

KORELACJA POMIARÓW MAGNETYCZNEGO REZONANSU JĄDROWEGO Z BADANAMI POROZYMETRII RĘCIOWEJ UTWORÓW CZERWONEGO SPĄGOWCA

**Correlation of Nuclear Magnetic Resonance and Mercury Porosimetry
measurements conducted on the Rotliegendes sediments**

Jolanta KLAJA, Sylwia KOWALSKA & Anna PRZELASKOWSKA

*Institut Nafty i Gazu, Zakład Geofizyki Wiertniczej; ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków;
e-mail: Klaja@inig.pl, Przelaskowska@inig.pl, Kowalska@inig.pl*

Treść: Przeprowadzono korelację pomiarów magnetycznego rezonansu jądrowego i porozymetrii ręciowej w celu określenia rozkładu wielkości porów i wyznaczenia rzeczywistej wartości czasu granicznego T_{2G} . Badania wykonano dla piaskowców i zlepieńców czerwonego spągowca z rejonu południowo-zachodniej części niecki poznańskiej. Kalibrację rozkładów czasu relaksacji poprzecznej T_2 pod kątem wyznaczenia wielkości porów przeprowadzono metodą Marshalla, w której wykorzystywana jest relaksacyjność efektywna ρ_e (czynnik skalujący promień poru do wartości T_2). Wartość relaksacyjności efektywnej uzyskano dla 35 próbek, parametr ten charakteryzuje się dużą zmiennością (4.4–49.9 $\mu\text{m/s}$), co jest związane ze zróżnicowanym wykształceniem przestrzeni porowej. Parametr T_{2G} określono poprzez ilościowe odniesienie wyników badań porozymetrycznych do rozkładów czasów relaksacji poprzecznej T_2 . Poprawność wyznaczonych eksperymentalnie wartości T_{2G} potwierdza dobra korelacja wyliczonej za ich pomocą porowatości dynamicznej z przepuszczalnością.

Słowa kluczowe: magnetyczny rezonans jądrowy (NMR), porozymetria ręciowa, czas relaksacji poprzecznej T_2 , relaksacyjność efektywna, rozkład wielkości porów, woda nieruchoma

Abstract: Nuclear Magnetic Resonance and Mercury Porosimetry methods were correlated in order to determine the pore size distribution and the irreducible water content. The investigations were conducted for Rotliegendes sandstones and conglomerates from the Poznań Trough. The transverse relaxation time (T_2) distribution curves were calibrated with the use of the Marshall method (in which effective relaxivity is used as the scaling factor – scaling pore radius to T_2) in order to determine the pore size distribution. The effective relaxivity value was established for 35 samples, the variability (4.4–49.9 $\mu\text{m/s}$) of this parameter is connected with the diversity of the pore space structure of the investigated rocks. The cutoff time (T_{2G}) value was determined by applying the quantitative results of the porosimetry measurements to the transverse relaxation time (T_2) distributions. Good correlation between permeability and dynamic porosity obtained with the use of the experimental T_{2G} values shows that the calculated T_{2G} values are correct.

Key words: Nuclear Magnetic Resonance (NMR), Mercury Porosimetry, transverse relaxation time T_2 , effective relaxivity, pore size distribution, irreducible water

WSTĘP

W ostatnich latach korelacja pomiarów magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR) i porozymetrii rてciowej była tematem wielu publikacji (Marshall *et al.* 1995, Coates *et al.* 1999, Volokitin *et al.* 2001). Zainteresowanie tą tematyką wiąże się z konkretnymi korzyściami, jakie mogą przynieść pozytywne wyniki badań porównawczych, tj. możliwością odniesienia pomiarów NMR bezpośrednio do rozmiarów porów badanych skał oraz wiarygodnego wyznaczenia nasycenia wodą nieruchomą i wodą wolną.

Celem pracy było wyznaczenie wartości granicznego czasu relaksacji poprzecznej T_{2G} (umożliwiającego obliczenie zawartości wody nieruchomej, a co za tym idzie – porowatości dynamicznej) oraz określenie rozkładu wielkości porów na podstawie pomiarów NMR.

W wypadku utworów klastycznych przyjmowana jest średnia wartość T_{2G} równa 33 ms (Kenyon *et al.* 1995, Kenyon 1997, Straley *et al.* 1997, Coates *et al.* 1999). W rzeczywistości jednak wartości T_{2G} mogą się zmieniać w bardzo szerokich granicach, nawet od 1.5 ms do 75 ms (Xie & Guihéneuf 2000). Rzeczywiste wartości tego parametru w poszczególnych basenach sedimentacyjnych można wyznaczyć dwoma sposobami: metodą, w której stan resztkowego nasycenia skał uzyskuje się poprzez eksperyment wirowania skał w warunkach rosnących ciśnień kapilarnych (Klaja & Przelaskowska 2006), oraz, jak w prezentowanej pracy, poprzez porównanie badań NMR z pomiarami porozymetrii rてciowej. Pomiary porozymetryczne dostarczają między innymi informacji o procentowym udziale porów różnej wielkości w przestrzeni porowej, w tym porów najmniejszych, z którymi związana jest obecność wody nieruchomej. Odniesienie wyników badań porozymetrycznych do rozkładu czasów relaksacji poprzecznej T_2 umożliwia określenie parametru A_{nru} (amplituda rozkładu T_2 odpowiadająca wielkości porowatości zajętej wodą nieruchomą), co z kolei pozwala na uzyskanie wartości czasu granicznego T_{2G} .

Określenie rozkładu wielkości porów i ich procentowego udziału w przestrzeni porowej za pomocą badań NMR wymaga wprowadzenia odpowiedniego czynnika skalującego umożliwiającego konwersję wartości T_2 na wielkości porów. Stosowane są różne metody wyznaczania czynnika skalującego uwzględniające wykształcenie przestrzeni porowej (Marshall *et al.* 1995, Volotkin *et al.* 2001). W przedstawionej pracy zastosowano metodę Marshalla (Marshall *et al.* 1995), w której czynnikiem skalującym jest relaksacyjność efektywna. Parametr ten jest wyznaczany poprzez porównanie krzywych rozkładu wielkości porów i czasów relaksacji poprzecznej T_2 .

METODYKA

Korelacja pomiarów NMR i porozymetrycznych pozwala na wyznaczenie parametru T_{2G} (czasu granicznego) wykorzystywanego do szacowania zawartości wody nieruchomej oraz na kalibrację rozkładów czasu relaksacji poprzecznej T_2 pod kątem wyznaczenia wielkości porów. Korelacja jest możliwa, ponieważ obie metody odzwierciedlają rozkład porów w skale.

Kalibracja rozkładów czasu relaksacji poprzecznej T_2 pod kątem wyznaczenia wielkości porów metodą NMR

W przypadku pomiarów NMR skały w pełni nasyconej wodą czas relaksacji poprzecznej T_2 jest proporcjonalny do wielkości porów (Kenyon 1997)

$$T_2 = \frac{1}{\rho} \left(\frac{V}{S} \right) \quad (1)$$

gdzie:

- ρ – relaksacyjność powierzchniowa,
- V – objętość poru,
- S – powierzchnia poru.

W celu wyznaczenia wielkości T_2 wykonuje się sekwencję pomiarową CPMG. Na podstawie zarejestrowanych punktów pomiarowych wyznaczone są krzywe rozkładu T_2 poprzez dopasowanie sumy pojedynczych eksponent o stałych T_{2i} , z których każda odpowiada innej wielkości poru (Coates *et al.* 1999).

W badaniach porozymetrii rtęciowej wykorzystywane jest równanie Washburna, które umożliwia powiązanie ciśnienia kapilarnego z wielkością promieni porów

$$P = \frac{2\tau \cos \theta}{r} \quad (2)$$

gdzie:

- P – przyłożone ciśnienie,
- r – promień porów,
- τ – napięcie powierzchniowe,
- θ – kąt kontaktu.

Pomiar NMR rejestruje całą objętość poru łącznie z gardzielą. Pomiar porozymetrii rtęciowej odzwierciedla natomiast objętość porów dostępną przez gardziele o danej wielkości (Coates *et al.* 1999). Gdy więc nie ma różnicy między rozmiarami porów i gardzieli lub kiedy istnieje stały związek między nimi, pomiary NMR i porozymetrii rtęciowej dostarczają porównywalnych informacji. Z taką sytuacją mamy do czynienia najczęściej w piaskowcach, w których promień ziarna determinuje rozmiar poru (Kleinberg *et al.* 1993). Ponieważ oba pomiary rejestrują objętość porów, kształt uzyskanych za ich pomocą krzywych dystrybucji jest zbliżony. Krzywe można więc porównywać, wprowadzając odpowiedni czynnik skalujący.

W metodzie Marshalla (Marshall *et al.* 1995) czynnikiem skalującym jest relaksacyjność efektywna ρ_e (czynnik skalujący promień poru do wartości T_2). Aby porównać rozkład wielkości porów z rozkładem czasów T_2 , należy przedstawić je na wspólnej skali.

W tym celu wykonuje się konwersję wielkości porów na ekwiwalentną wartość T_2 zgodnie z zależnością

$$T_2 = \frac{1000r}{r\rho_e} \quad (3)$$

gdzie:

- T_2 – czas relaksacji poprzecznej dla poru w kształcie walca [ms],
- r – promień porów wyznaczony na podstawie porozymetrii rтięciowej [μm],
- ρ_e – relaksacyjność efektywna [$\mu\text{m/s}$].

Zależność tę otrzymujemy poprzez podstawienie w równaniu (1) stosunku powierzchni do objętości poru dla walca ($S/V = 2/r$) zgodnie z przyjętym w metodzie porozymetrii rтięciowej modelem cylindrycznych kapilar. Wprowadzony w równaniu (3) współczynnik relaksacyjności efektywnej ρ_e odzwierciedla fakt, że pomiar NMR „reaguje” na objętość porów, podczas gdy porozymetria rтięciowa jest kontrolowana głównie przez rozmiar gardzieli. Współczynnik ten (ρ_e) jest zatem proporcjonalny do relaksacyjności powierzchniowej ρ i do stosunku: rozmiar gardzieli/rozmiar poru (Coates *et al.* 1999).

Relaksacyjność efektywną ρ_e każdej próbki wyznacza się przez znalezienie najlepszego dopasowania pomiędzy krzywymi rozkładu wielkości porów i rozkładu czasów T_2 . W celu dopasowania porównywanych rozkładów zastosowano funkcję korelacji wzajemnej, która jest miarą podobieństwa kształtów analizowanych krzywych (Kleinberg *et al.* 1993, Marshall *et al.* 1995)

$$C(\rho_e) = \sum A_{NMR}(T_2) \cdot A_{MICP}(1000r/2\rho_e) \quad (4)$$

gdzie:

- A_{NMR} i A_{MICP} – amplitudy rozkładu T_2 i rozkładu wielkości porów,
- ρ_e – relaksacyjność efektywna, czynnik skalujący promień poru do wartości T_2 [mm/s].

Wyznaczanie wartości czasu granicznego T_{2G}

W metodzie magnetycznego rezonansu jądrowego rozdzielenie wody nieruchomej od wody wolnej umożliwiają pomiary czasów relaksacji poprzecznej T_2 . Kluczowym parametrem wykorzystywanym w interpretacji jest tzw. czas graniczny T_{2G} – wartość T_2 , która dzieli obszar pod krzywą dystrybucji T_2 na dwie części (Coates *et al.* 1999). Pierwsza część – odpowiadająca czasom $T_2 \leq T_{2G}$ – odzwierciedla przestrzeń porową wypełnioną wodą związaną z iłami i zatrzymaną w kapilarach ($Kp_1 + Kp_2$), a zatem zawiera informację dotyczącą zawartości wody nieruchomej. Część druga (Kp_3) stanowi wodę wolną (porowatość dynamiczną).

Wartości rzeczywistego czasu granicznego T_{2G} wyznaczono poprzez odniesienie wyników badań porozymetrycznych do rozkładów czasu relaksacji poprzecznej T_2 . Kierując

się założeniem, że woda nieruchoma zajmuje pory o średnicy poniżej 1 μm (Nowak 2004), przyjęto opisany poniżej sposób określenia T_{2G} .

Krok I

Na podstawie badań porozymetrycznych określono wielkość przestrzeni porowej wypełnionej wodą nieruchomą, przyjmując, że woda ta jest uwięziona w mikroporach o średnicy mniejszej od 1 μm. Wówczas

$$Kp_{nru} = Kp_{NMR} - Kp_{por} + kp_{por, d < 1 \mu m} \quad (5)$$

gdzie:

- Kp_{nru} – wielkość przestrzeni porowej wypełnionej wodą nieruchomą;
- Kp_{NMR} – porowatość całkowita określona metodą NMR;
- Kp_{por} – porowatość z porozymetru (uwzględniająca objętość porów wypełnioną przez ciecz niezwilżalną, rtęć, która weszła do próbki; objętość ta nie obejmuje tych wszystkich submikroporów, których średnica jest zbyt mała, aby umożliwić wejście rtęci);
- $Kp_{por, d < 1 \mu m}$ – porowatość z porozymetru dla porów o średnicy mniejszej od 1 μm.

Znając wielkość amplitudy odpowiadającej próbce w pełni nasyconej solanką (powierzchnia pod krzywą rozkładu T_2), obliczono amplitudę związaną z porowatością zajęta wodą nieruchomą

$$A_{nru} = A_c Kp_{nru} / Kp_{NMR} \quad (6)$$

gdzie:

- A_{nru} – amplituda rozkładu T_2 odpowiadająca wielkości przestrzeni porowej zajętej przez wodę nieruchomą,
- A_c – amplituda rozkładu T_2 odpowiadająca porowatości całkowitej.

Krok II

Wyznaczoną wielkość A_{nru} odniesiono do rozkładu T_2 , otrzymując wartość czasu granicznego T_{2G} (wartość czasu relaksacji poprzecznej, dla której amplituda kumulacyjna rozkładu T_2 próbki nasyconej w 100% jest równa amplitudzie A_{nru}).

CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁU BADAWCZEGO

Korelację pomiarów NMR i badań porozymetrycznych wykonano dla piaskowców i zlepieńców czerwonego spągowca z rejonu niecki poznańskiej.

W celu scharakteryzowania składu mineralnego i sposobu wykształcenia przestrzeni porowej badanych skał wykonano pomiary ilościowego składu mineralnego metodą rentgenowskiej analizy fazowej (dyfraktometr rentgenowski X'Pert MPD firmy Philips) oraz obserwacje w optycznym mikroskopie polaryzacyjnym (mikroskop Optiphot firmy Nikon) i skaningowym (mikroskop FEI QUANTA-200 FEG).

Skład mineralny badanych próbek jest stosunkowo mało zróżnicowany. Występują tutaj kwarc, skalenie, miki i minerały ilaste, niewielkie ilości (średnio 2–3%) węglanów i, miejscami, śladowe ilości (do 1%) hematytu i halitu oraz domieszki anhydrytu. Różnice w składzie mineralnym wiążą się głównie z litologią: zlepieńce i piaskowce zlepieńcowate zawierają mniejsze ilości kwarcu i większe ilości skaleni niż piaskowce jednorodne. Zaobserwowano również pewne zróżnicowanie regionalne: jednorodne piaskowce z otworów Bonikowo-2 i Parzęczewo-1 charakteryzują się najwyższymi zawartościami kwarcu, brakiem skaleni potasowych i kalcytu (Fig. 1). Piaskowce z rejonu Paproć – Cicha Góra i Czarna Wieś zawierają mniej kwarcu, więcej skaleni (w tym skalenie potasowe) i kalcyt (Fig. 2). Nie stwierdzono natomiast regionalnego zróżnicowania zawartości minerałów ilastych i innych minerałów zawierających jony żelaza (hematyt).

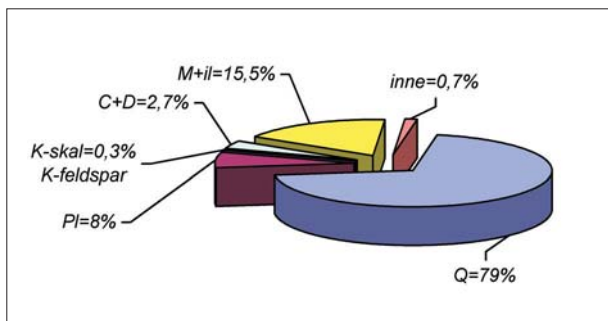


Fig. 1. Średni skład mineralny piaskowców z otworu Parzęczewo-1: Q – kwarc, C+D – kalcyt i dolomit, K-skal – skalień potasowy, Pl – plagioklaz, M+il – miki i minerały ilaste

Fig. 1. Average mineral content of the sandstones from the Parzęczewo-1 borehole: Q – quartz, C+D – calcite and dolomite, K-feldspar – potassium feldspar, Pl – plagioclase, M+il – micas and clay minerals

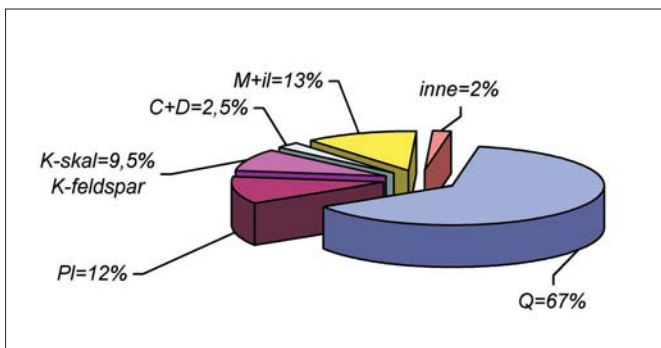


Fig. 2. Średni skład mineralny piaskowców z otworu Cicha Góra-7: Q – kwarc, C+D – kalcyt i dolomit, K-skal. – skalień potasowy, Pl – plagioklaz, M+il – miki i minerały ilaste

Fig. 2. Average mineral content of the sandstones from the Cicha Góra-7 borehole: Q – quartz, C+D – calcite and dolomite, K-feldspar – potassium feldspar, Pl – plagioclase, M+il – micas and clay minerals

Wszystkie badane skały charakteryzują się skomplikowanym wykształceniem przestrzeni porowej, co wiąże się z małą dojrzałością materiału detrytycznego budującego szkielet ziarnowy. Bliskość obszarów źródłowych (Wał Wolsztyński) i, co za tym idzie, krótkotrwały transport spowodowały, że materiał detrytyczny nie został dostatecznie wysortowany i obtoczony (Fig. 3A). Bardzo duży udział w szkielecie ziarnowym mają klasty skał wulkanicznych (Fig. 3B) oraz skalenie, które najprawdopodobniej dopiero w trakcie diagenety uległy degradacji (rozpuszczaniu i zastępowaniu przez minerały ilaste, przede wszystkim illit) (Fig. 3C, 3D). Dodatkowym czynnikiem wpływającym na zróżnicowanie przestrzeni porowej jest nierównomierna cementacja węglanami.

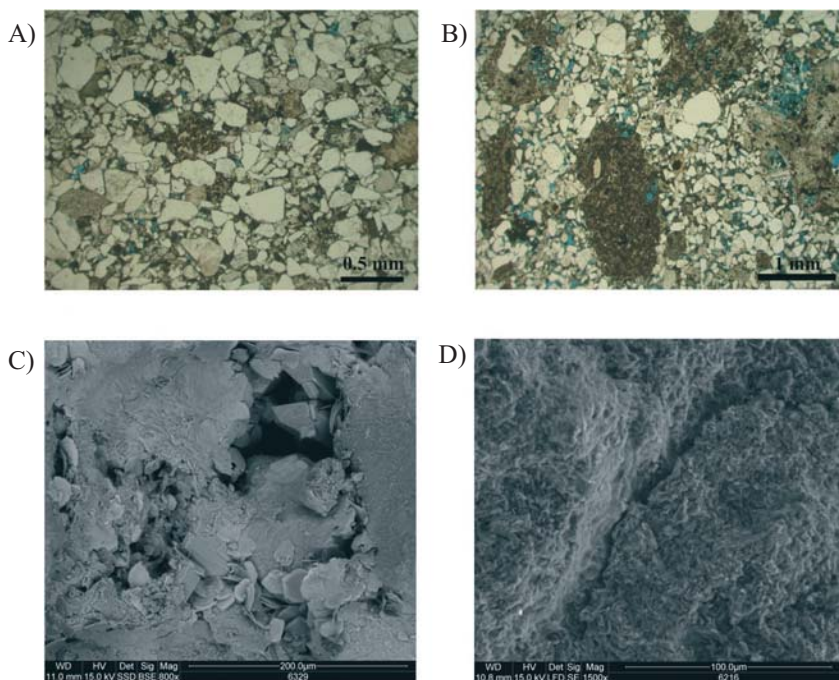


Fig. 3. Obserwacje w mikroskopie optycznym (A, B) i skaningowym (C, D): A) piaskowiec, ziarna detrytyczne słabo wysortowane i słabo obtoczone; B) piaskowiec z dużymi klastami wulkanitów; C), D) mikroporowatość powstała w wyniku rozpuszczania skaleni

Fig. 3. Observations in optical (A, B) and scanning (C, D) microscope: A) sandstone, angular and poorly sorted detrital grains; B) sandstone with big volcanic grains; C), D) microporosity due to feldspar dissolution

WYKONANE BADANIA

Badania NMR przeprowadzono dla 50 próbek z sześciu otworów wiertniczych z rejonu niecki poznańskiej. Próbki nasycono w próżni solanką o stężeniu 250 g/l. Pomiaru wykonano na spektrometrze Maran 7 wyposażonym w magnes stały generujący pole o natężeniu 0.186 T, co odpowiada częstotliwości precesji protonów 7.9 MHz.

Badania porozymetryczne wykonano dla tych samych próbek za pomocą porozymetru rtęciowego AutoPore 9220. Pomiary porozymetrii rtęciowej pozwoliły na wyznaczenie ciśnień kapilarnych i powiązanie ich z wielkością porów (równanie (2)).

Wyznaczenie rozmiarów porów na podstawie czasów relaksacji poprzecznej T_2

Porównanie krzywych rozkładów czasów T_2 i rozkładów wielkości porów przeprowadzono z wykorzystaniem opisanej powyżej metody Marshalla. Warunkiem umożliwiającym zastosowanie tej metody jest jednakowa gęstość próbkowania dla obu krzywych. W związku z tym wykonano aproksymację krzywej rozkładu wielkości porów za pomocą splinów, otrzymując taką samą gęstość próbkowania jak w wypadku krzywej rozkładu czasów T_2 .

Wartość relaksacyjności efektywnej uzyskano dla 35 próbek (Fig. 4), parametr ten charakteryzuje się dużą zmiennością: osiąga wartości od 4.4 $\mu\text{m/s}$ do 49.9 $\mu\text{m/s}$, średnia arytmetyczna wynosi 14.3 $\mu\text{m/s}$.

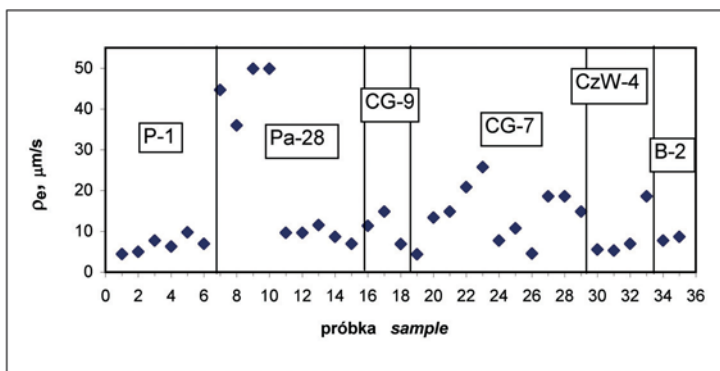


Fig. 4. Relaksacyjność efektywna badanych próbek: ρ_e – relaksacyjność efektywna

Fig. 4. The effective relaxivity of the investigated samples: ρ_e – effective relaxivity

Przykładowe zestawienie dopasowanych krzywych NMR i porozymetrycznej wraz z wyliczonymi wartościami relaksacyjności przedstawiono na figurze 5. Obserwowana zmienność relaksacyjności efektywnej ρ_e nie wykazuje związku ze zróżnicowaniem litologicznym (piaskowce, piaskowce zlepieńcowate, zlepieńce) ani mineralogicznym badanych skał. Natomiast widoczny jest wpływ wykształcenia przestrzeni porowej na wartość relaksacyjności. Najwyższymi wartościami relaksacyjności efektywnej (36–49.9 $\mu\text{m/s}$) charakteryzują się próbki o wyraźnej przewodzie dużych porów i gardzieli co zaznacza się w kształcie obu krzywych: T_2 i porozymetrycznej (Fig. 5, próbki 4955 i 4951).

Dla części próbek korelacja pomiarów NMR i porozymetrii rtęciowej okazała się niemożliwa ze względu na brak podobieństwa kształtu porównywanych krzywych (Fig. 6), w niektórych przypadkach krzywe te przyjmują wręcz odwrotny kształt. Taka sytuacja może być wynikiem braku stałego związku pomiędzy wielkością porów i gardzieli.

Ze względu na to, że pomiary porozymetrii rtęciowej były wykonane na próbkach o mniejszej objętości (fragment rdzenia badanego metodą NMR) istnieje możliwość, że brak korelacji krzywych jest wynikiem dużej zmienności własności petrofizycznych badanego ośrodka.

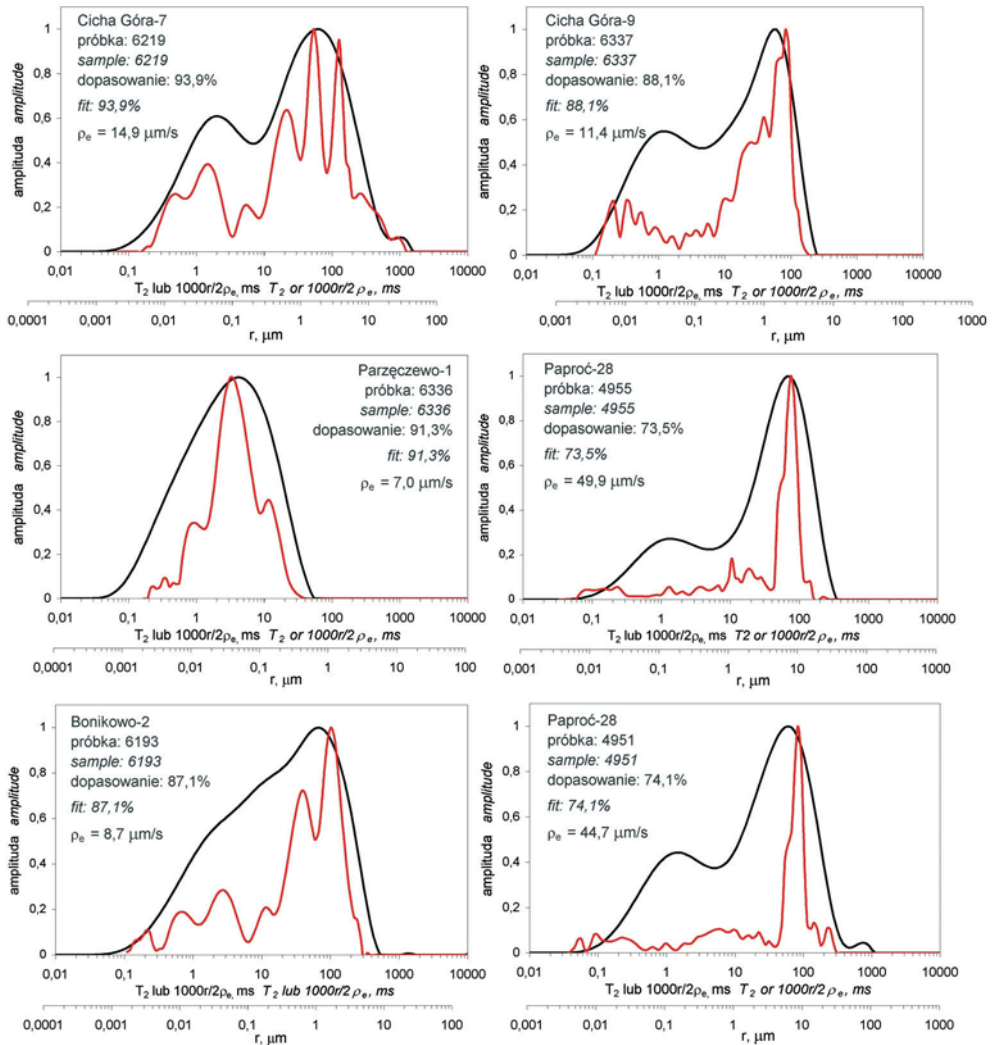


Fig. 5. Korelacja rozkładu czasów relaksacji poprzecznej T_2 (linia czarna) i rozkładu wielkości porów (linia czerwona): ρ_e – relaksacyjność efektywna, r – promień poru

Fig. 5. Correlation between the transverse relaxation time T_2 distribution (black line) and the pore size distribution (red line): ρ_e – effective relaxivity, r – pore radius

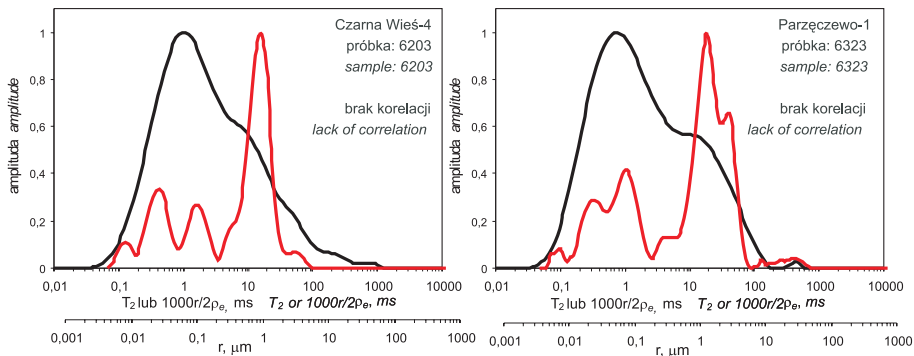


Fig. 6. Brak korelacji pomiędzy rozkładem czasów relaksacji poprzecznej T_2 (linia czarna) i rozkładem wielkości porów (linia czerwona): ρ_e – relaksacyjność efektywna, r – promień poru

Fig. 6. Lack of correlation between the transverse relaxation time T_2 distribution (black line) and the pore size distribution (red line): ρ_e – effective relaxivity, r – pore radius

Wyznaczenie parametru T_{2G}

Parametr T_{2G} wyznaczono, jak wspomniano powyżej, kierując się założeniem, że woda nieruchoma zajmuje pory o średnicy $< 1 \mu\text{m}$ (Nowak 2004). Przyjęte założenie potwierdza analiza krzywych ciśnień kapilarnych dla badanych próbek (Fig. 7).

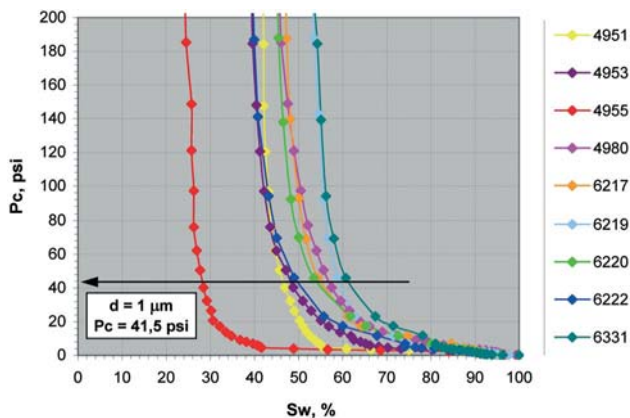


Fig. 7. Krzywe ciśnień kapilarnych badanych próbek. Ciśnienia rtęci przeliczone na ciśnienia solanki: P_c – ciśnienie kapilarne, d – średnica poru, S_w – nasycenie solanką

Fig. 7. Capillary pressure curves of the investigated samples. Air-Hg capillary pressure converted into air-brine capillary pressure: P_c – capillary pressure, d – pore diameter, S_w – brine saturation

W obliczeniach wykorzystano parametry uzyskane na podstawie badań porozymetrycznych: zawartość porów $> 1 \text{ mm}$ i porowatość z porozymetru (K_p), oraz pomiarów NMR: porowatość całkowita (K_{PNMR}) i wielkość amplitudy odpowiadająca porowatości całkowitej (A_c) (Tab. 1 na wklejce).

Parametr T_{2G} zmienia się w zakresie od 2.3 do 54 ms, zmienność taka związana jest ze zróżnicowaniem wykształcenia przestrzeni porowej badanych skał. Średnia wartość parametru T_{2G} wynosi 20.1 ms.

Przeprowadzono korelację przepuszczalności z porowatością dynamiczną uzyskaną dla T_{2G} wyznaczonego dla poszczególnych próbek (Fig. 8A) oraz z porowatością dynamiczną uzyskaną dla średniej wartości T_{2G} (Fig. 8B).

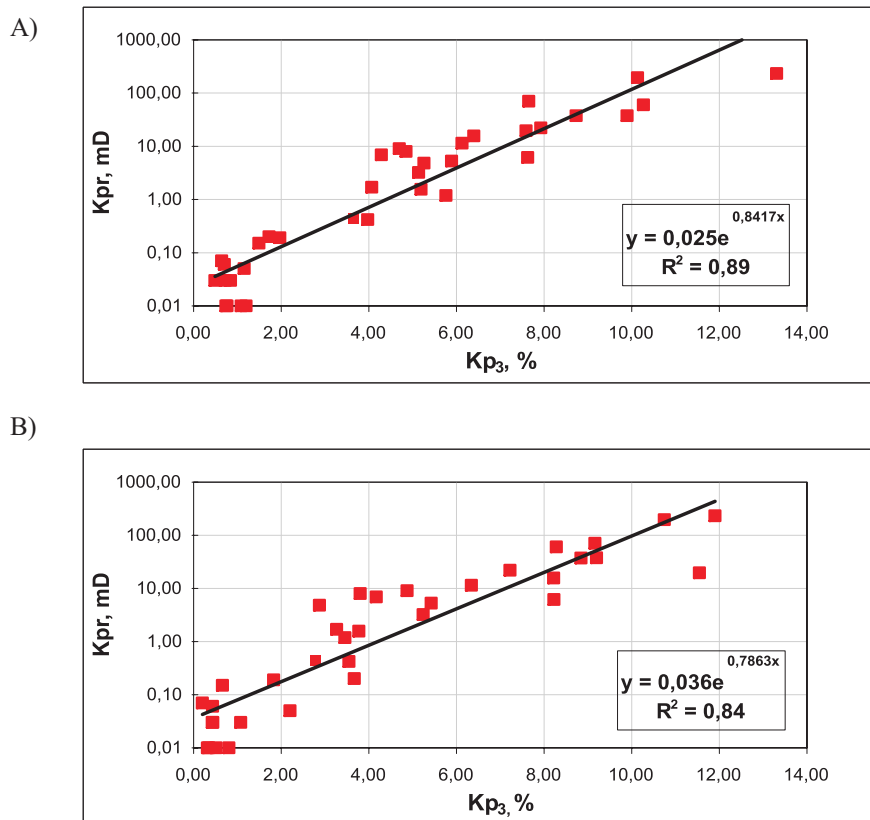


Fig. 8. Zależności pomiędzy: A) porowatością dynamiczną (Kp_3) oszacowaną dla czasu granicznego T_{2G} wyznaczonego dla poszczególnych próbek i przepuszczalnością (Kpr); B) porowatością dynamiczną (Kp_3) oszacowaną dla średniej wartości T_{2G} i przepuszczalnością (Kpr)

Fig. 8. Relationship between: A) dynamic porosity (Kp_3) calculated for T_{2G} determined for each sample and permeability (Kpr); B) dynamic porosity (Kp_3) calculated for average cutoff time T_{2G} and permeability (Kpr)

Zależności te charakteryzują się wysokimi współczynnikami korelacji. Porowatość dynamiczna obliczona dla T_{2G} wyznaczonego eksperymentalnie (wartość średnia oraz wartości dla poszczególnych próbek) koreluje z przepuszczalnością znacznie lepiej niż porowatość całkowita (Fig. 9).

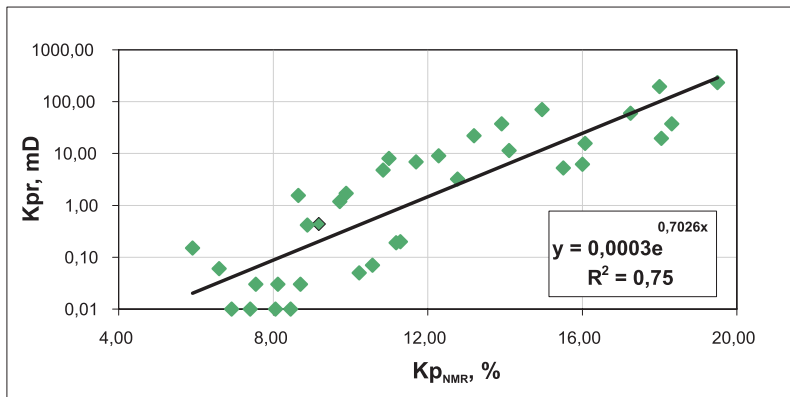


Fig. 9. Zależność pomiędzy porowatością całkowitą (Kp_{NMR}) a przepuszczalnością (Kpr)

Fig. 9. Relationship between total porosity (Kp_{NMR}) and permeability (Kpr)

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania miały na celu korelację pomiarów NMR i porozymetrii ręcznej pod kątem wyznaczenia wartości relaksacyjności efektywnej i rzeczywistej wartości czasu granicznego T_{2G} . Parametry te, określające – odpowiednio – rozkład wielkości porów i zawartość wody nieruchomej, bezpośrednio charakteryzują przestrzeń porową skał.

Jednoznaczne określenie wpływu poszczególnych czynników na wartość relaksacyjności efektywnej nie jest zadaniem łatwym z tego względu, że na parametr ten wpływ ma zarówno mineralogia, jak i wykształcenie przestrzeni porowej. W przypadku badanych skał mała zmienność mineralogiczna (zwłaszcza brak wyraźnego zróżnicowania zawartości minerałów ilastych i innych minerałów zawierających jony żelaza, np. hematyt) wskazuje na to, że duży rozrzut wartości relaksacyjności efektywnej jest związany z wykształceniem przestrzeni porowej. Również brak możliwości wyznaczenia tego parametru w części próbek (wynikający z braku zależności między rozmiarami gardzieli i porów) jest prawdopodobnie spowodowany skomplikowaną budową przestrzeni porowej: słabym wysortowaniem i obtoczeniem materiału ziarnowego, dużą ilością mikroporów związanych z rozpuszczaniem skałeni i obecnością minerałów ilastych oraz nierównomierną cementacją węglanami. Wpływ wykształcenia przestrzeni porowej na wartość relaksacyjności efektywnej potwierdza fakt, że kilka próbek o wyraźnie wyższych od pozostałych wartościach tego parametru charakteryzuje się odmiennym kształtem krzywych T_2 i porozymetrycznej, świadczącym o występowaniu systemu dość dużych porów i dobrym wysortowaniu materiału ziarnowego.

Wyznaczono rzeczywiste wartości czasu granicznego T_{2G} we wszystkich próbkach, w przypadku których istnieje podobieństwo kształtów krzywych NMR i porozymetrycznej. Próbki, w których nie stwierdzono korelacji pomiędzy krzywymi, odrzucono, ponieważ istnieje duże prawdopodobieństwo, że w ich przypadku wartość parametru T_{2G} oznaczona ilościowo na podstawie danych porozymetrycznych byłaby niewiarygodna. Poprawność oszacowanych eksperymentalnie wielkości parametru T_{2G} potwierdza dobra korelacja

przepuszczalności z porowatością dynamiczną uzyskaną dla T_{2G} wyznaczonego w odniesieniu do poszczególnych próbek oraz z porowatością dynamiczną uzyskaną dla średniej wartości T_{2G} .

Zależności te charakteryzują się zbliżonymi współczynnikami korelacji, co świadczy o tym, że obliczona wartość średnia T_{2G} może być stosowana w interpretacji pomiarów NMR w odniesieniu do próbek z badanego rejonu. Biorąc jednak pod uwagę duże zróżnicowanie (facjalne, mineralogiczne) skał czerwonego spągowca, należy być ostrożnym przy stosowaniu uzyskanej wielkości czasu granicznego T_{2G} w odniesieniu do skał z innych rejonów.

LITERATURA

- Coates G., Xiao L. & Prammer M., 1999. *NMR Logging Principles & Applications*. Haliburton Energy Services, USA, 1–233.
- Kenyon B., Kleinberg R., Straley C., Gubelin G. & Morriss C., 1995. Nuclear magnetic Resonance Imaging Technology for the 21st Century. *Oilfield Review*, 7, 3, 19–30.
- Kenyon W.E., 1997. Petrophysical Principles of Applications of NMR Logging. *The Log Analyst*, 2, 21–43.
- Klaja J. & Przelaskowska A., 2006. Badania zawartości wody nieruchomej metodą magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR) w piaskowcach o zróżnicowanej litologii. *Geologia* (kwartalnik AGH), 463–477.
- Kleinberg R.L., Farooqui S.A. & Horsfield M.A., 1993. T1/T2 ratio and frequency dependence of NMR relaxation in porous sedimentary rocks. *Journal of Colloid and Interface Science*, 158, 195–198.
- Marschall D., Gardner J.S., Mardon D. & Coates G.R., 1995. Method for correlating NMR relaxometry and mercury injection data. *Proceedings of the 1995 International Symposium of Core Analysts*, Paper 9511.
- Nowak J., 2004. Weryfikacja interpretacyjnych modeli dla wyznaczania przepuszczalności oraz nasycenia resztkowego skał. *Konferencja Naukowo-Techniczna Geopetrol „Efektywne technologie poszukiwania i eksploatacji złóż”*, Zakopane, 825–828.
- Straley C., Rossini D., Vinegar H.J., Tutunjan P. & Morriss C.E., 1997. Core Analysis by Low-Field NMR. *The Log Analyst*, 2, 84–94.
- Xie H. & Guihéneuf T., 2000. *NMR Logs: Low Field NMR and Rock Core Analysis*. Materiały szkoleniowe firmy ResLab, 1–11.
- Volokitin Y., Looyestijn J.W., Silberman F.W. & Hofman P.J., 2001. A practical Approach to Obtain Primary Drainage Capillary Pressure Curves from NMR Core and Log Data. *Petrophysics*, 42, 334–343.

Summary

Nuclear Magnetic Resonance (NMR), and Mercury Porosimetry measurements were correlated in order to determine the pore size distribution and the irreducible water content. The investigations were conducted for the Rotliegendes sandstones and conglomerates

from the south-western part of the Poznań Trough. In order to characterize mineralogy and pore space structure of the investigated rocks the quantitative X-RAY measurements (Figs 1, 2), optical (Fig. 3A, B) and scanning (Fig. 3C, D) microscope observations were done. Determination of the pore size distribution with the use of the NMR method requires introduction of an appropriate scaling factor which enables conversion of T_2 values into the pore dimensions. In the presented work the Marshall method (Marshall *et al.* 1995), in which effective relaxivity is used as the scaling factor, was introduced. The effective relaxivity value was determined by establishing the best fit between the transverse relaxation time (NMR) and pore size distribution curves (porosimetry). The effective relaxivity value was determined for 35 samples (Fig. 4), the variability (4.4–49.9 μm) of this parameter is connected with the diversity of the pore space structure of the investigated rocks. The highest values of the effective relaxivity were obtained for several samples from Paproć-1 borehole characterized by good reservoir and filtration properties (Fig. 5). Correlation between the NMR and Mercury Porosimetry measurements was impossible for part of the investigated samples because of lack of similarity between the transverse relaxation time and pore size distribution curves (Fig. 6). The cutoff time (T_{2G}) value was determined by applying the quantitative results of the porosimetry measurements to the transverse relaxation time (T_2) distributions. The T_{2G} values were established under an assumption that irreducible water is contained in pores lower than 1 mm. This assumption was confirmed by the analysis of the capillary pressure curves of the investigated samples (Fig. 7). The parameters obtained with the use of the porosimetry method: content of pores greater than 1 mm and porosimeter porosity (Kp_{por}), and with the use of the NMR method: total porosity (Kp_{NMR}) and the amplitude value reflecting the total porosity (A_c) (Tab.1) were used in the calculations. The relations between permeability and dynamic porosity calculated with the use of the experimental values of T_{2G} obtained for each sample (Fig. 8A) and the average T_{2G} value (Fig. 8B) are characterized by high correlation coefficients ($R^2 = 0.89; 0.84$). The correlations between the dynamic porosity calculated with the use of the experimental values of T_{2G} and permeability are much better than correlation between total porosity and permeability (Fig. 9). The obtained results show that average T_{2G} value can be used in the interpretation of the NMR measurements for samples from the investigated area. Taking into consideration great diversity (mineralogical, facial) of the Rotliegendes sandstone one should be careful when using the obtained T_{2G} value for rocks from other areas.

Tabela (Table) 1
Zestawienie parametrów wykorzystywanych w obliczeniach T_{2G}
Parameters used in the calculation of the T_{2G} values

Nr próbki <i>No of sample</i>	Kp_{por} [%]	Ilość porów > 1 μm <i>Quantity of pores > 1 μm</i> [%]	Kp_{NMR} [%]	Kp_{nru} [%]	A_c	A_{nru}	T_{2G} [ms]
BONIKOWO-1							
6192	14.34	69	18.32	8.42	46467	21367	14.0
6193	14.26	72	17.25	6.98	43204	17486	9.5
CICHA GÓRA-7							
6216	3.43	10	7.55	7.20	20011	19102	28.1
6217	9.29	66	14.10	7.97	36757	20777	53.9
6219	9.01	71	16.07	9.68	35930	21631	34.9
6220	7.70	63	11.00	6.14	29029	16221	10.6
6222	9.23	57	10.85	5.59	28656	14758	5.5
6224	8.58	50	11.70	7.41	31110	19700	18.2
6225	9.03	52	12.28	7.59	31562	19495	22.6
6234	7.10	56	8.89	4.91	23161	12798	13.1
6236	6.81	16	8.06	6.97	22049	19068	9.5
6238	5.10	15	6.92	6.16	18391	16358	6.8
6240	9.62	12	10.22	9.07	27236	24160	48.4
CICHA GÓRA-9							
6337	9.69	53	12.77	7.63	35248	21072	20.3
6339	4.14	36	5.91	4.42	16307	12197	7.6
6342	7.15	9	10.57	9.92	28797	27043	10.6
CZARNA WIEŚ-4							
6201	3.70	19	6.60	5.90	16879	15082	6.1
6202	7.42	70	8.65	3.45	22570	9013	4.0
6204	10.57	75	13.20	5.27	33212	13265	13.1
6207	10.92	80	13.91	5.18	36691	13655	27.0
PAPROĆ-28							
4951	9.81	78	14.96	7.30	39701	19388	34.9
4953	12.11	63	16.00	8.37	44332	23193	22.6
4955	16.23	82	19.50	6.19	50692	16089	11.8
4959	12.99	78	18.00	7.86	46688	20401	25.2
4968	7.04	28	11.18	9.21	31379	25847	18.2
4973	5.62	15	8.71	7.86	26092	23566	28.1
4976	6.00	7	8.45	8.03	23333	22173	11.8
4980	12.05	63	18.05	17.08	49017	28398	53.9
4985	10.13	17	11.29	9.57	31249	26484	38.9
PARZĘCZEWO-1							
6324	8.33	44	9.18	5.51	27636	16598	9.5
6325	7.39	55	9.89	5.82	28431	16742	22.6
6326	9.29	62	9.72	3.96	27731	11298	2.3
6331	12.02	49	15.51	9.62	43800	27168	14.6
6335	5.30	14	7.41	6.67	21722	19546	28.1
6336	6.98	7	8.12	7.63	23468	22056	18.2

Kp_{por} – porowatość z porozymetru, $por > 1 \mu m$ – zawartość porów większych od 1 μm , Kp_{NMR} – porowatość całkowita określona metodą NMR, Kp_{nru} – wielkość przestrzeni porowej wypełnionej wodą nieruchomą, A_c – amplituda rozkładu T_2 odpowiadająca porowatości całkowitej, A_{nru} – amplituda rozkładu T_2 odpowiadająca przestrzeni porowej wypełnionej wodą nieruchomą.

Kp_{por} – porosity, $por > 1 \mu m$ – content of pores greater than 1 μm , Kp_{NMR} – total porosity determined by the NMR method, Kp_{nru} – pore space containing irreducible water, A_c – amplitude value reflecting the total porosity, A_{nru} – amplitude value reflecting the pore space containing irreducible water.