Anita Baudzis, Aneta Kulig

Geofizyka Toruń Sp. z o.o., Ośrodek Interpretacji Geofizyki Wiertniczej

Jadwiga Zalewska, Dariusz Cebulski

Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Korelacja wyników interpretacji litologiczno-złożowej pomiarów geofizyki wiertniczej z wynikami badań laboratoryjnych rdzeni wiertniczych metodą jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR)

Wyniki pomiarów NMR dostarczają wiele ważnych informacji na temat porowatości, rozkładu nasycenia przestrzeni porowej i przepuszczalności, dzięki ścisłemu powiązaniu pomiędzy wielkością porów a rozkładem czasów relaksacji poprzecznej. Istotą pracy było pokazanie efektywności interpretacji litologiczno-złożowej pomiarów geofizyki wiertniczej, z wykorzystaniem wyników badań laboratoryjnych rdzeni wiertniczych metodą jądrowego rezonansu magnetycznego. Dla przykładu przeprowadzono analizę dwóch otworów reprezentujących utwory piaskowcowe czerwonego spągowca oraz trzech otworów reprezentujących utwory węglanowe dolomitu głównego.

Correlation of the lithological and deposit interpretation of geophysical well logging measurements with the results of laboratory tests of drilling cores using nuclear magnetic resonance method (NMR)

Results of NMR measurements delivers many important information about porosity, distribution of pore space saturation and permeability, thanks to strong relations between pore size and transverse relaxation time distribution. Essence of this work was showing effectiveness of lithological formation of drilling geophysics, using laboratory research effects on rock cores by means of nuclear magnetic resonance method. For example the analysis of two drill logs which represents sandstone formations of rotliegend and three drill logs which represents carbonate formations of main dolomite was investigate.

Szerokie spektrum możliwości metody NMR, w zastosowaniu do badania właściwości petrofizycznych skał oraz płynów złożowych, pozwala rozwiązać niemal wszystkie kluczowe problemy dotyczące poszukiwania i eksploatacji węglowodorów. Wiertnicy wykorzystują pomiary NMR do projektowania zabiegu hydraulicznego szczelinowania skał przy stymulowaniu złoża. Inżynierowie złożowi na podstawie danych NMR oceniają jakość badanych zbiorników oraz ulepszają zarządzanie eksploatacją. Geolodzy i petrofizycy mają możliwość lepszej oceny geometrii porów, a geofizykom-interpretatorom metoda NMR służy do precyzyjnego wyznaczania nasycenia przestrzeni porowej, porowatości i przepuszczalności [1].

Firmy zachodnie, badania laboratoryjne realizowane metodą jądrowego rezonansu magnetycznego wykorzystują głównie w celu weryfikacji i kalibracji zapisów sond otworowych NMR [3, 4]. Krajowe firmy geofizyczne, z uwagi na barierę ekonomiczną, nie dysponują jeszcze sondą NMR, niemniej jednak wykorzystują wyniki badań laboratoryjnych NMR w bieżącej interpretacji materiałów geofizyki wiertniczej. Wyniki tych badań pozwalają m.in. na weryfikację współczynników (porowatości efektywnej i porowatości całkowitej, a co za tym idzie zawartości iłów i wody związanej w skale) otrzymanych w procesie ilościowej interpretacji litologiczno-złożowej. Metody badań laboratoryjnych, w przeciwieństwie do interpretacji litologiczno-złożowej, stwarzają możliwość ilościowego określenia zawartości wody kapilarnej, która w pojęciu geofizyki wiertniczej stanowi część porowatości efektywnej. Dzięki temu istnieje możliwość określenia rzeczywistej zawartości węglowodorów i/lub wody złożowej (wolnej). W procesie interpretacji niezbędna jest również dokładna znajomość współczynnika struktury porowej (m) i parametru zwilżalności (n), które uzyskać można jedynie metodami laboratoryjnymi.

Opracowanie dotyczy wybranych otworów, w których wykonano badania laboratoryjne rdzeni wiertniczych metodą rezonansu magnetycznego (NMR) [5]. Wybrano trzy otwory z poziomem złożowym w obrębie dolomitu głów-

Rys. 1. Lokalizacja badanych otworów

nego (Krobielewko-5, Kaczlin-1, Chartów-2) oraz dwa przedstawiające poziom czerwonego spągowca (Rusocin-1, Cicha Góra-8). Lokalizacja analizowanych otworów wiertniczych została przedstawiona na rysunku 1.

Badania laboratoryjne metodą jądrowego rezonansu magnetycznego wykonano w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej INiG urządzeniem Maran-7 firmy Resonance, zgodnie z metodyką opisaną w pracy [2].

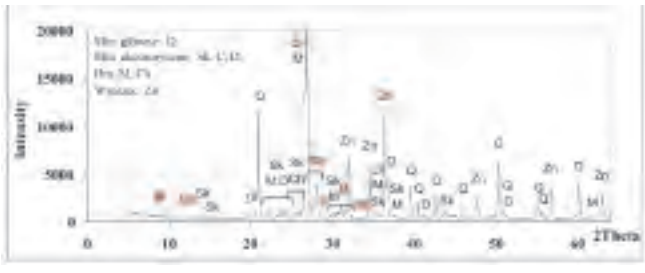
Interpretację litologiczno-złożową z wybranych otworów wykonano programem ULTRA firmy Halliburton w Pracowni Interpretacji Litologiczno-Złożowej Geofizyki Toruń. Wyniki interpretacji zestawione zostały z wynikami badań laboratoryjnych rdzeni i przedstawione graficznie (rysunki 4, 7, 10, 12, 15).

Wyniki interpretacji w ww. otworach zostały przedstawione w następujący sposób:

- na ścieżce nr 1, od lewej strony do prawej, przedstawione jest spektrometryczne profilowanie gamma (zielone pole obrazuje zawartość uranu), zawartość węglowodorów lekkich (żółte pole) oraz, dla przedstawienia stanu ścian otworu w kontekście oceny jakości wyników interpretacji, załączona jest różnica pomiędzy pomierzoną średnicą otworu a średnicą nominalną,
- na ścieżce nr 2, zamieszczony jest wyinterpretowany skład litologiczny oraz porowatość poziomu. Przy prawej krawędzi ścieżki zamieszczony jest wykres nasycenia oraz zawartość wody kapilarnej z badań laboratoryjnych,
- na ścieżce nr 3, od lewej strony do prawej, przedstawiono wyinterpretowane wartości współczynników porowatości całkowitej i porowatości efektywnej, uzyskanych w procesie interpretacji, ze współczynnikiem porowatości całkowitej wyznaczonym metodą jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR). Różnica między współczynnikami porowatości całkowitej i porowatości efektywnej stanowi zawartość wody związanej w iłach (pole niebieskie),
- na ścieżce nr 4 zamieszczono zestawienie współczynnika porowatości efektywnej uzyskanego w procesie interpretacji, ze współczynnikiem porowatości efektywnej określonym metodą NMR.

Otwór Cicha Góra-8

Otwór zlokalizowany jest na Monoklinie Przedsudeckiej, na północnym skłonie Wału Wolsztyńskiego. Poziom złożowy stanowią utwory czerwonego spągowca. Wykształcone są one w postaci piaskowców, piaskowców zailonych oraz zlepieńców z okruchami skał magmowych i domieszkami substancji węglanowej. Charakterystyczny skład mineralny dla tego poziomu w otworze Cicha Góra-8 prezentuje na rysunek 2.

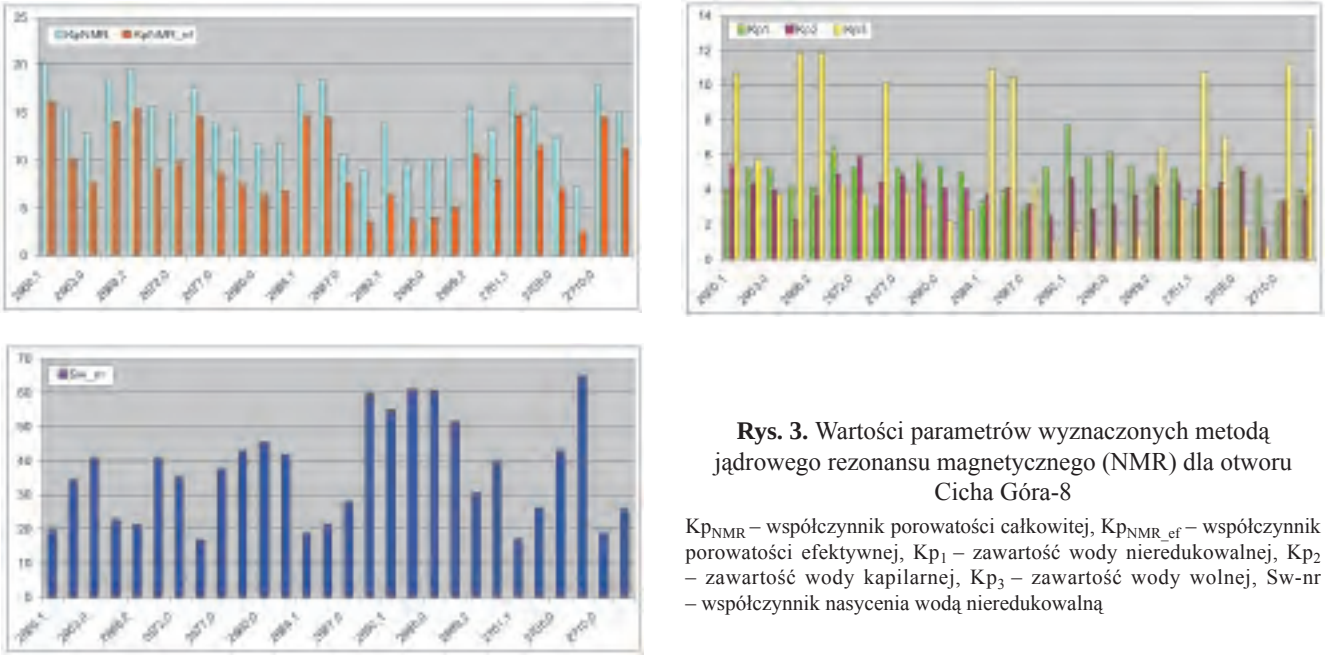


Rys. 2. Typowy dyfraktogram rentgenowski próbek z otworu Cicha Góra-8

Q – kwarc, Sk – skalenie, C – kalcyt, D – dolomit, Hm – hematyt, M – miki i minerały z grupy illitu, Ch – chloryt, Sił – suma minerałów ilastych, Zn – cynkit (wzorzec)

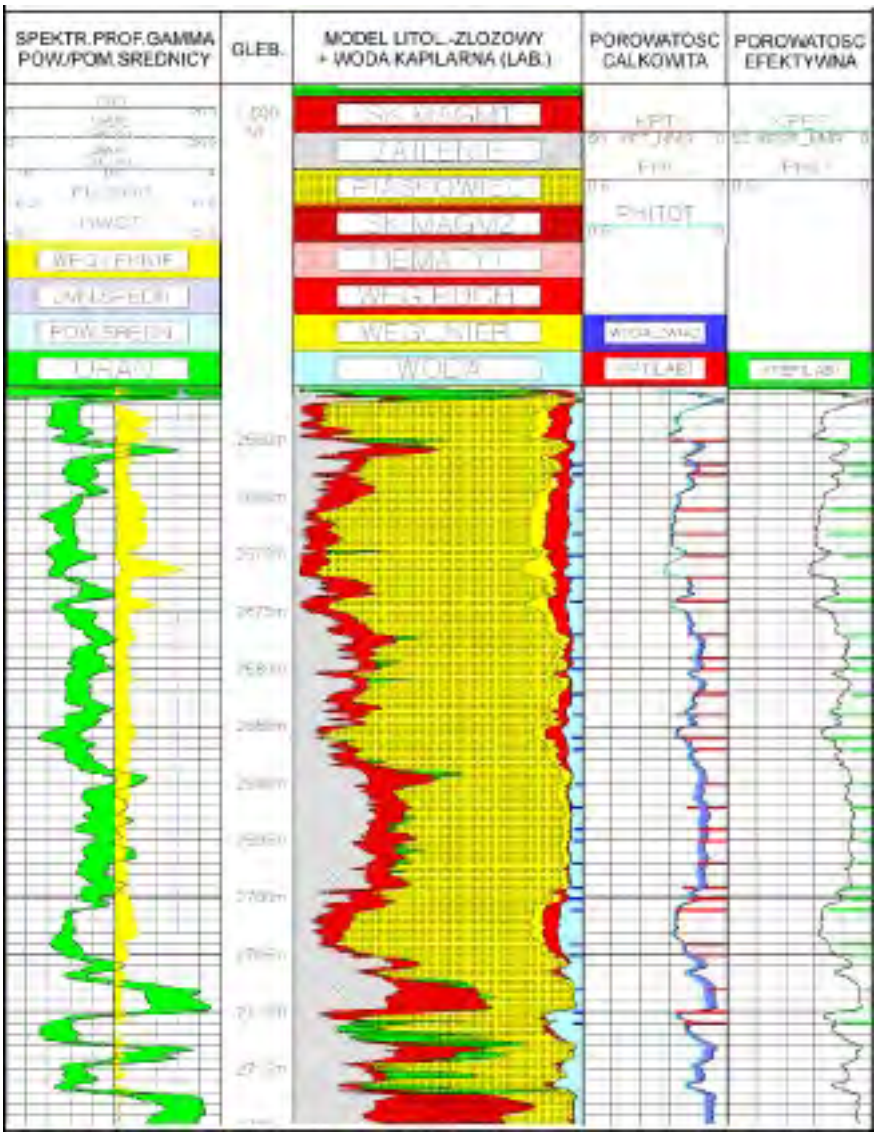
Metodą NMR przebadano 28 próbek. Na podstawie czasu rozkładu relaksacji poprzecznej T_2 można stwierdzić, że próbki te naprzemian reprezentowały dobre i umiarkowane własności zbiornikowe. Cały analizowany interwał charakteryzował się umiarkowaną wielkością współczynnika porowatości efektywnej $\overline{Kp}_{NMR_ef} \in 9{,}47\%$ oraz umiarkowaną wartością współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną $\overline{Sw}_{nr} \in 36{,}45\%$ (rysunek 3), natomiast średnia wartość współczynnika przepuszczalności była wysoka $\overline{Kprz} \in 55{,}4$ mD.

Interpretacja litologiczno-złożowa wskazuje na nasycenie węglowodorami lekkimi oraz wodą, która, biorąc pod uwagę wyniki badań laboratoryjnych, jest wodą kapilarną. W wyniku opróbowania otrzymano przypływ gazu palnego, o sumie węglowodorów 71,76% objętości oraz zawartości CH_4 wynoszącej 70,67% (rysunek 4.).



Rys. 3. Wartości parametrów wyznaczonych metodą jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR) dla otworu Cicha Góra-8

Kp_{NMR} – współczynnik porowatości całkowitej, Kp_{NMR_ef} – współczynnik porowatości efektywnej, Kp_1 – zawartość wody nieredukowalnej, Kp_2 – zawartość wody kapilarnej, Kp_3 – zawartość wody wolnej, Sw-nr – współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną



Rys. 4. Zestawienie wyników interpretacji litologiczno-złożowej z wynikami badań laboratoryjnych w otworze Cicha Góra-8

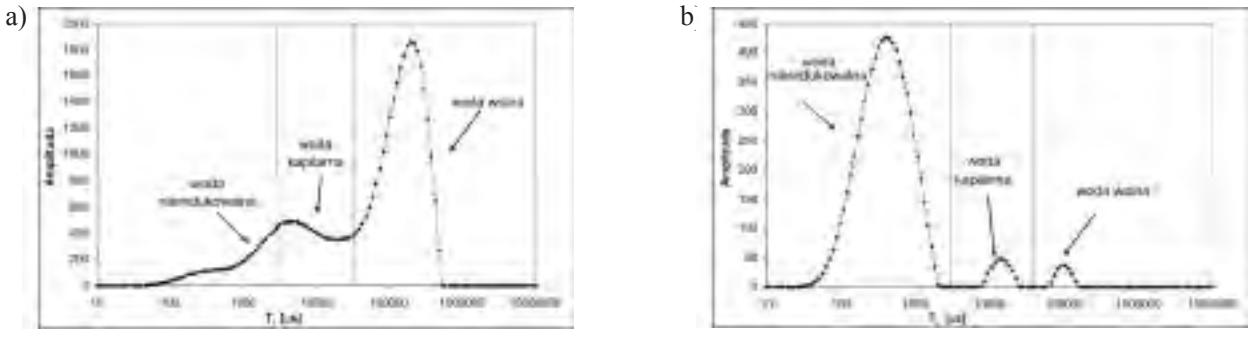
Otwór Rusocin-1

Otwór położony jest na Monoklinie Przedsudeckiej, na północnym skłonie Wału Wolsztyńskiego. Poziom złożowy stanowi stropowa część (~20 m) utworów czerwonego spągowca. Są to piaskowce o niewielkim zaileniu, miejscami wapniste, ze zmiennym udziałem składników skał magmowych.

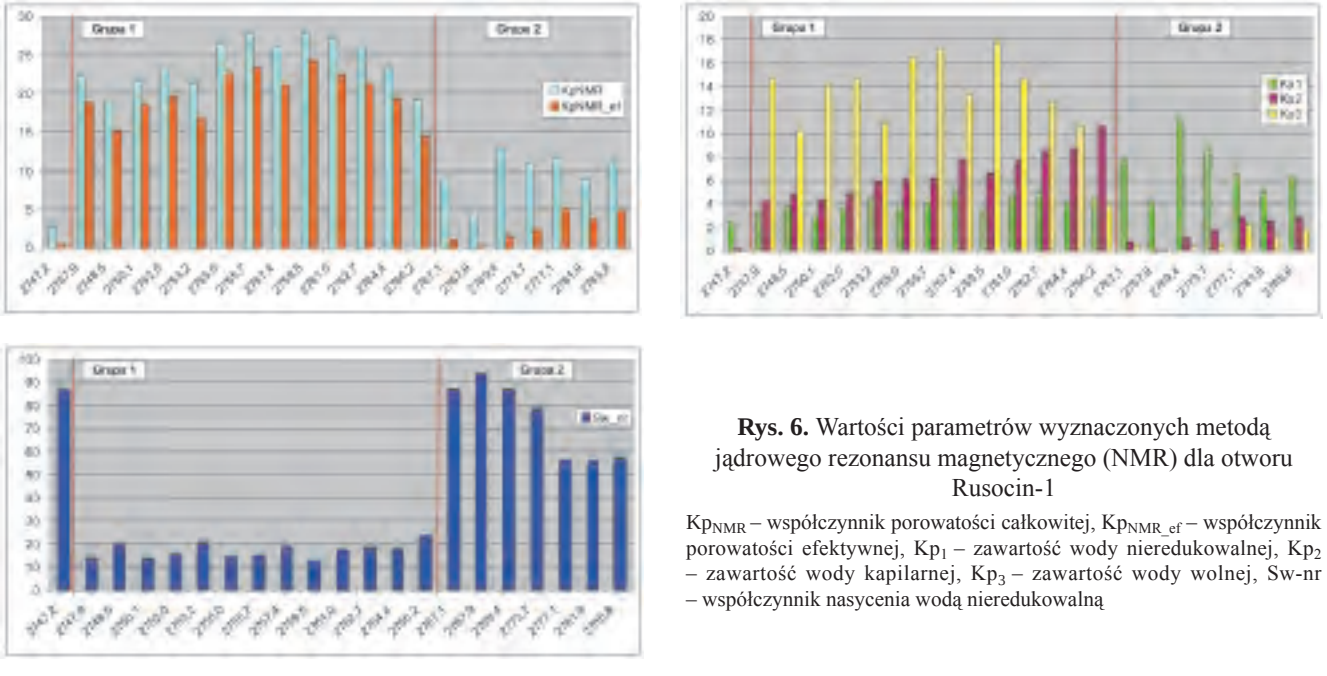
Metodą NMR przebadano 24 próbki, które reprezentowały dwa typy rozkładu czasu relaksacji poprzecznej T_2 (rysunek 5). Grupa pierwsza to próbki przedstawiające dobre skały zbiornikowe pochodzące z głębokości 2747,90-2766,15 m, charakteryzujące się wysoką zawartością wody wolnej $\overline{Kp}_3 = 14{,}3\%$, współczynnikiem porowatości całkowitej $\overline{Kp}_{NMR} = 24{,}3\%$ i efektywnej $\overline{Kp}_{NMR_ef} = 20{,}3\%$ oraz niską wartością współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną $\overline{Sw}_{nr} = 16{,}7\%$ (rysunki 5a, 6). Średnia wartość współczynnika przepuszczalności była również wysoka – $\overline{Kprz} = 111{,}1$ mD.

Grupa druga to próbki z interwału 2767,10-2785,80 m, o odmiennych i znacznie słabszych własnościach zbiornikowych i filtracyjnych – o czym świadczy bardzo wysoka średnia wartość współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną i $\overline{Sw}_{nr} = 86{,}2\%$ niska średnia wartość współczynnika przepuszczalności $\overline{Kprz} = 0{,}4$ mD (rysunki 5b, 6).

Wyinterpretowane współczynniki porowatości wykazują wysoką korelację z porowatościami wyznaczonymi laboratoryjnie. Interpretacja litologiczno-złożowa wskazuje na występowanie węglowodorów lekkich oraz wody. Z korelacji wynika, że wyinterpretowana zawartość węglowodorów w górnej części poziomu złożowego jest nieco zaniżona (rysunek 7). W wyniku opróbowania wydobyto 156 870 m^3 gazu i 128,97 m^3 wody złożowej.

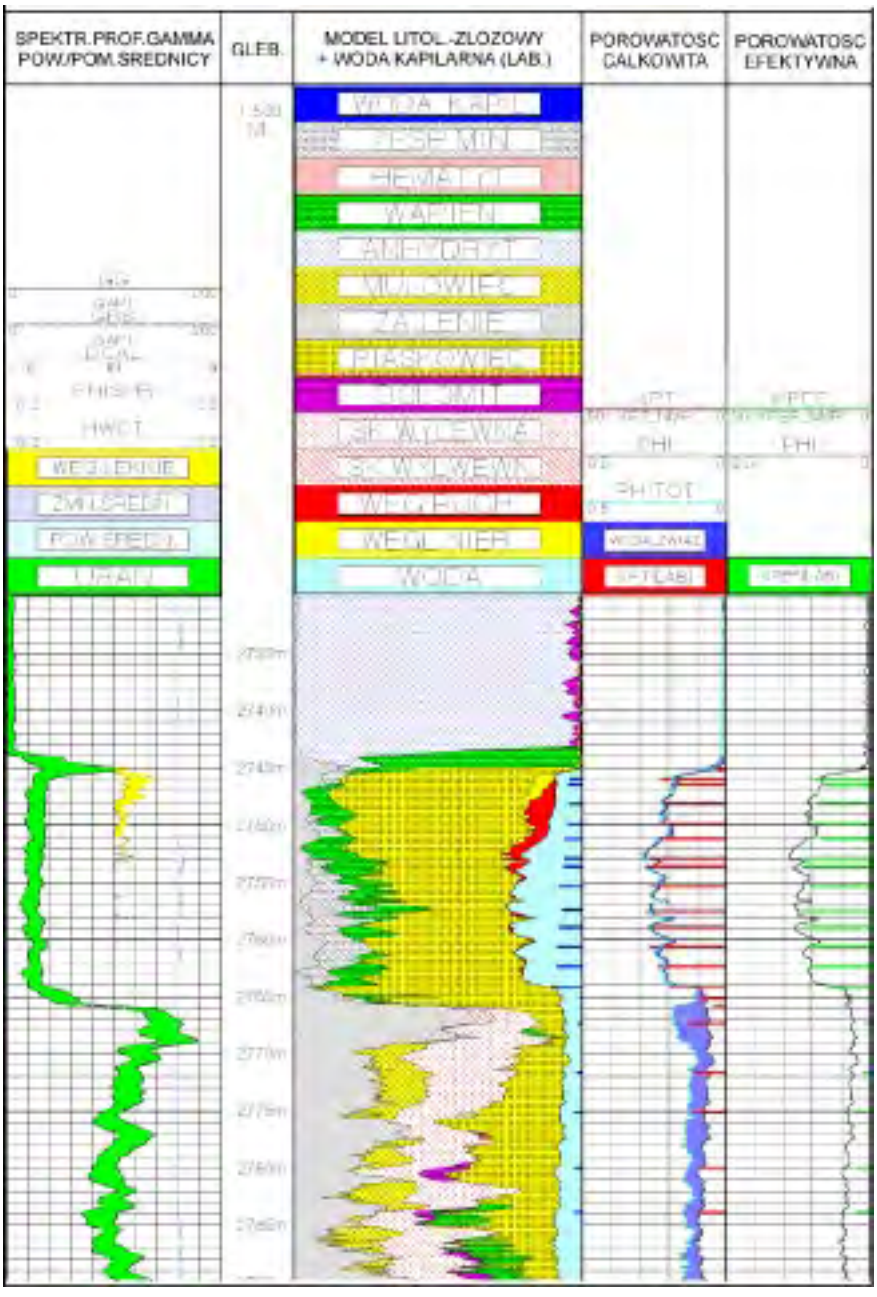


Rys. 5. Rozkłady czasu relaksacji poprzecznej T_2 próbek z otworu Rusocin-1



Rys. 6. Wartości parametrów wyznaczonych metodą jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR) dla otworu Rusocin-1

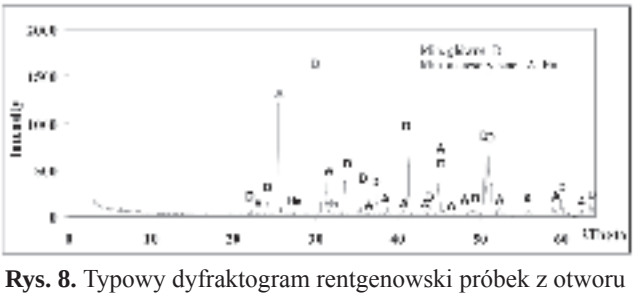
Kp_{NMR} – współczynnik porowatości całkowitej, Kp_{NMR_ef} – współczynnik porowatości efektywnej, Kp_1 – zawartość wody nieredukowalnej, Kp_2 – zawartość wody kapilarnej, Kp_3 – zawartość wody wolnej, Sw-nr – współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną



Rys. 7. Zestawienie wyników interpretacji litologiczno-złożowej z wynikami badań laboratoryjnych w otworze Rusocin-1

Otwór Krobielewko-5

Otwór położony jest w Synklinorium Szczecińskim, na platformie Krobielewka. Poziom złożowy stanowią utwory dolomitu głównego, który jest wykształcony w postaci dolomitów, ze zmiennym udziałem anhydrytów oraz minimalną domieszką halitu, co stwierdzono na podstawie analizy rentgenowskiej. Typowy dyfraktogram rentgenowski dla tego otworu przedstawiono na rysunku 8.



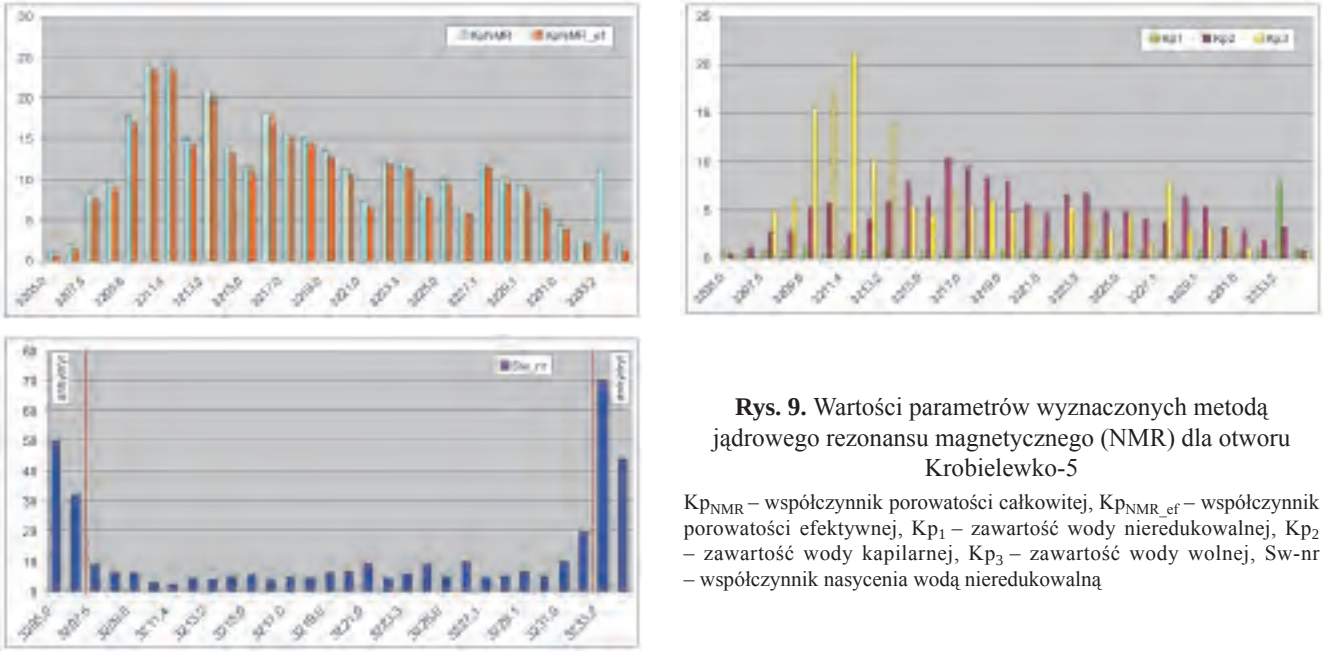
Rys. 8. Typowy dyfraktogram rentgenowski próbek z otworu Krobielewko-5

D – dolomit, A – anhydryt, Ha – halit

Metodą NMR przebadano 30 prób. Analizowane próbki charakteryzowały się porowatością efektywną (Kp_{NMR_ef}) w zakresie od 0,65 do 23,58%, przy średniej wartości 10,31%. Współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną wprawdzie zmieniał się w szerokim zakresie ($Sw_{nr} \in$ 2,12-70,44%), ale większość próbek posiadała bardzo zbliżone wartości (poniżej $\overline{Sw}_{nr}$ = 6,3% dla dolo-

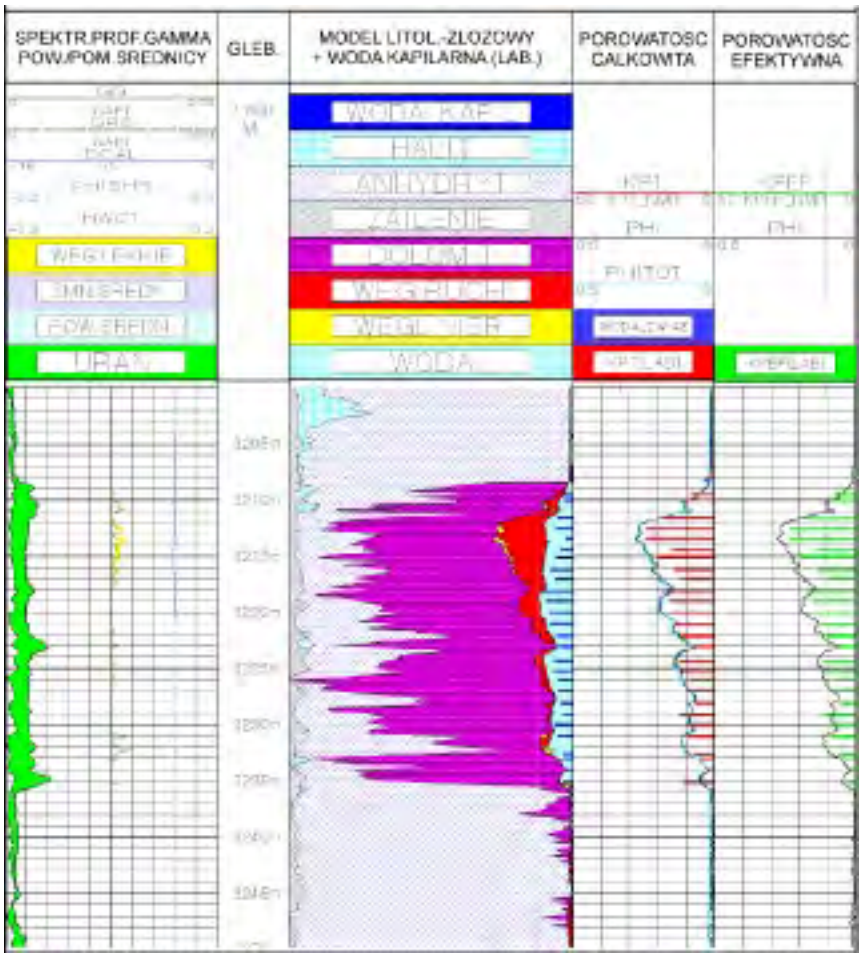
mitów), co świadczy o tym, że skały te są potencjalnie zdolne do oddawania płynów złożowych (rysunek 9).

Na zestawieniu współczynników porowatości (całkowitej i efektywnej) z porowatościami wyznaczonymi laboratoryjnie widoczna jest duża zgodność (rysunek 10). Współczynniki porowatości wyinterpretowano na podstawie materiałów geofizyki wiertniczej. Interpretacja litologiczno-złożowa wskazuje na nasycenie węglowodorami oraz wodą, która, biorąc pod uwagę wyniki badań laboratoryjnych, jest wodą kapilarną. W wyniku opróbowania próbnikiem złoża otrzymano przypływ gazu palnego z zawartością H_2S.



Rys. 9. Wartości parametrów wyznaczonych metodą jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR) dla otworu Krobielewko-5

Kp_{NMR} – współczynnik porowatości całkowitej, Kp_{NMR_ef} – współczynnik porowatości efektywnej, Kp_1 – zawartość wody nieredukowalnej, Kp_2 – zawartość wody kapilarnej, Kp_3 – zawartość wody wolnej, Sw-nr – współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną

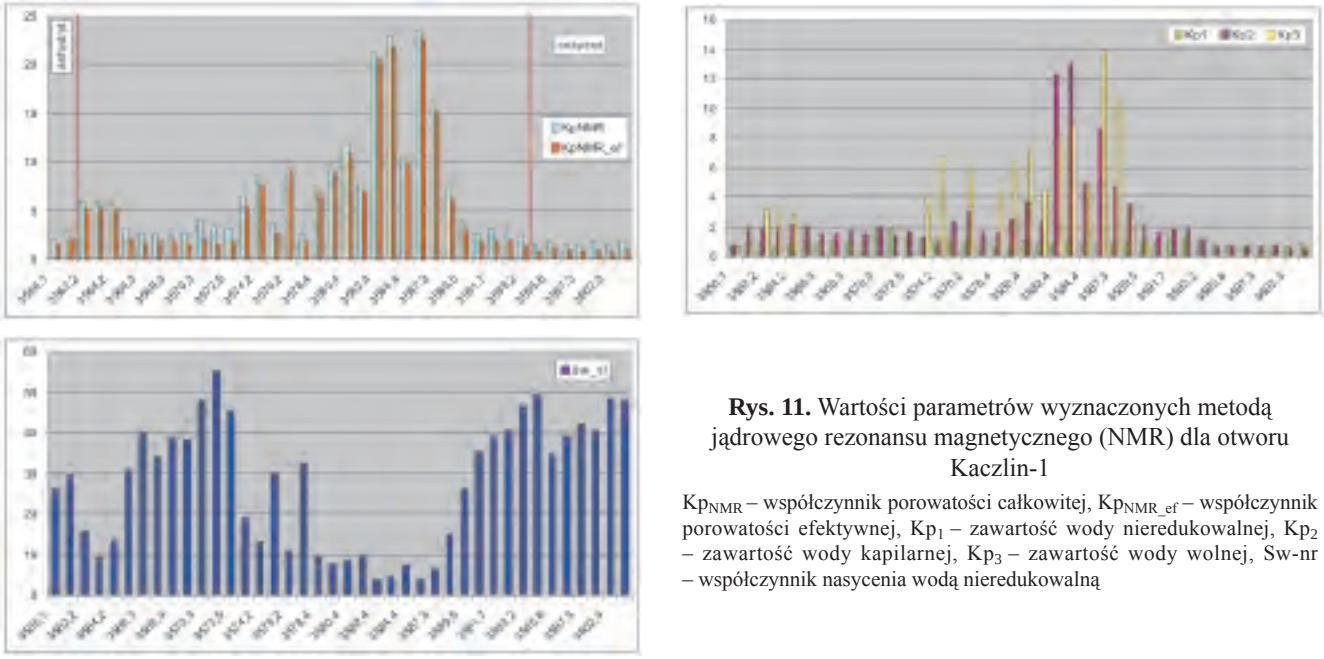


Rys. 10. Zestawienie wyników interpretacji litologiczno-złożowej z wynikami badań laboratoryjnych w otworze Krobielewko-5

Otwór Kaczlin-1

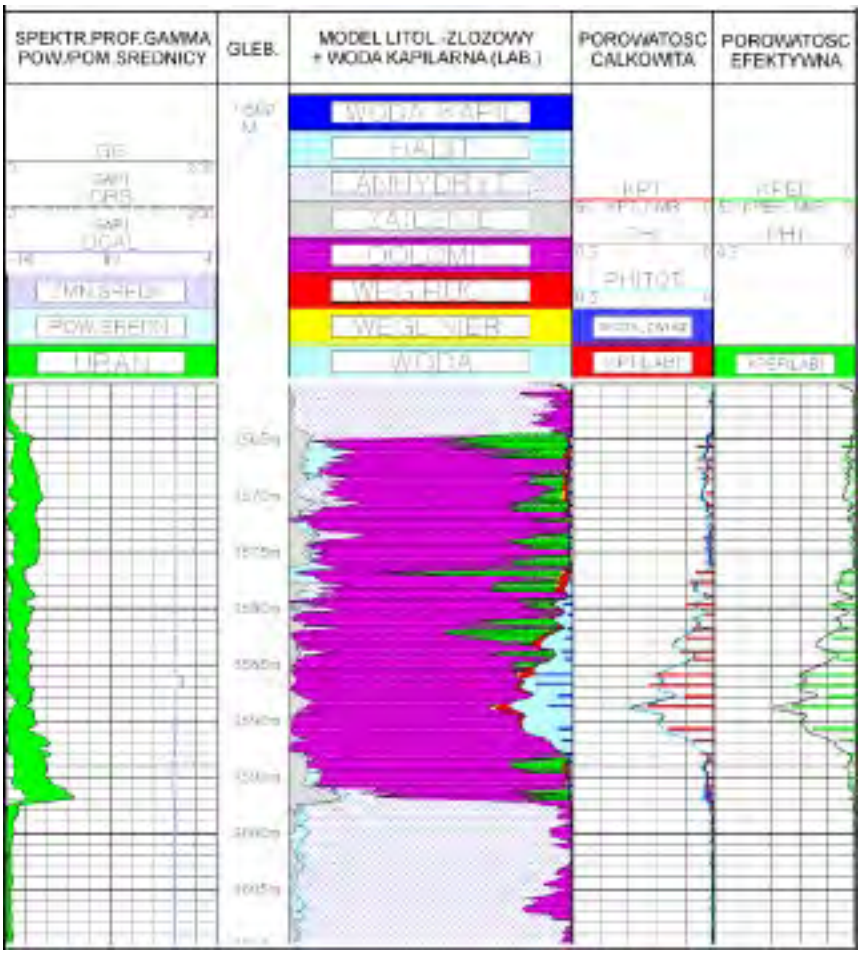
Otwór zlokalizowany jest w Synklinorium Szczecińskim, we wschodniej części półwyspu Grotowa. Poziom złożowy stanowią utwory dolomitu głównego, których skład mineralny jest nieco bardziej zróżnicowany niż w otworze Krobielewko-5. Są to dolomity, miejscami wapniste, z niewielkim udziałem anhydrytów, halitu i kwarcu.

Analizie poddano 30 prób. Porowatość efektywna Kp_{NMR_ef} zmieniała się w zakresie 0,68-22,52%, przy średniej wartości $\overline{Kp}_{NMR_ef} = 6{,}8\%$. Współczynnik nasy-



Rys. 11. Wartości parametrów wyznaczonych metodą jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR) dla otworu Kaczlin-1

Kp_{NMR} – współczynnik porowatości całkowitej, Kp_{NMR_ef} – współczynnik porowatości efektywnej, Kp_1 – zawartość wody nieredukowalnej, Kp_2 – zawartość wody kapilarnej, Kp_3 – zawartość wody wolnej, Sw-nr – współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną



Rys. 12. Zestawienie wyników interpretacji litologiczno-złożowej z wynikami badań laboratoryjnych w otworze Kaczlin-1

cenia wodą nieredukowalną należał do przedziału $Sw_{nr} \in 3{,}63\text{-}55{,}15\%$, ale jego średnia wartość była znacznie wyższa niż w otworze Krobielewko-5; $\overline{Sw}_{nr} = 36{,}5\%$ (rysunek 11). Na uwagę zasługują próbki z interwału 3582,40-3587,30 m, których średnia wartość porowatości efektywnej była wysoka; $\overline{Kp}_{NMR_ef} = 17{,}95\%$, a średnia wartość współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną była niska; $\overline{Sw}_{nr} = 5{,}1\%$ (rysunek 11), przy współczynniku przepuszczalności $\overline{Kprz} = 0{,}23$ mD.

Wyinterpretowane współczynniki porowatości – zarówno w części zbitej, o niskiej porowatości, jak i w części o wyższej porowatości – wykazują wysoką korelację z porowatościami wyznaczonymi laboratoryjnie. W części przekroju, charakteryzującej się dobrymi własnościami kolektorskimi, wyinterpretowano wodę z resztkową zawartością węglowodorów (rysunek 12). W wyniku opróbowania otrzymano przypływ 2,7 m^3 płynu złożowego, zgazowanego gazem z dużą zawartością H_2S.

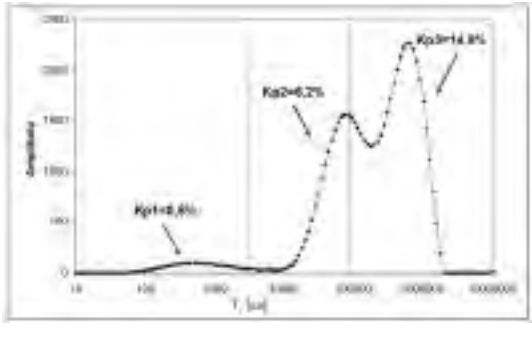
Otwór Chartów-2

Otwór zlokalizowany jest na monoklinie przedsudeckiej, na platformie Chartowa. Poziom złożowy stanowią utwory dolomitu głównego zbudowane z dolomitów, ze zmiennym udziałem anhydrytów oraz minimalnym udziałem halitu.

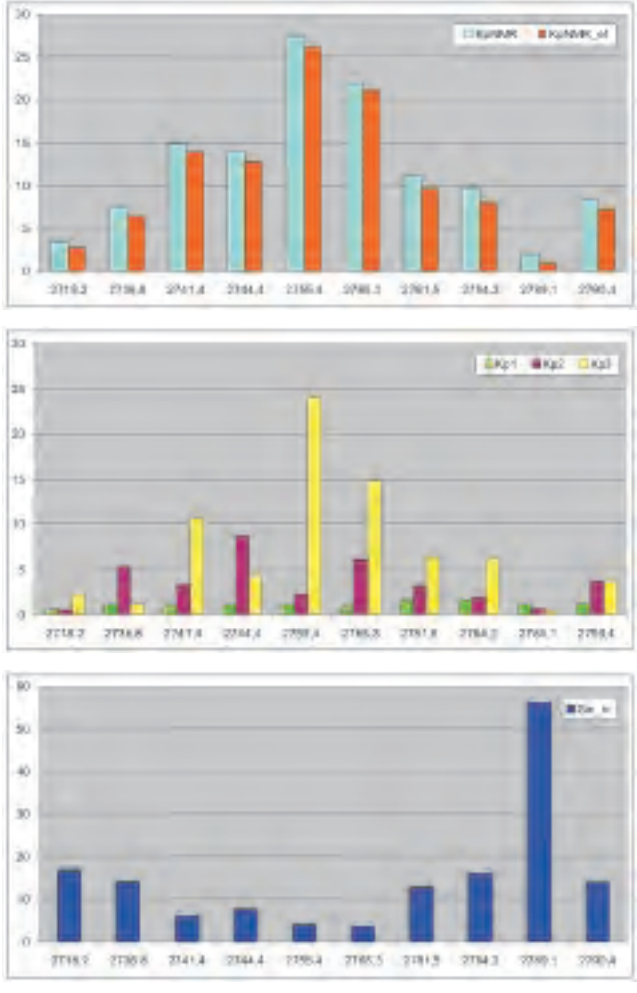
Metodą NMR przebadano 10 prób. Charakterystyczny rozkład czasu relaksacji poprzecznej T_2 próbek z otworu Chartów-2 przedstawiono na rysunku 13. Jest to rozkład dwumodalny, z dominującym udziałem wody wolnej, gdzie udział wody kapilarnej jest prawie o połowę mniejszy, a zawartość wody nieredukowalnej jest niewielka.

Porowatość efektywna badanego poziomu zmieniała się w zakresie $Kp_{NMR_ef} \in 2{,}66\text{-}26{,}14\%$, przy średniej wartości $\overline{Kp}_{NMR_ef} = 12\%$. Współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną Sw_{nr} należał do przedziału 3,75-15,99%, przy średniej wartości $\overline{Sw}_{nr} = 10{,}6\%$. Zaznaczyć należy, że z analizy została wyłączona próbka posiadająca najniższą porowatość ($Kp_{NMR_ef} = 0{,}87\%$) i najwyższy współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną ($Sw_{nr} = 56{,}28\%$), pochodząca z głębokości 2789,1 m, która według analizy rentgenowskiej jest prawie czystym anhydrytem, z minimalnym udziałem dolomitu (rysunek 14).

Interpretacja litologiczno-złożowa wskazuje na nasycenie węglowodorami lekkimi oraz wodą, która, biorąc pod uwagę wyniki badań laboratoryjnych, jest wodą kapilarną. Wyinterpretowane wartości porowatości, jak i wielkość nasycenia wodą, zostały potwierdzone badaniami laboratoryjnymi (rysunek 15). W wyniku opróbowania poziomu próbnikiem złoża otrzymano silny przypływ gazu podtrzymującego palenie.

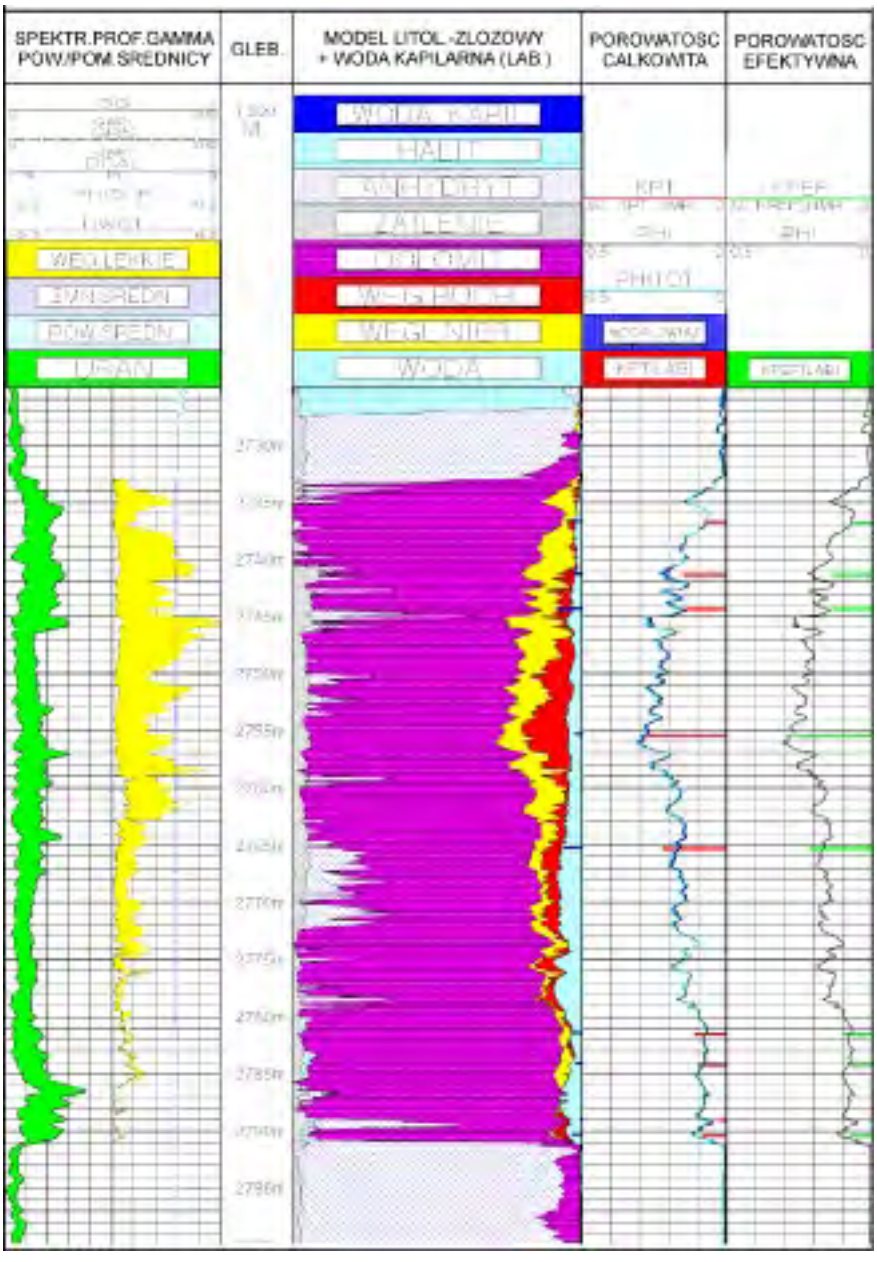


Rys. 13. Charakterystyczny rozkład czasu relaksacji poprzecznej T_2 próbek z otworu Chartów-2



Rys. 14. Wartości parametrów wyznaczonych metodą jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR) dla otworu Chartów-2

Kp_{NMR} – współczynnik porowatości całkowitej, Kp_{NMR_ef} – współczynnik porowatości efektywnej, Kp_1 – zawartość wody nieredukowalnej, Kp_2 – zawartość wody kapilarnej, Kp_3 – zawartość wody wolnej, Sw-nr – współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną



Rys. 15. Zestawienie wyników interpretacji litologiczno-złożowej z wynikami badań laboratoryjnych w otworze Chartów-2

Podsumowanie

Na podstawie interpretacji materiałów geofizyki wiertniczej wydzielane są strefy zbiornikowe oraz prowadzona jest ocena nasycenia skał w profilach odwiertów.

Poprzez bezpośrednie porównanie nasyceń wodą przestrzeni porowej (uzyskanych z laboratoryjnych pomiarów NMR) z nasyceniami określonymi z profilowań geofizycznych można potwierdzić obecność możliwej do wyparcia wody ze skał, będących zbiornikami ropy czy gazu. Integracja ww. danych może znacznie poprawić ocenę petrofizyczną skał będących kolektorami węglowodorów, a wynik końcowy w sposób bardziej precyzyjny pozwoli określić właściwości skał zbiornikowych w aspekcie zdolności do magazynowania węglowodorów oraz produktywności zbiornika.

Na podstawie szeregu prac zrealizowanych w latach 2001-2007 w INiG, przy ścisłej współpracy z przemysłem, można stwierdzić, że metoda NMR stała się w ostatnich latach bardzo pomocnym narzędziem badawczym w procesie cechowania i weryfikacji profilowań geofizyki wiertniczej.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

[1] Allen D. i in.: *Trends in NMR Logging*. Oilfield Review, Autumn 2000.

[2] Ciechanowska M., Zalewska J.: *Analiza zbiornikowych własności skał przy wykorzystaniu zjawiska jądrowego rezonansu magnetycznego NMR*. Nafta-Gaz 1, 2002.

[3] Coates G.R., Xiao R., Prammer M.G.: *NMR Logging Principles and Applications*. Halliburton Energy Services. Houston 1999.

[4] Schlumberger: *CMR Cobinable Magnetic Resonance Tool*. User's Guide Schlumberger, 1997.

[5] Zalewska J. i in.: *Specjalistyczne badania geofizycznych parametrów rdzeni wiertniczych wraz z interpretacją wyników dla otworu: Kaczlin-1 (zlec. 2530/SW/2007), Chartów-2 (zlec. 2692/SW/2004), Rusocin-1 (zlec. 2708/SW/2005), Cicha Góra-8 (zlec. 4095/SW/2006), Krobielewko-5 (zlec. 4932/SW/2006)*. Archiwum INiG.

Mgr inż. Anita BAUDZIS – absolwentka wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Specjalista geofizyk w pracowni Interpretacji Litologiczno-Złożowej Geofizyki Toruń Sp. z o.o.

Mgr inż. Aneta KULIG – absolwentka wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Specjalista geolog w pracowni Interpretacji Litologiczno-Złożowej Geofizyki Toruń Sp. z o.o.

Mgr inż. Jadwiga ZALEWSKA – geolog, absolwentka Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej Instytutu Nafty i Gazu. Realizuje prace badawcze w zakresie laboratoryjnych pomiarów parametrów rdzeni i płuczek wiertniczych pod kątem ilościowej interpretacji profilowań geofizycznych.

Mgr inż. Dariusz CEBULSKI – absolwent Wydziału Geologii, Geofizyki i ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, specjalność geofizyka. Obecnie pracuje w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej INiG w Krakowie. Zajmuje się badaniem petrofizycznych własności skał zbiornikowych.