

Ewolucja przestrzeni porowej w piaskowcach górnego karbonu i dolnego permu Pomorza Zachodniego

Marta Kuberska*, Aleksandra Kozłowska*, Anna Maliszewska*, Arkadiusz Buniak**



M. Kuberska A. Kozłowska A. Maliszewska A. Buniak

Evolution of pore space in the Upper Carboniferous and Lower Permian sandstones from Western Pomerania. Prz. Geol., 55: 853–860.

S u m m a r y . The paper presents results of detailed research of pore space in the Upper Carboniferous and Lower Permian sandstones and those from the Upper Carboniferous/Lower Permian transitional section. This is followed by a preliminary assessment of reservoir properties against the background of diagenetic processes. The samples were collected from 11 boreholes. The research included standard petrological investigations supported

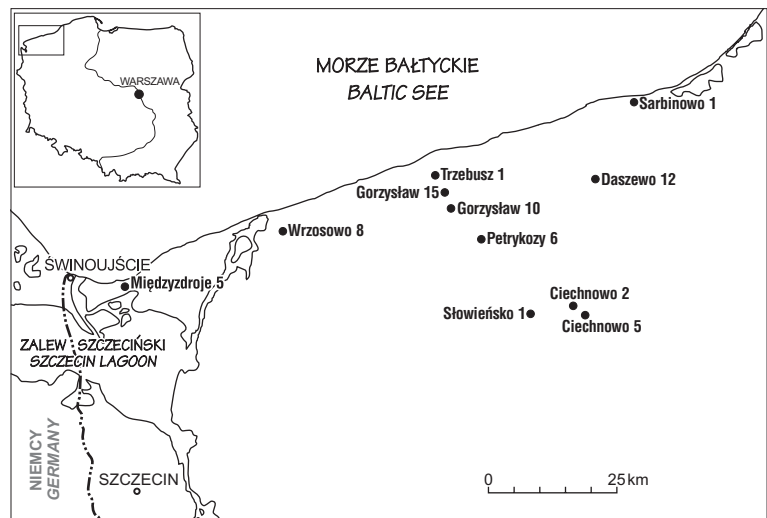
by a digital image analysis of thin sections. Compaction and cementation were the main processes reducing porosity in all the sandstones. Cementation locally reduced primary porosity to approximately 80%. Compaction was much less active. The sandstones are characterized by primary and secondary porosity. Secondary intergranular as well as intercrystalline and intracrystalline porosity developed as a result of diagenetic dissolution of feldspar grains and cements. Variability of petrophysical parameters can be a result, among others, of lithological and facies development. Upper Carboniferous and Upper Carboniferous/Lower Permian sandstones show the best reservoir properties. Lower Permian sandstones are characterized by variable properties.

Key words: Western Pomerania, Upper Carboniferous, Lower Permian, sandstones, pore space

Przedmiotem analizy petrologicznej były piaskowce karbonu górnego i permu dolnego z otworów wiertniczych: Ciechnowo 2 i 5, Daszewo 12, Gorzysław 10 i 15, Międzyzdroje 5, Trzebusz 1, Petrykozy 6, Sarbinowo 1, Słowieńsko 1 i Wrzosowo 8 (ryc. 1).

Na obszarze Pomorza Zachodniego występowanie kompleksów górnokarbońskich jest ograniczone do rejonu Sarbinowa i strefy Kamienia Pomorskiego–Trzebiatowa. Kompleksy te leżą niezgodnie na utworach dewonu lub dolnego karbonu. W ich stropie zalegają osady czerwonego spągowca lub cechsztynu. Miąższość utworów karbonu górnego wzrasta w kierunku zachodnim — od 144,0 m w otworze Sarbinowo 1 do około 633 m w otworze Strzeżewo 1. W utworach karbonu górnego Pomorza Zachodniego wydzielono trzy jednostki litostratygraficzne: formację Wolina, Regi i Dziwny (Żelichowski, 1987). Osady górnokarbońskie reprezentują przejście od warunków morskich (środowiska równi pływowej) do warunków lądowych (środowiska rzeczno-jeziornego). Osady litofacji piaskowcowej, warstwowane przekątnie w dużej skali, reprezentują osady koryt rzecznych.

W utworach czerwonego spągowca dolnego (często identyfikowanego z autunem) wyróżnia się na obszarze Pomorza Zachodniego dwie formacje: Świńca, wydzieloną przez Pokorskiego (1997), której osady są zaliczane do najwyższego karbonu (stefan C) i najniższego czerwonego



Ryc. 1. Lokalizacja otworów wiertniczych
Fig. 1. Location of boreholes

spągowca, oraz wielkopolskiej formacji wulkanogenicznej. W obrębie czerwonego spągowca górnego wydzielono dwie formacje: Drawy i Noteci. Czerwony spągowiec górny jest wykształcony głównie w postaci zlepieńców, piaskowców i mułowców, związanych ze środowiskiem aluwialnym, fluwialnym i plaży, oraz piaskowców, związanych ze środowiskiem eolicznym (Międzyzdroje 5, część profilu).

Osady karbonu górnego i permu dolnego na Pomorzu Zachodnim są od wielu lat przedmiotem zainteresowania geologów (m.in. Ryba, 1979; Dybowa-Jachowicz & Pokorski, 1984; Żelichowski, 1987; Pokorski 1997; Kiersnowski, 1998; Buniak & Solarska, 2004; Kiersnowski & Buniak, 2006) z uwagi na prowadzone i uwieńczone sukcesem poszukiwania złóż węglowodorów. Obserwacje przestrzeni porowej i efektów diagenety w osadach, ważnych z

*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; marta.kuberska@pgi.gov.pl; aleksandra.kozłowska@pgi.gov.pl; anna.maliszewska@pgi.gov.pl

**PGNiG S.A., Departament Poszukiwania Złóż, Oddział w Zielonej Górze, Osrodek w Pile, pl. Staszica 9, 64-920 Piła; arka-dy@geonafta-pila.com.pl

uwagi na rozwój poszukiwań złóż gazu ziemnego, zaowocowały odrębnymi pracami, m.in.: Maliszewskiej i Kuberskiej (1996); Maliszewskiej i in. (1998); Mikołajewskiej i Mikołajewskiego (1999, 2004); Kuberskiej (2004); Kuberskiej i in. (2005); Kozłowskiej (2005) oraz Rusek i in. (2005).

Metodyka badań

Podstawową metodą badawczą była analiza płytek cienkich z zastosowaniem mikroskopów polaryzacyjnych typu *Nikon*. Wybrane próbki skał poddano analizie katodoluminescencyjnej w luminoskopie typu CCL 820 mk³ firmy CITL z Wielkiej Brytanii, a także analizie planimetrycznej metodą punktową z zastosowaniem elektronicznego urządzenia integracyjnego PRIOR Model G. W celu rozpoznania

minerałów węglanowych wykonano analizę barwnikową, stosując płyn Evamy'ego. Skład mineralny związków żelaza w spoiwie skał określano na podstawie ich obserwacji w świetle odbitym. Aby można było wykonać badania porowatości metodą komputerowej analizy obrazu, część płytek została wycięta z próbek skalnych nasączonych niebiesko zabarwioną żywicą. Ten rodzaj analizy przeprowadzono za pomocą mikroskopu polaryzacyjnego *Nikon*, połączonego kamerą z komputerem wyposażonym w program analizy obrazu *Lucia G*. W programie tym wyróżnia się wiele parametrów dokładnie charakteryzujących przestrzeń porową (tab. 1), opisanych w pracach Leśniaka (1999) oraz Kozłowskiej i Kuberskiej (2006). Badania przepuszczalności zostały wykonane w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie.

Tab. 1. Statystyczne wyniki komputerowej analizy obrazu mikroskopowego przestrzeni porowej i porowatości badanych skał
Table 1. Statistical results of computer image analysis of pore space and porosity

Otwór wiertniczy głębokość <i>Borehole depth</i>	Ekwiwal. średnica <i>EqDiameter</i> [mm]	Obwód <i>Perimeter</i> [mm]	Średnia cięciwa <i>Mean Chord</i> [mm]	Długość <i>Length</i> [mm]	Szerokość <i>Width</i> [mm]	Maksymalna średnica Fereta <i>Max Feret</i> [mm]	Minimalna średnica Fereta <i>Min Feret</i> [mm]	Kolistość <i>Circularity</i> [mm]	Wydluzenie <i>Elongation</i> [mm]	Porowatość <i>Porosity</i> [%]
PIASKOWCE KARBONU GÓRNEGO <i>SANDSTONES OF UPPER CARBONIFEROUS</i>										
Gorzysław 10 2896,2	0,00587	0,041522	0,003031	0,01911	0,002361	0,010778	0,0042764	0,75967	3,4172	9,31
	0,01294	0,22237	0,002635	0,11004	0,001781	0,026279	0,014251	0,28762	3,2912	
	0,00204	0,004854	0,002121	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,010394	1	
	0,29112	8,971	0,079073	4,4706	0,056216	0,67224	0,34569	1	46	
Petrykozy 6 3290,1	0,00328	0,01236	0,002498	0,00517	0,002012	0,0046106	0,0025491	0,89704	1,7759	1,31
	0,00291	0,0273	0,000787	0,01309	0,000577	0,0058933	0,0029801	0,20615	1,2326	
	0,00204	0,004854	0,002038	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,028036	1	
	0,13641	1,6107	0,028505	0,78678	0,020128	0,20614	0,12775	1	14	
Sarbinowo 1 2390,1	0,00663	0,042492	0,003496	0,01948	0,002702	0,011101	0,0061442	0,85101	1,6261	13,54
	0,01553	0,1749	0,004197	0,08523	0,002874	0,03222	0,017112	0,26414	0,90962	
	0,00204	0,004854	0,001757	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,021017	1	
	0,25271	5,4157	0,071019	2,6892	0,048398	0,63992	0,3497	1	11	
Trzebusz 1 2884,6	0,00399	0,020343	0,002652	0,00904	0,002116	0,0058669	0,0034109	0,88469	1,628	2,31
	0,00722	0,088275	0,001596	0,04319	0,001068	0,013254	0,0076039	0,2301	0,97742	
	0,00204	0,004854	0,002121	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,029389	1	
	0,20243	2,694	0,037532	1,3227	0,024333	0,30302	0,20693	1	10	
Wrzosowo 8 3192,4	0,00464	0,028878	0,002833	0,01316	0,002244	0,0070566	0,0040933	0,87489	1,623	7,95
	0,01222	0,1932	0,002851	0,09538	0,001936	0,022168	0,012693	0,23874	0,92799	
	0,00204	0,004854	0,00187	0,00181	0,001358	0,00181	0,00181	0,0080646	1	
	0,46174	6,3104	0,10029	3,1432	0,070027	0,73123	0,39479	1	11	
PIASKOWCE Z POGRANICZA KARBONU GÓRNEGO I PERMU DOLNEGO <i>UPPER CARBONIFEROUS/LOWER PERMIAN BOUNDARY SANDSTONES</i>										
Gorzysław 15 2790,6 m	0,00267	0,008797	0,002367	0,00376	0,001881	0,0030599	0,0020543	0,98438	1,4838	7,10
	0,00438	0,094968	0,000703	0,04717	0,000479	0,0073231	0,0047576	0,05174	0,65463	
	0,00204	0,004854	0,002121	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,016032	1	
	0,35311	8,7612	0,03631	4,3581	0,023727	0,6203	0,38396	1	5	
Wrzosowo 8 3145,6 m	0,00756	0,048481	0,004348	0,0222	0,003409	0,011709	0,0066209	0,86345	1,8103	9,26
	0,01983	0,32086	0,005067	0,1585	0,003559	0,035713	0,021639	0,24668	1,2556	
	0,00204	0,004854	0,002121	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,0069976	1	
	0,65058	17,473	0,11203	8,7169	0,072444	1,1914	0,90274	1	17	

średnia, <i>mean</i>	odchylenie standardowe, <i>standard deviation</i>	minimum, <i>minimum</i>	maksimum, <i>maximum</i>
----------------------	---------------------------------------------------	-------------------------	--------------------------

Otwór wiertniczy głębokość <i>Borehole depth</i>	Ekwiwal. średnica <i>EqDiameter</i> [mm]	Obwód <i>Perimeter</i> [mm]	Średnia cięciwa <i>Mean Chord</i> [mm]	Długość <i>Length</i> [mm]	Szerokość <i>Width</i> [mm]	Maksymalna średnica Fereta <i>Max Feret</i> [mm]	Minimalna średnica Fereta <i>Min Feret</i> [mm]	Kolistość <i>Circularity</i> [mm]	Wydłużenie <i>Elongation</i> [mm]	Porowatość <i>Porosity</i> [%]
PIASKOWCE PERMU DOLNEGO <i>LOWER PERMIAN SANDSTONES</i>										
Ciechnowo 1 3849,75 m	0,00294	0,013305	0,002387	0,00598	0,001897	0,0035239	0,0023556	0,9848	1,4416	17,44
	0,0131	0,23098	0,002352	0,11431	0,001541	0,022368	0,013584	0,063459	0,65481	
	0,00204	0,004854	0,002121	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,0161	1	
	0,71267	17,645	0,12083	8,777	0,078891	1,0628	0,76853	1	4	
Ciechnowo 5 3843,6 m	0,00248	0,006883	0,002297	0,00284	0,001837	0,0027607	0,0018973	0,98709	1,4412	5,39
	0,0014	0,013128	0,000419	0,00636	0,000268	0,0027543	0,0013221	0,045354	0,65154	
	0,00204	0,004854	0,002121	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,078057	1	
	0,10362	1,0873	0,024366	0,52765	0,015981	0,18398	0,10863	1	8	
Daszewo 12 3284,1 m	0,00258	0,007599	0,00233	0,0032	0,001838	0,0029852	0,0019142	0,9849	1,5453	4,78
	0,00186	0,029983	0,000467	0,01483	0,000306	0,0040827	0,0019297	0,052606	0,69288	
	0,00204	0,004854	0,002121	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,018523	1	
	0,14608	3,372	0,028574	1,676	0,022205	0,36625	0,1666	1	10	
Międzyzdroje 5 3008,25 m	0,00253	0,006966	0,002325	0,00288	0,001844	0,0028576	0,0018989	0,98671	1,5008	2,26
	0,00084	0,005108	0,000349	0,00244	0,000226	0,0016945	0,00063745	0,042964	0,66127	
	0,00204	0,004854	0,002121	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,1094	1	
	0,0413	0,35721	0,013047	0,17202	0,008784	0,080664	0,038093	1	10	
Sidłowo 1 3952,34	0,00298	0,012015	0,002419	0,00534	0,001898	0,0037696	0,0023331	0,97829	1,5419	12,11
	0,00629	0,080603	0,001383	0,03952	0,000903	0,012996	0,0070274	0,086184	0,70443	
	0,00204	0,004854	0,002121	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,026997	1	
	0,24744	3,4993	0,043171	1,7217	0,027929	0,48301	0,3604	1	5	
Słowińsko 1 3680,2 m	0,00259	0,007773	0,00234	0,00323	0,001881	0,0029243	0,0020307	0,98607	1,3903	5,45
	0,00297	0,0381	0,000767	0,01869	0,000523	0,0058286	0,0025498	0,056599	0,6016	
	0,00204	0,004854	0,002121	0,00181	0,001499	0,00181	0,00181	0,035647	1	
	0,17735	2,9509	0,030576	1,4585	0,020296	0,32333	0,14842	1	4	
średnia, <i>mean</i>		odchylenie standardowe, <i>standard deviation</i>				minimum, <i>minimum</i>		maksimum, <i>maximum</i>		

Badań mikrostruktur skał i morfologii składników mineralnych oraz obserwacji wykształcenia przestrzeni porowych dokonano za pomocą elektronowych mikroskopów skaningowych — typu JSM-35 firmy JEOL oraz typu 1430 firmy LEO — sprzężonych z mikroanalizatorami rentgenowskimi z dyspersją energii, co umożliwiło wykonanie analiz chemicznych w wybranych mikroobszarach.

W celu stwierdzenia obecności w próbkach kaolinitu lub dickitu w Instytucie Nauk Geologicznych na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie wykonano badania minerałów podgrupy kaolinitu, stosując analizę w podczerwieni przy użyciu spektrometru fourierowskiego FTS 135 firmy BIO RAD.

Piaskowce górnego karbonu

Na Pomorzu Zachodnim piaskowce górnego karbonu są reprezentowane przez arenity i waki kwarcowe, najczęściej drobno- i średnioziarniste. Głównym składnikiem szkieletu ziarnowego piaskowców jest kwarc (40–80% obj.). Trzykrotnie przeważają w nim ziarna kwarcu monokrystalicznego nad polikrystalicznym, natomiast zawartość skałeni i litoklastów (głównie okruchów skał wylewnych) nie przekracza zwykle 1% obj. Ponadto w zmiennych ilościach występują blaszki łuszczaków oraz minerały akcesoryczne.

Głównym składnikiem cementu jest kwarc autigeniczny (0–27,65% obj.). Występuje on w postaci regeneracyjnych obwódek na ziarnach kwarcu, zarastając częściowo lub całkowicie przestrzenie porowe. Obserwowano tu dwie generacje cementu: starszą, świecąca brunatno w CL, oraz młodszą, nieluminescencyjną. Do ważnych składników spoiwa należą minerały ilaste, wśród których wyróżniono illit, kaolinit i dickit. Łuszczyki illitu, które otaczają ziarna oraz wypełniają przestrzenie międzyziarnowe, są najczęściej pochodzenia detrytycznego, natomiast autigeniczne krystalizy illitu mają zwykle postacie wydłużonych igiełek i włókien. Kaolinit i dickit (0–8,7% obj.) często tworzą płytki w postaci agregatów książeczkowych i wypełniają przestrzenie międzyziarnowe, a sporadycznie śródziarnowe. Obserwacje mikroskopowe oraz badania spektroskopowe w podczerwieni wskazują na obecność kaolinitu robakowatego oraz miejscami na współwystępowanie kaolinitu blokowego i dickitu blokowego. Na podstawie badań rentgenostrukturalnych piaskowców z otworów Trzebusz 1 i Gorzysław 10 Czerwonka (1992) stwierdziła występowanie minerałów mieszanopakietowych illit/smektyt. Jednak w badanych przez nas próbkach minerałów tych nie udało się wyróżnić. W niewielkiej ilości występują węglany, reprezentowane przez kalcyt i dolomit, które najczęściej tworzą spoiwa typu porowego i rzadziej podstawowego.

Kalcyt, reprezentowany głównie przez odmianę Mn-kalcytu (przeciętnie: 96,9% mol. CaCO_3 , 2,3% mol. MnCO_3 , 0,5% mol. MgCO_3 i 0,3% mol. FeCO_3), miejscami całkowicie wypełnia przestrzenie porowe piaskowców. Dolomit występuje przeważnie w postaci kryształów romboedrycznych lub ich skupień, które zarastają przestrzenie międzyziarnowe. Skład chemiczny dolomitu jest następujący: 59,7–49,4% mol. CaCO_3 , 44,9–38,3% mol. MgCO_3 , 5,7–2,0% mol. MnCO_3 i 0% mol. FeCO_3 . Siarczany — anhydryt i baryt — należą tu do podrzędnych odmian cementów. Hematyt, świecący czerwono w świetle odbitym, i rdzawe wodorotlenki żelaza (0–20,6% obj.) wypełniają często przestrzenie międzyziarnowe oraz impregnują spoiwa ilaste i dolomitowe. Miejscami hematyt tworzy gniazdowe skupienia. W elektronowym mikroskopie skaningowym na ziarnach kwarcu często obserwowano bardzo drobne kulki (0,002–0,004 mm) oraz wydłużone agregaty lub otoczki kryształów hematytu.

Charakterystyka przestrzeni porowej. Badane piaskowce karbońskie charakteryzują się porowością w zakresie od 0 do 18,5% obj. skały, przeciętnie około 4% obj., pomierzoną planimetrycznie w płytkach cienkich impregnowanych niebieską żywicą. Natomiast porowość pomierzona za pomocą komputerowej analizy obrazu wynosi od 1,31 do 14,21% obj. Dominuje porowość pierwotna, a lokalnie występuje porowość wtórna, na przykład w skałiniżowanych skaleniach. Największą porowość piaskowców (powyżej 10%) odnotowano w otworach Sarbinowo 1 i Gorzysław 10, mniejszą (przeciętnie 4%) w otworach Gorzysław 10 i Trzebusz 1, a najmniejszą (ok. 2% obj.) w profilach otworów Wrzosowo 8 i Petrykozy 6.

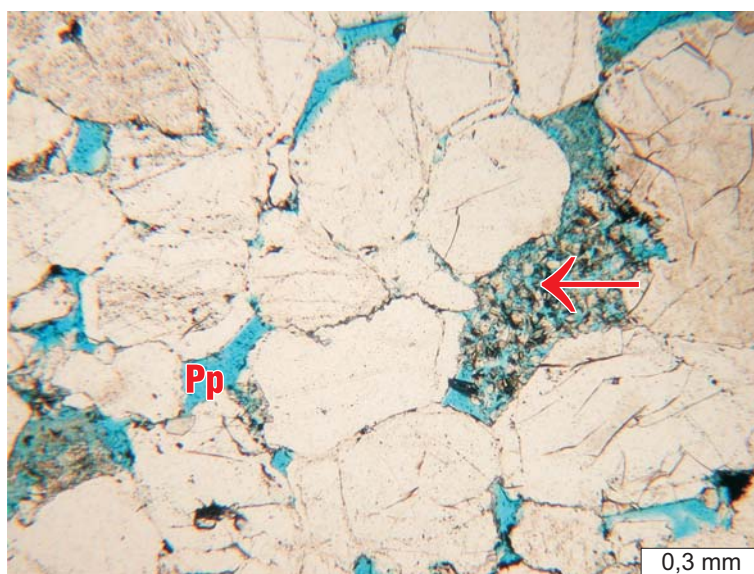
Badania przeprowadzone za pomocą komputerowej analizy obrazu dostarczyły informacji o wielkości, kształcie i rozmieszczeniu analizowanej przestrzeni porowej. W próbkach piaskowców o najmniejszej porowości (Petrykozy 6, gł. 3290,1 m i Trzebusz 1, gł. 2884,6 m) 90% stanowią pory o długości w przedziale 0,001–0,01 mm i prawie 100% o podobnej szerokości. Ponadto w piaskowcach tych pory o długości większej od 0,1 mm stanowią zaledwie około 1%. Natomiast w próbkach piaskowców, które charakteryzują się porowością około 10%, pory o długości 0,001–0,1 mm stanowią około 83%, a o długości ponad 0,1 mm około 3%. Parametry charakteryzujące przestrzeń porową piaskowców w większości analizowanych próbek są porównywalne (tab. 1). Jedyne próbki z otworu Petrykozy 6 (gł. 3290,1 m) oraz Trzebusz 1 (gł. 2884,6 m) wyróżniają się mniejszą wartością ekwiwalentnej średnicy, długością oraz maksymalną i minimalną średnicą Fereta. Próbki piaskowców z tych otworów charakteryzują się porowością około 2% obj., najmniejszą spośród analizowanych próbek skał. Przestrzeń porowa badanych próbek piaskowców jest w miarę równomiernie wykształcona. Ilościowo przeważają w niej makropory (>0,001 mm), które w porównaniu z mikroporami (<0,001 mm) mają większy wpływ na ogólną porowość skały.

W piaskowcach dostrzeżono porowość pierwotną i wtórną (ryc. 2). Porowość wtórna stanowi nieznaczny procent całej porowości

piaskowców. Występowanie jej stwierdzono w próbkach osadów ze wszystkich badanych otworów wiertniczych, najwyraźniej jednak zaznacza się w osadach z dwóch otworów — Gorzysław 10 i Sarbinowo 1, gdzie jest efektem rozpuszczania ziaren litoklastów i skaleni potasowych oraz lokalnie łyszczyków, cementu anhydrytowego i kwarcowego.

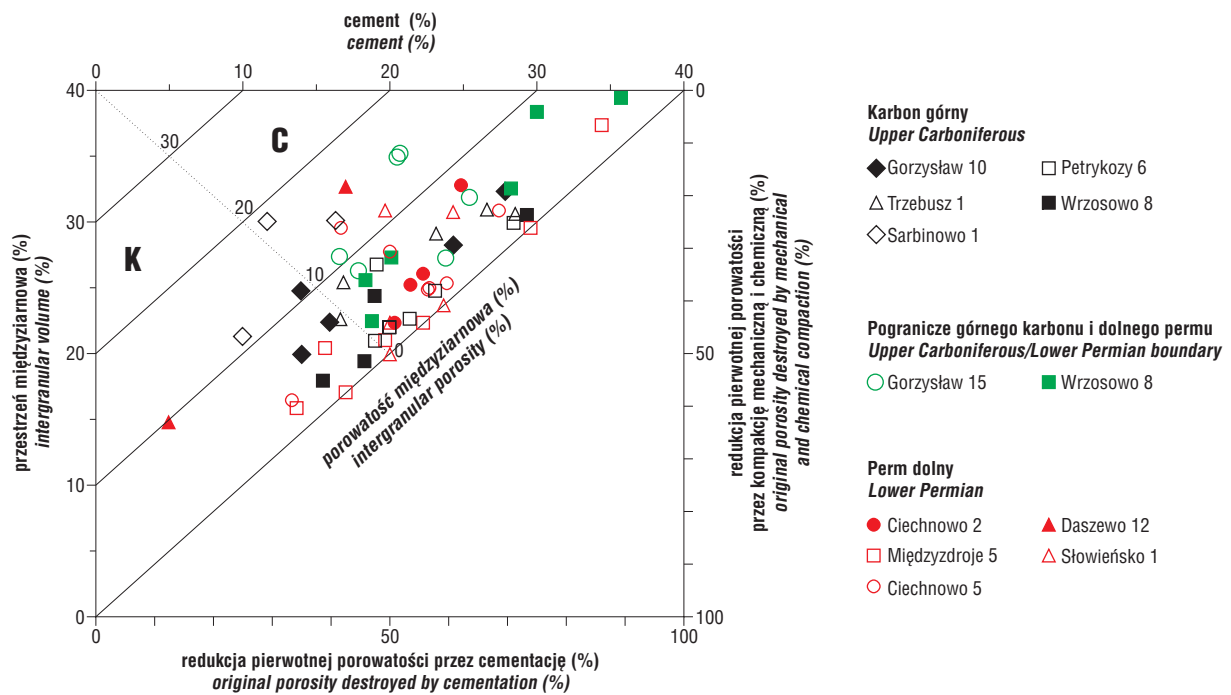
W badanych osadach karbonu wyróżniono efekty działania następujących procesów diagenetycznych: kompaktacji, cementacji, rozpuszczania, zastępowania i przeobrażenia metasomatycznego. Z wymienionych procesów największy wpływ na porowość i przepuszczalność piaskowców miały kompaktacja i cementacja.

Wśród procesów kompaktacji wyróżniono kompaktację mechaniczną i chemiczną. Kompaktacja mechaniczna była intensywniejsza w piaskowcach zawierających okruchy skał i ziarna skaleni oraz spoiwo ilaste typu matriks. Natomiast w piaskowcach, w których dominuje wczesny cement kwarcowy, usztywniający skałę, wpływ kompaktacji był mniejszy i w efekcie została zachowana część porowości pierwotnej. Stosując wzór D.W. Houseknechta (1987) w wybranych próbkach piaskowców określono w procentach redukcję pierwotnej porowości przez kompaktację (ryc. 3), która wynosi 20,5–55,0% (przeciętnie 37%). Skutki kompaktacji chemicznej analizowanych piaskowców są widoczne w postaci kontaktów wkłęsło-wypukłych. Cementacja kwarcem autogenicznym (z wyłączeniem wczesnych cementów obwódkowych), węglanami i siarczanami ujemnie wpływała na porowość i przepuszczalność piaskowców. Wpływ obecności minerałów ilastych na właściwości zbiornikowe piaskowców był zróżnicowany. Między kryształami autogenicznych minerałów ilastych, takich jak kaolinit, dickit czy illit, powszechna jest mikroporowość, jednak ze względu na mikroskopijne rozmiary porów nie ma ona dużego wpływu na porowość całkowitą i przepuszczalność skały. Tworzący się w końcowym etapie dia-



Ryc. 2. Piaskowiec o porowości 12,14%. Widoczna zachowana porowość pierwotna (Pp) i mikroporowość wtórna (strzałka) między kryształami kaolinitu. Otwór Petrykozy 6, gł. 3332,6 m. Zdjęcie spod mikroskopu polaryzacyjnego, bez analizatora. Próbkę nasączono niebieską żywicą

Fig. 2. Sandstone with porosity of 12,14%. Primary porosity (Pp) and secondary microporosity (arrow) between kaolinite crystals is visible. Petrykozy 6 borehole, depth 3332.6 m. Photomicrograph, plane polarized light. Sample impregnated with blue resin



Ryc. 3. Diagram obrazujący wpływ kompaktacji i cementacji na porowatość piaskowców (wg Houseknechta, 1987): C — pole o przewadze cementacji nad kompaktacją; K — pole o przewadze kompaktacji nad cementacją

Fig. 3. Diagram showing the effect of compaction and cementation on porosity of sandstones (after Houseknecht, 1987): C — area with predominance of cementation over compaction; K — area with predominance of compaction over cementation

genezy illit włóknisty częściowo zmniejszył porowatość pierwotną i ograniczył przepuszczalność. Na podstawie wzoru Houseknechta (1987) wyliczono udział pierwotnej porowatości zniszczonej przez cementację. Uzyskane wartości mieszczą się w przedziale 25,8–70,8%, przeciętnie wynoszą 49% (ryc. 3). Zastępowanie ziaren oraz cementów przez węglany, siarczany oraz hematyt należy do powszechnych procesów, mających wpływ na redukcję porowatości piaskowców. Z procesów przeobrażeń metasomatycznych największy wpływ na zmniejszenie przepuszczalności miało tworzenie się włóknistego illitu w miejsce kaolinitu. W pozostałych przypadkach (na przykład kaolinityzacji skaleni i łuszczyków) mogło lokalnie dojść do nieznacznego wzrostu porowatości. Efekty procesu rozpuszczania są obserwowane w postaci wtórnej porowatości w ziarnach (skaleni, łuszczyki, okruchy skał) i cementach (kwarc autigeniczny, kalcyt, lokalnie anhydryt) badanych skał. Wpływ procesów rozpuszczania na porowatość analizowanych piaskowców nie był duży.

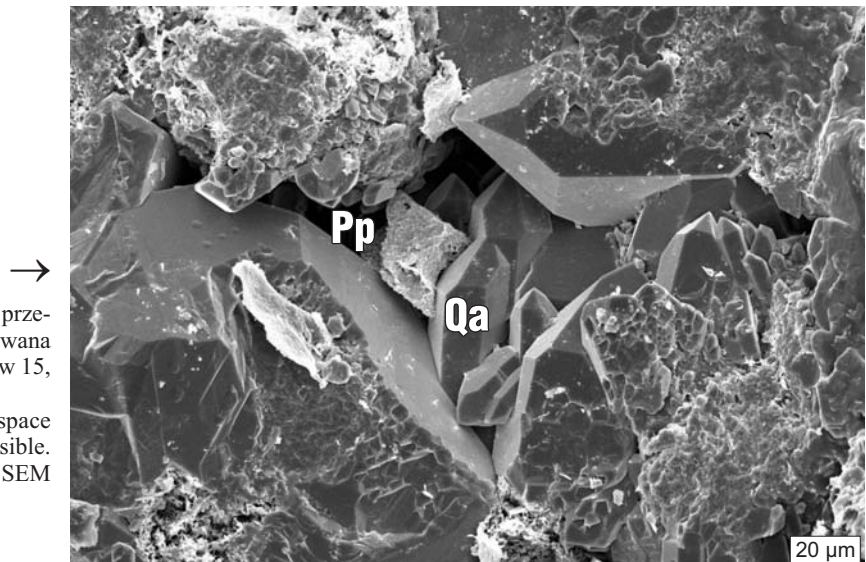
Piaskowce z pogranicza górnego karbonu i dolnego permu

Badane piaskowce reprezentują odmiany różno- i średnioziarniste, rzadziej drobno uziarnione, zaliczane głównie do arenitów kwarcowych (kwarc mono- i polikrystaliczny — 53,0–78,7% obj., skaleni — 0,3–2,0% obj., litoklasty — 0,3–3,3% obj., ponadto łuszczyki i minerały akcesoryczne). Wśród łuszczyków stwierdzono muskowitz i biotyt.

Głównym składnikiem spoiwa tych piaskowców jest kwarc autigeniczny (0,0–18,7% obj.). Najczęściej występuje on w postaci obwódek na ziarnach kwarcu detrytycznego (ryc. 4), tworzy także cement porowy, często powstały z rozrastania się obwódek syntaksjalnych. Obok kwarcu częstym składnikiem spoiwa są minerały ilaste allo- i auti-

geniczne. Wśród autigenicznych minerałów ilastych wyróżniono kaolinit i dickit, chloryty oraz illit włóknisty. Kaolinit najczęściej występuje w formie płytkowych skupień wypełniających przestrzenie porowe. Może tworzyć robakowate formy grubokrystaliczne lub drobniej wykrytalizowane skupienia zwane blokowymi. Chloryty tworzą w omawianych piaskowcach agregatowe skupienia drobnych blaszek, rzadziej natomiast występują w postaci obwódek na ziarnach detrytycznych. Lokalnie zanotowano autigeniczny illit, który występuje w formie listewek lub włókien zarastających przestrzeni porową. Współwystępuje on z autigenicznym kwarcem, kaolinitem i chlorytami. Minerale węglanowe w piaskowcach formacji Dziwny i Świńca występują na ogół w niewielkich ilościach i bardzo rzadko. Jedynie piaskowce z otworu wiertniczego Wrzosowo 8 są wyraźnie wzbogacone w węglany, których zawartość dochodzi nawet do 19% obj. W próbkach z otworu Wrzosowo 8 węglany są reprezentowane przez kalcyt (głównie Mn-kalcyt o żółtej i żółtopomarańczowej luminescencji w CL), który tworzy formy anhedralne, wypełniając przestrzenie porowe. Wśród minerałów siarczanych niewielkie ilości anhydrytu (do 1% obj.) w postaci drobnych tabliczek odnotowano jedynie w dwóch próbkach z otworu wiertniczego Gorzysław 15. Związki żelaza, reprezentowane w badanych piaskowcach przez hematyt, występują dosyć rzadko.

Charakterystyka przestrzeni porowej. W wytypowanych czterech próbkach piaskowców porowatość mierzona metodą komputerowej analizy obrazu wahała się od 4,91% do 9,26%, natomiast pomierzona planimetrycznie — od 5,1% do 14,8%. W piaskowcach z pogranicza górnego karbonu i dolnego permu zachowała się porowatość pierwotna, często jednak mamy również do czynienia z



Ryc. 4. Kwarc autigeniczny (Qa) zarastający przestrzeń porową piaskowca. Widoczna zachowana porowatość pierwotna (Pp). Otwór Gorzysław 15, głęb. 2815,7 m; SEM

Fig. 4. Authigenic quartz (Qa) filling pore space of sandstone. Primary porosity (Pp) is visible. Gorzysław 15 borehole, depth 2815.7 m; SEM image

wtórnią porowatością międzykrystaliczną w kaolinicie. Przepuszczalność osadów jest mała.

W celu matematycznego opisanía przestrzeni porowych w badanych piaskowcach pomierzono wymiary poszczególnych porów (tab. 1). Pod względem długości porów najbardziej zróżnicowane są piaskowce z otworu wiertniczego Wrzosowo 8. Przeważają pory o długości 0,01 mm, jednak tych o długości od 0,02 mm do 0,04 mm jest nawet powyżej 15%. Pozostałych, o długości większej niż 0,04 mm, może być nieco powyżej 5%. W piaskowcach z otworu wiertniczego Gorzysław 15 około 99% porów ma długość 0,01 mm. Szerokość porów we wszystkich próbkach była mniejsza od 0,01 mm. Przestrzeń porowa nie jest wykształcona równomiernie. Ilościowo przeważają pory o długości i szerokości 0,01 mm, jednak wydaje się, że większe decydują o podwyższonej porowatości. Obserwowana przestrzeń porowa jest izolowana. Pojedyncze pory bardzo często nie mają połączeń, zatem przepływy płynów złożowych są utrudnione. Potwierdzają to wyniki badań przepuszczalności tych skał (poniżej 0,1 mdcy).

Główne procesy, jakie zachodziły w badanych piaskowcach, są takie same jak w piaskowcach karbonu górnego, a ich intensywność działania wpływała na właściwości zbiornikowe skał w różnym stopniu.

W celu oszacowania wielkości redukcji porowatości pierwotnej w wyniku kompaktacji mechanicznej badanych piaskowców, posłużono się wzorami i wykresem zaproponowanym przez Houseknechta (1987). Z obliczeń wynika, że kompaktacja ograniczyła pierwotną porowatość o 0,5% do 43,7% (ryc. 3). Skutkiem jej działania są odkształcenia lamin ilastych, blaszek łuszczyków oraz wzrost upakowania materiału detrytycznego. Efekty działania kompaktacji chemicznej, widoczne w postaci kontaktów wklęsło-wypukłych lub zazębiających się, są bardzo rzadko obserwowane.

Intensywność działania kompaktacji mechanicznej w znacznym stopniu hamowała wczesna cementacja, do której należy zaliczyć formowanie obwódek ilasto-żelazistych i kwarcowych, działających usztywniająco na osad i chroniących porowatość pierwotną. Cementy porowe — kwarcowe i węglanowe — wpływały niekorzystnie na zachowanie tej porowatości, przy czym często obserwowano, że ich krystalizacja była kilkietapowa. W obecności spoiw ilas-

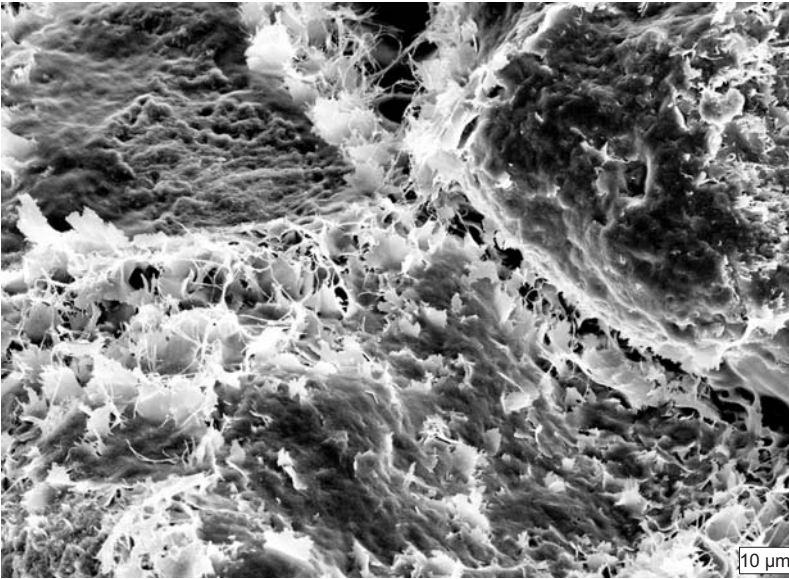
tych (głównie spoiwa kaolinitowego) obserwuje się zachowanie porowatości międzykrystalicznej. Zmniejszenie porowatości pierwotnej wskutek cementacji wynosiło w badanych piaskowcach od 41,7% do 87,5% (ryc. 3). Wynika z tego, iż głównie cementacja była odpowiedzialna za ograniczenie porowatości osadów. Z procesem cementacji wiąże się zastępowanie diagenetyczne, działające destruktywnie na zachowanie porowatości.

Efekty przeobrażenia diagenetycznego dotyczą przede wszystkim ziaren skaleni i łuszczyków, w wyniku czego powstał kaolinit, chloryt bądź illit. Transformacja elementów szkieletu ziarnowego powodowała jego rozluźnienie, a powstawanie agregatów ilastych przyczyniało się do utworzenia mikroporów międzykrystalicznych. Powstawanie włóknistego illitu, jako końcowego produktu przeobrażenia (np. kaolinitu), niszczyło zdolności filtracyjne skał. Proces rozpuszczania ziaren kwarcu, skaleni, okruchów skał lub składników cementów jest odpowiedzialny za powstanie wtórnej porowatości. W piaskowcach pogranicza karbonu i czerwonego spągowca proces ten miał minimalne znaczenie, a efekty jego działania obserwuje się sporadycznie.

Piaskowce dolnego permu

Wyróżniono wśród nich piaskowce drobno- i średnioziarniste, miejscami gruboziarniste lub zlepieńcowate (np. Międzyzdroje 5), reprezentowane głównie przez arenity (sporadycznie waki) kwarcowe, sublityczne i lityczne. W skład materiału detrytycznego wchodzi: kwarc monokrystaliczny (34,0–65,7% obj.), kwarc polikrystaliczny (3,0–22,3% obj.), skalenie (ok. 5% obj.) i litoklasty, reprezentowane przez okruchy skał wylewnych, osadowych, rzadziej fragmenty granitoidów lub skał metamorficznych, ponadto nieliczne blaszki łuszczyków lub minerały ciężkie.

Spoivo piaskowców czerwonego spągowca charakteryzuje się zróżnicowanym składem mineralnym. Najliczniej występują cementy węglanowe, a wśród nich dominuje kalcyt. Wyróżniono Mn-kalcyt, Mn/Fe-kalcyt, Fe-kalcyt oraz „czysty” kalcyt nie zawierający domieszek i nie wykazujący luminescencji w CL. Znaczenie rzadziej (głównie w otworze wiertniczym Daszewo 12) notowano dolomit, Fe-dolomit lub ankeryt. Ten ostatni często koncentruje się w przykrawędziowych strefach romboedrów dolomito-



Ryc. 5. Włóknisty illit zarastający przestrzeń porową piaskowca. Otwór Słowieńsko 1, głęb. 3686,8 m; SEM

Fig. 5. Fibrous illite filling pore space of sandstone. Słowieńsko 1 borehole, depth 3686.8 m; SEM image

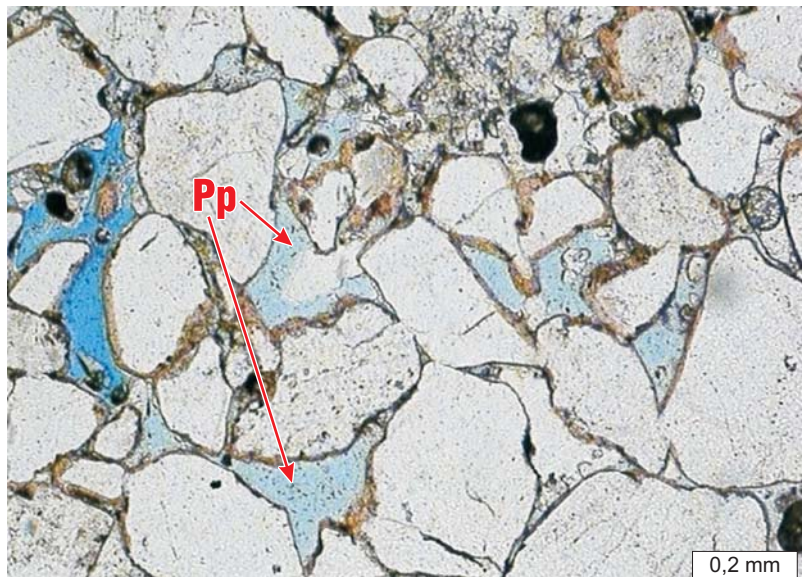
wych. Spoiwo węglanowe jest typu porowego. Kwarc autigeniczny (0–13,7% obj.) występuje w postaci obwódek regeneracyjnych na ziarnach kwarcu detrytycznego lub jako wypełnienie przestrzeni porowych. Kolejny składnik omawianych spoiw stanowią minerały ilaste allo- i autigeniczne. Wśród minerałów autigenicznych wyróżniono kaolinit w postaci drobnych robakowatych skupień, blaszki chlorytów żelazistych i żelazisto-magnezowych oraz illit w postaci włókien (ryc. 5). Siarczany są obserwowane sporadycznie (głównie tabliczki anhydrytu). Związki żelaza, występujące w postaci drobnokrystalicznego hematytu i goethytu, barwią piaskowce na kolor brunatnoczerwony. W przestrzeniach międzyziarnowych piaskowców (ok. 4% obj.) z otworu Ciechnowo 2 zauważono czarnobrunatne skupienia i przemy. Są to zapewne ślady węglowodorów.

Charakterystyka przestrzeni porowej.

Piaskowce czerwonego spągowca wykazują znaczne zróżnicowanie porowatości i przepuszczalności. Dobre lub bardzo dobre właściwości zbiornikowe mają tylko niektóre poziomy piaszczyste, na przykład w profilach otworów wiertniczych Ciechnowo 1 i Sidłowo 1, w których odkryto złoża gazu ziemnego (Buniak & Solarska, 2004). Zróżnicowanie podstawowych parametrów przestrzeni porowej jest konsekwencją wykształcenia litologiczno-facjalnego. Obserwuje się to na przykładzie utworów nawierconych w otworze Międzyzdroje 5, gdzie zdaniem Mikołajewskiej i Mikołajewskiego (2004) utwory aluwialne charakteryzują się słabymi właściwościami petrofizycznymi (porowatość nie przekracza 10%, a przepuszczalność 1 mdcy), natomiast piaskowce eoliczne formacji drawskiej dobrymi (porowatość przekracza 25%, a przepuszczalność oscyluje od 1 do 1000 mdcy).

Na podstawie parametrów uzyskanych dzięki zastosowaniu metody komputerowej analizy obrazu można ocenić, że przestrzeń porowa piaskowców w profilach czerwonego spągowca jest różnorodnie wykształcona (tab. 1), chociaż w porównaniu z piaskowcami pogranicza karbonu i permu bardziej jednolicie. W piaskowcach czerwonego spągowca obserwuje się znikomy udział porów o wielkości powyżej 0,02 mm, z wyjątkiem piaskowców z otworu Ciechnowo 5 (głęb. 3843,6 m). Dominują pory o długości i szerokości 0,01 mm (około 99%). Przeważnie są one izometryczne.

W badanych piaskowcach czerwonego spągowca można stwierdzić zarówno porowatość pierwotną (ryc. 6), jak i wtórną, powstałą na skutek działania różnorodnych procesów diagenetycznych. Wśród nich najdłużej trwającym procesem była kompaktacja mechaniczna, a jej działanie objawia się ścisłym upakowaniem szkieletu ziarnowego, odkształceniem elementów plastycz-



Ryc. 6. Piaskowiec o porowatości 5,39%. Widoczna zachowana porowatość pierwotna (Pp). Otwór Ciechnowo 5, głęb. 3843,6 m. Zdjęcia z mikroskopu polaryzacyjnego, bez analizatora. Próbkę nasączoną niebieską żywicą

Fig. 6. Sandstone with porosity of 5.39%. Primary porosity (Pp) is visible. Ciechnowo 5 borehole, depth 3843.6 m. Photomicrograph, plane polarized light. Sample impregnated with blue resin

nych lub spękaniem składników ziarnowych. Ograniczenie pierwotnej porowatości przez kompaktację waha się w badanych piaskowcach od 6,8 do 65,0% (ryc. 3). Proces ten wydatnie zmniejszył porowatość osadów z otworu wiertniczego Międzyzdroje 5 oraz niektórych warstw z otworów Ciechnowo 5 i Daszewo 12. Ograniczenie porowatości przez kompaktację wyniosło średnio około 34%. Podobne ograniczające działanie miała cementacja, a także związane z nią zastępowanie diagenetyczne. Procesy cementacyjne zachodziły w piaskowcach czerwonego spągowca kilku-etapowo, powodując stopniowe wypełnianie wolnych przestrzeni międzyziarnowych. Cementacja ograniczyła w tych osadach porowatość pierwotną o 12,3% do 86,0%

(ryc. 3), a zatem w dużo większym stopniu niż kompaktacja. Rozpuszczanie diagenetyczne w badanych skałach miało zasadnicze znaczenie dla tworzenia wtórnej porowatości. Poddawane temu procesowi były ziarna detrytyczne (kwarc, skaleni), a także składniki cementów (węglany, kwarc autigeniczny). Nieco mniej korzystne dla rozwoju cech zbiornikowych było metasomatyczne przeobrażanie składników mineralnych (transformacje szkliwa wulkanicznego, łuszczaków, minerałów maficznych oraz skaleni). Powstawała w ten sposób mikroporowatość międzykrystaliczna. Ograniczenie lub redukcja przepuszczalności było zależne od natury produktów przeobrażeń.

Podsumowanie i wnioski

□ Większość piaskowców karbonu górnego i strefy przygranicznej karbonu i permu jest zaliczana do arenitów i wak kwarcowych. Piaskowce dolnego permu są wzbogacone w okruchy lityczne (głównie pochodzenia wulkanicznego) i z tego względu najczęściej reprezentują odmiany sublityczne i lityczne.

□ We wszystkich osadach dobre i bardzo dobre właściwości zbiornikowe mają tylko niektóre poziomy piaskowce.

□ Głównymi procesami, które miały wpływ na ograniczenie porowatości wszystkich badanych piaskowców, były kompaktacja i cementacja. Cementacja ograniczyła porowatość pierwotną niektórych osadów o około 80%. Kompaktacja była znacznie mniej aktywna, choć niekiedy wyraźnie przeważała nad cementacją (m.in. w osadach czerwonego spągowca, otwór Międzyzdroje 5, ryc. 3).

□ Piaskowce karbonu górnego charakteryzują się porowatością od < 1 do około 18% obj., piaskowce z pogranicza karbonu i permu — od około 4 do 15%, a piaskowce dolnego permu — od 2 do około 17%. W piaskowcach karbonu górnego stwierdzono głównie pierwotną porowatość międzyziarnową i wtórną porowatość międzykrystaliczną, między krystalitami autigenicznych minerałów ilastych. W piaskowcach z pogranicza karbonu i permu porowatość pierwotna zachowała się nieco gorzej w niż piaskowcach karbonu górnego i mają one mniejszą wtórną porowatość międzykrystaliczną. Natomiast piaskowce dolnego permu mają bardzo niewielką porowatość pierwotną (z wyjątkiem obszarów złożowych). Najczęściej dostrzegano śródziarnową i międzykrystaliczną porowatość wtórną, utworzoną wskutek rozpuszczania ziaren skaleni i cementów węglanowych.

□ W badanych piaskowcach przestrzeń porowa jest zazwyczaj makroporowa i wykształcona przeważnie izometrycznie. Największe zróżnicowanie wielkości porów obserwuje się w osadach z pogranicza karbonu i permu. Obecność porów o największych rozmiarach decyduje o podwyższonej porowatości.

□ Zróżnicowanie parametrów petrofizycznych może być między innymi konsekwencją wykształcenia litologiczno-facjalnego. Najlepsze parametry zbiornikowe mają piaskowce karbonu górnego i z pogranicza karbonu i permu. Piaskowce dolnego permu charakteryzują się bardzo

zróżnicowanymi właściwościami — w strefach złożowych są one bardzo dobre (Międzyzdroje, Ciechnowo), a poza nimi słabsze, np. w rejonie Daszewa.

Literatura

- BUNIAK A. & SOLARSKA A. 2004 — Występowanie złóż węglowodorów a wykształcenie litologiczno-facjalne utworów górnego czerwonego spągowca na obszarze Pomorza Zachodniego (na przykładzie złóż Ciechnowo i Sławoborze). [W:] Konferencja naukowo-techniczna: Basen Permski Niżu Polskiego — Czerwony Spągowiec. Budowa i potencjał zasobowy, Piła, 23.04.2004: 113–118.
- CZERWONKA A. 1992 — Wybrane zagadnienia diagenety osadów karbonu górnego Pomorza Zachodniego. Nafta-Gaz, 5/6: 140–153.
- DYBOVA-JACHOWICZ S. & POKORSKI J. 1984 — Stratygrafia karbonu i dolnego permu w otworze wiertniczym Strzeżewo 1. Kwart. Geol. 28: 589–616.
- HOUSEKNECHT D.W. 1987 — Assessing the relative importance of compaction processes and cementation reduction of porosity in sandstones. AAPG Bull., 71: 633–642.
- KIERSNOWSKI H. 1998 — Architektura depozycyjna basenu czerwonego spągowca w Polsce. [W:] Analiza basenów sedymentacyjnych Niżu Polskiego. Pr. Państw. Inst. Geol., 165: 113–128.
- KIERSNOWSKI H. & BUNIAK A. 2006 — Evolution of the Rotliegend Basin of northwestern Poland. Geol. Quart., 50: 119–138.
- KOZŁOWSKA A. 2005 — Wpływ kompaktacji i cementacji na porowatość piaskowców karbonu górnego w strefie Kołobrzeg–Międzyzdroje. Prz. Geol., 53: 259.
- KOZŁOWSKA A. & KUBERSKA M. 2006 — Zastosowanie metody komputerowego przetwarzania i analizy obrazu w mikroskopowej analizie skał. Prz. Geol., 54: 671–673.
- KUBERSKA M. 2004 — Diagenety osadów czerwonego spągowca w strefie Szczecinek–Bydgoszcz (Pomorze Zachodnie). Biul. Państw. Inst. Geol., 411: 87–168.
- KUBERSKA M., KOZŁOWSKA A. & MALISZEWSKA A. 2005 — Diagenesis of the Upper Carboniferous and the Lower Permian fluvial sandstones of Pomerania area (Poland); Int. Conf. Sediment 2005, Gwatt, Szwajcaria; Abstracts: 93.
- LEŚNIAK G. 1999 — Zastosowanie komputerowej analizy obrazu w badaniach petrofizycznych. Prz. Geol., 47: 644–651.
- MALISZEWSKA A. & KUBERSKA M. 1996 — Cementacja piaskowców czerwonego spągowca a ich porowatość i przepuszczalność. Nafta-Gaz, 9: 365–373.
- MALISZEWSKA A., KUBERSKA M., SUCH P. & LEŚNIAK G. 1998 — Ewolucja przestrzeni porowej utworów czerwonego spągowca. Pr. Państw. Inst. Geol., 165: 177–94.
- MIKOŁAJEWSKA A. & MIKOŁAJEWSKI Z. 1999 — Środowiska depozycyjne, petrografia, diagenety oraz właściwości zbiornikowe osadów górnego czerwonego spągowca w rejonie złoża gazu ziemnego Międzyzdroje — W. [W:] Konferencja naukowo-techniczna: Basen Permski Niżu Polskiego — Czerwony Spągowiec. Budowa i potencjał zasobowy, Piła 23.04.2004; abstrakty: 153–154.
- POKORSKI J. 1997 — Perm dolny; sedymentacja, paleogeografia, paleotektonika. [W:] Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce, S. Marek & M. Pajchłowa red., Pr. Państw. Inst. Geol., 153: 45–62.
- RUSEK M., BUNIAK A., SOLARSKA A., KOWALCZAK M. & GAUPP R. 2005 — Piaskowce czerwonego spągowca i ich diagenety na obszarze Wału Pomorskiego (złóżo Ciechnowo). Prz. Geol., 53: 340–341.
- RYBA J. 1979 — Karbon górny w rejonie Kamienia Pomorskiego w porównaniu z Rugią i Hiddensee. [W:] Perspektywy poszukiwań złóż węglowodorów w osadach podcechsztyńskich ze szczególnym uwzględnieniem karbonu w północno-zachodniej Polsce. Konferencja naukowo-techniczna. Tuczno: 112–123.
- ŻELICHOWSKI A.M. 1987 — Karbon. Paleozoik podpermski. [W:] Budowa geologiczna wału pomorskiego i jego podłoża, A. Raczyńska red., Pr. Inst. Geol., 119: 26–51.

Praca wpłynęła do redakcji 14.12.2006 r.
Akceptowano do druku 25.07.2007 r.