2,93	2,72	7,08	0,25	0,43	0,43	37	6	64	0,514
		57	2319,30	2,88	5,20	2,86	2,71	5,10	0,12	0,66	0,66	51	5	70	1,201
		58	2328,70	2,89	13,20	2,82	2,47	12,34	1,06	0,19	0,19	80	8	63	2,998



Rys. 5. Mikrofotografie cienkich płytek

1. Kolonia mszywiolów, pr. 4, głęb. 2333,55 m, nikole II;
2. Otwornica, pr. 36, głęb. 2394,92 m, nikole II;
3. Muszla małżoraczka, pr. 31, głęb. 2384,75 m, nikole II;
4. Muszla ramienionoga, pr. 45, głęb. 2409,50 m, nikole X;
5. Krynoid, pr. 17, głęb. 2343,32 m, nikole II;
6. Tabliczkowy kryształ anhydrytu, pr. 33, głęb. 2386,52 m, nikole II;
7. System mikroszczelin, pr. 45, głęb. 2409,50 m, nikole II;
8. Piaskowiec (widok ogólny, porowatość zaznaczona na niebiesko) pr. 51, głęb. 2453,10 m, nikole II

Podsumowanie

1. Zbadane fragmenty rdzeni odpowiadają wiekowo najmłodszej części cyklotemu Werra – począwszy od klastycznych osadów białego spągowca (w przypadku otworu Bonikowo-2) po wapień cechsztyński Ca1 włącznie. Ze względu na różnice w makroskopowym wykształceniu analizowanych utworów wydzielić można odpowiednio 5 facji litologicznych w obrębie otworu Bonikowo-1, 2 facje w obrębie otworu Bonikowo-2 oraz 1 w obrębie otworu Kokorzyn-2.
2. Analizowane skały to głównie jasne lub nieco ciemniejsze wapienie zbudowane z mikrytowego kalcytu, który tworzyć może również nieco większe kryształy. Często obserwuje się kalcyt wykształcony w postaci automorficznych romboedrów. W analizowanych interwałach spotyka się różnorodną faunę, reprezentowaną najczęściej przez mszywioly. Notuje się również muszle małżoraczków, ramienionogów, a także otwornice i krynoidy. Powszechnie występuje tu anhydryt wykształcony w postaci tabliczek, mogących tworzyć większe skupienia wypełniające pustki. Dużo rzadziej notuje się gips. W analizowanych wapieniach występują dwa rodzaje porowatości: porowatość międzykrystaliczna oraz porowatość wytworzona w wewnętrznych fragmentach fauny. Dodatkowo często notuje się mikroszczeliny, nierzadko łączące się ze sobą w większe systemy. Poza wapieniami w badanych interwałach występują również, w spągowych częściach, utwory klastyczne – zlepienie i piaskowce, zbudowane z ziaren kwarcu, skaleni oraz otoczków skał magmowych i metamorficznych, spójnych cementem węglanowym, kwarcowym, ilastym, a także ilasto-żelazistym matriks.
3. Wyniki badań petrofizycznych analizowano pod kątem dwóch parametrów: porowatości całkowitej oraz przepuszczalności dla gazu (azotu). W obrębie wydzielonych facji nie wykazano trendów zmienności tych parametrów w stosunku do głębokości, co więcej – często wartości tych parametrów nie wykazują związku ze sobą. Każda z wyznaczonych facji charakteryzuje się zakresem zmienności porowatości mogącym sięgać od 2÷3 do kilkudziesięciu procent, a także wartościami przepuszczalności zmiennymi w zakresie od dziesiątych części mD po ok. 1,6 D. Podane zakresy wartości porowatości i przepuszczalności najczęściej pokrywają się (w mniejszym lub większym stopniu) w obrębie wyznaczonych facji, dlatego też nie można przypisać każdej z analizowanych facji charakterystycznych, odrębnych od innych zakresów zmienności (za wyjątkiem utworów stropowej części facji C, dla których osiągnęte, bardzo wysokie wartości przepuszczalności są niepowtarzalne w obrębie żadnej innej facji).

Literatura

- [1] Dyjarczyński K., Górski M., Mamczur S., Peryt T.M.: *Reefs in the basal facies of the zechstein limestone (Upper Permian) of the western Poland: a new gas play*. „Journal of Petroleum Geology” 2001, vol. 24(3), s. 265–285.
- [2] Gast R.: *Rifting im Rotliegend Niedersachsens*. „Geowissenschaften” 1988 (4), s. 115–122.
- [3] Gradstein F., Ogg J., Smith A.: *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge University Press, s. 589, 2004.
- [4] Karnkowski P.: *Złoża gazu ziemnego i ropy naftowej w Polsce*. T. 1, 1993.
- [5] Karnkowski P.: *Oil and Gas Deposit in Poland*. Geosynoptics Society „Geos”1999, Cracow, s. 380.
- [6] Kiersnowski H., Peryt T.M., Buniak A., Mikołajewski Z.: 2010. *From the intra-desert ridges to the marine carbonate island chain: middle to late Permian (Upper Rotliegend-Lower Zechstein) of the Wolsztyn-Pogorzela high, west Poland*. „Geological Journal” 2010 (44), s. 319–335.
- [7] Peryt T.M.: *Sedymentacja i wczesna diagenaza utworów wapienia cechsztyńskiego w Polsce zachodniej*. Prace Inst. Geol., t. 109, 1984, s. 1–80.
- [8] Richter-Bernburg G.: *Stratigraphische Gliederung des deutschen Zechsteins*. Z. Deutsch. Geol. Ges. 195, Hannover 1955.
- [9] Sokołowski J.: *Rola halokinezy w rozwoju osadów mezozoicznych i kenozoicznych struktury Mogilna i synklinorium mogileńsko-lódzkiego*. Prace Inst. Geol., t. 50, 1966.
- [10] Sokołowski S.: *Budowa geologiczna Polski*. 1968.



Mgr Konrad ZIEMIANIN – absolwent Wydziału Biologii i Nauk o Ziemi UJ, kierunek geologia, specjalność mineralogiczno-petrologiczno-geochemiczna. Asystent w Zakładzie Geologii i Geochemii Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie.