

Profilowanie otworowe z wykorzystaniem zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego i badania NMR na próbkach skalnych dla oceny skał zbiornikowych

Jadwiga Jarzyna¹, Dagmara Maziarka¹, Piotr Pasek²,
Jolanta Klaja³, Paulina Krakowska¹, Edyta Puskarczyk¹



J. Jarzyna



D. Maziarka



P. Pasek



J. Klaja



P. Krakowska



E. Puskarczyk

Results of MRIL well logging and NMR laboratory experiments for reservoir rocks evaluation. Prz. Geol., 65: 109–121.

Abstract. Results of NMR well logging and laboratory experiments were analyzed. The testing material comprised NMR data from the Upper Jurassic carbonates formation from a well located in the western part of the Carpathian Foredeep. Qualitative analysis of the T_1 (longitudinal) and T_2 (transverse) distributions from the NMR well logging was performed to illustrate differences in the plots regarding time position and amplitude of peaks in sandstones, carbonates and claystones. Quick identification of the reservoir zones in the borehole section was highlighted. Porosity values from NMR laboratory experiments, helium pycnometer measurements and NMR well logging were compared and the differences were explained emphasizing additional information derived from discrepancies. Permeability was calculated based on the NMR laboratory experiment results comprising free water, capillary-bound water and clay-bound water. NMR permeability calculations were compared with the results of Zawisza formula calculations and results presented by Halliburton Co. The permeability results were different, but the trend of the changes was similar. The analysis shows that NMR logging is very useful in the qualitative and quantitative interpretation of reservoirs despite the difference between the point laboratory results and continuous curves of logging outcomes. The final conclusion is as follows: to complete proper interpretation of very informative NMR laboratory and well logging data the full information about calibration of measurements should be available.

Keywords: Nuclear Magnetic Resonance (NMR), laboratory experiments, well logging, reservoir properties of rocks

Dzięki bliskiej współpracy Geofizyki Kraków SA i Geofizyki Toruń SA z firmą Halliburton polskie przedsiębiorstwa poszukujące i eksploatujące węglowodory dysponują pełną ofertą nowoczesnych pomiarów geofizyki wiertniczej. PGNiG SA korzysta szeroko z tej oferty, w szczególności w odwiertach poszukiwawczych, gdzie bardzo ważne jest pozyskanie jak najszerszej informacji geologicznej. Profilowania z wykorzystaniem zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego, w szczególności sondami MRIL firmy Halliburton, należą do takiej grupy pomiarów, obok spektrometrycznego profilowania neutron-gamma, realizowanego sondą GEMTM, czy wysokoczęstotliwościowego profilowania dielektrycznego, przeprowadzanego sondą HFDTTM. Profilowania elektrycznego obrazowania ściany otworu, czy nowoczesne pomiary akustyczne sondami ze źródłami dipolowymi, od kilku lat są standardowo wykonywane w większości otworów poszukiwawczych. Nowoczesne sondy dają wyniki uzupełniające i rozszerzające grupę parametrów petrofizycznych, uzyskiwanych standardowymi zestawami pomiarowymi. Sonda MRIL poszerza informację o ośrodku skalnym w grupie parametrów zbiornikowych. Sondy MRIL-XLTM, MRIL®-Prime oraz MRIL®-Prime

Slim należą do rozwiązań z rodziny sond firmy Halliburton. Pomiary, wykorzystane w prezentowanej analizie, były wykonane sondą MRIL®-Prime.

Celem pracy jest pokazanie, że otworowe profilowania z wykorzystaniem zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego wnoszą nową, bogatszą informację w porównaniu do wyników badań laboratoryjnych na próbkach skał. Podkreślono także, że punktowe wyniki badań laboratoryjnych mają inną pionową rozdzielczość w porównaniu z wynikami otworowymi, zatem porównanie danych z obu źródeł nie może być wykonane bez procesu skalowania.

METODY BADAWCZE

Profilowanie magnetycznego rezonansu jądrowego

Pomiar z wykorzystaniem zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR – Nuclear Magnetic Resonance) zarówno w otworze, jak i na próbkach w laboratorium jest stosunkowo nową metodą wyznaczania parametrów zbiornikowych skał. Dostarcza informacji o wielkości przestrzeni porowej, mediach ruchomych i zamkniętych w

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geofizyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; jarzyna@agh.edu.pl, dagmara.maziarka@gmail.com, puskar@agh.edu.pl.

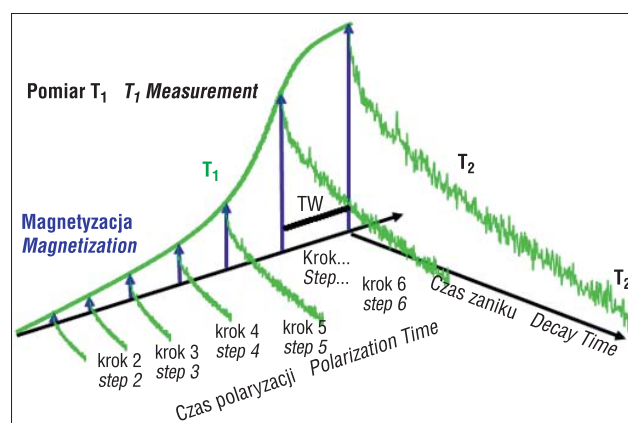
² Geofizyka Kraków SA, ul. Łukasiewicza 3, 31-429 Kraków; piotr.pasek@gk.com.pl.

³ Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków; klaja@inig.pl.

porach skał oraz w minerałach ilastych, ze względu na ich strukturę. Porowatość ogólna, wyznaczona na podstawie pomiarów NMR, jest wolna od wpływu litologii, co odróżnia ją od analogicznych wielkości wyznaczonych z użyciem innych metod, np. profilowań akustycznego, gęstościowego i neutronowego. W trzech ww. metodach do wyznaczania porowatości ogólnej należy wprowadzić informację o parametrach szkieletowych, np. czasie interwałowym, gęstości, czy porowatości neutronowej minerałów budujących skałę. W skomplikowanych, wielomineralnych formacjach skalnych podanie dokładnych wartości tych parametrów jest bardzo trudne i wymaga użycia spektrometrycznego profilowania neutron-gamma, wykonanego np. sondą GEM™ (Halliburton Co.), celem dokładnego wyznaczenia objętościowego składu szkieletu mineralnego. Porowatość efektywna, wyznaczona z użyciem metody NMR, nazywana również dynamiczną, także różni się od analogicznej wielkości wyznaczonej z profilowań oporności, ze względu na inne fizyczne podstawy obu metod (relaksację jąder wodoru w przypadku NMR i przewodzenie prądu elektrycznego, dzięki ruchowi jonów w porach skały w profilowaniach oporności).

Pomiar sondami MRIL jest realizowany na podstawie indywidualnie dobranego programu działania. Podstawowe programy sondy MRIL mierzą czas T_2 , bez możliwości rekonstrukcji rozkładu czasu T_1 . Program sondy MRIL®-Prime, dobrany dla odwiertu Ł-4, pozwolił na wykonanie szeregu pomiarów T_2 , przy zmiennym czasie oczekiwania TW. Dla każdego pomiaru dobierano także liczbę rejestrowanych ech spinowych, żeby móc wykonać pełną rekonstrukcję czasu T_1 . Najdłuższy czas oczekiwania dobrany dla odwiertu Ł-4 wynosił $TW = 12,034$ s w celu zapewnienia pełnej relaksacji protonów wodoru we frakcji gazowej (Maciej Kozłowski Halliburton Co. – informacja ustna, 2015). Zielona, wygładzona linia na rycinie 1 oznacza zrekonstruowany czas T_1 na podstawie pomiarów T_2 . Kolorem niebieskim na tej rycinie zostały oznaczone poszczególne kroki pomiarowe. Największą amplitudę początkową ma pomiar z najdłuższym czasem oczekiwania.

W interpretacji pomiarów NMR wykorzystuje się czasy relaksacji podłużnej (T_1) i poprzecznej (T_2), których zróżnicowanie, w zależności od umiejscowienia w skałe minerałów zawierających wodór, jest wyraźne (Hennel & Klinowski, 2000). Pozwala ono rozróżnić części mierzonego sygnału, pochodzące od jąder wodoru występujących w minerałach ilastych, zamkniętych w porach o średnicach kapilarnych, czy relaksujących swobodnie w dużych porach i szczelinach, umożliwiających swobodny wpływ mediów (Coates i in., 1999). W procesie relaksacji jąder atomów budujących płyny wypełniające przestrzeń porową są zaangażowane trzy niezależne mechanizmy: relaksacja objętościowa, powierzchniowa i dyfuzja (Coates i in., 1999; Klaja & Kulinowski, 2008; Jarzyna i in., 2015). Wszystkie powyższe procesy występują jednocześnie. Oznacza to, że wielkości T_1 oraz T_2 w płynach mogą być przedstawione jako sumy odpowiednich składników, opisujących wyżej wymienione mechanizmy (Balliet, 2011). Bardzo istotną zaletą profilowania NMR w otworze jest także szybka ocena stref produkcyjnych na podstawie obserwacji rozkładów czasów relaksacji T_1 i T_2 w profilu otworu. Warte podkreślenia jest również możliwość uzyskania ciągłego



Ryc. 1. Otworowy pomiar NMR, rejestracja czasu relaksacji T_2 i krzywa odbudowy czasu T_1 (zielona, wygładzona linia)

Fig. 1. NMR well logging, recording of relaxation time T_2 and reconstruction curve of T_1 time (green, smoothed line)

profilowania przepuszczalności, na podstawie pomierzonych rozkładów czasów relaksacji T_2 .

Pomiary laboratoryjne

W przeprowadzonych analizach wykorzystano standardowe wyniki badań laboratoryjnych, udostępnione w dokumentacji otworu Ł-4, w postaci: gęstości i gęstości objętościowej, pomierzonych piknometrem helowym Accupyc (firmy Micromeritics Inc.) oraz porowatości całkowitej, a także przepuszczalności fizycznej, wyznaczonej przy użyciu przepuszczalnościomierza TEMCO. Laboratoryjne pomiary z wykorzystaniem zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego wykonano spektrometrem Maran 7, 7,9 MHz (firmy Resonance Instruments). Próbkę były wysuszone, następnie nasycone solanką o stężeniu NaCl 50 g/dm³ (Dokumentacja otworu Ł-4, 2011).

OBSZAR BADAŃ

W pracy uwzględniono wyniki profilowań otworowych oraz laboratoryjnych z otworu Ł-4, zlokalizowanego w strefie nasuwczej Łątki. Zgodnie z regionalizacją fizyczno-geograficzną otwór znajduje się na terenie Pogórza Wiśnickiego, w powiecie bocheńskim (ryc. 2), w rejonie Łapanów, Lipnica Murowana, Tymowa. Otwór Ł-4 przewiercił osady czwartorzędowe, utwory fliszu karpackiego, miocenu, jury, triasu oraz permu i karbonu (tab. 1).

W strefie nasuwczej Łątki PGNiG SA prowadziło prace sejsmiczne i wiertnicze, głównie ukierunkowane na rozpoznanie kompleksów piaszczysto-ilastych miocenu i cenomanu oraz stropowych partii węglanowych osadów jury górnej (Florek i in., 2006). Głównym poziomem zbiornikowym dla złóż gazu w tej części Karpat fliszowych są iłowcowo-mułowcowo-piaszkowcowe osady miocenu. Drugim interesującym poziomem są utwory wieku mezozoicznego, czyli piaszkowcowe osady cenomanu i węglanowe utwory jury górnej. W tym rejonie, w utworach mezozoiku, dotychczas udokumentowano tylko pojedyncze złożo gazu ziemnego Łątki. Przypuszcza się, że w strefie nasuwczej mogą znajdować się jeszcze inne złoża. Wyniki prac sejsmicznych (Opracowanie, 2008) umożliwiły stwierdzenie nowych struktur, potencjalnie nasyconych węglowodorami, o budowie geologicznej podobnej do złoża Łątki. Jedną



Ryc. 2. Lokalizacja otworu Ł-4 (www.maps.google.com)
Fig. 2. Location of the Ł-4 well (www.maps.google.com)

Tab. 1. Profil litostratygraficzny w otworze Ł-4 wg bazy PITAKA
Table 1. Lithostratigraphic profile of Ł-4 well after PITAKA database

| Strop Top [m] | Spąg Base [m] | Miaższność Thickness [m] | Stratygrafia Stratigraphy | Litologia Lithology |
|---------------|---------------|--------------------------|----------------------------------|---|
| 0 | 10 | 10 | czwartorzęd Quaternary | gliny, iły, piaski, żwiry loams, clays, sands, gravels |
| 10 | 1585 | 1575 | flisz karpacki Carpathian Flysch | łupki, iłowce, piaskowce shales, claystones, sandstones |
| 1585 | 1775 | 190 | miocen Miocene | iłowce, mułowce, piaskowce claystone, mudstone, sandstone |
| 1775 | 2099 | 324 | jura górna Upper Jurassic | wapienie, wapienie dolomityczne, dolomity limestones, dolomitic limestones, dolomites |
| 2099 | 2145 | 46 | jura środkowa Middle Jurassic | piaskowce, mułowce, iłowce sandstones, mudstones, claystones |
| 2145 | 2394 | 249 | trias + perm Triassic + Permian | łupki, piaskowce, mułowce shales, sandstones, mudstones |

z lepiej udokumentowanych jest struktura Łapanowa, zlokalizowana przy tej samej dyslokacji nasuwczej, co złożo Łąktka. Na strukturze Łapanów zrealizowano otwór poszukiwawczy Ł-1 do głębokości 2250 m, w którym uzyskano przemysłowy przyływ gazu ziemnego z węglanowych utworów jury górnej (Florek i in., 2006).

WYNIKI POMIARÓW

Profilowania geofizyki otworowej stanowiły podstawę jakościowej i ilościowej analizy formacji skalnej. Wykonano zestaw standardowych profilowań obejmujący profilowanie naturalnej promieniotwórczości w wersji podstawowej (GR) i spektrometrycznej (GKUT), profilowanie litologiczno-gęstościowe (Pe i RHOB), neutronowe (NPHI), oporności (LLD, LLS i MSFL), akustyczne (DT) i średnicy (CAL). Przy analizach wykorzystano także wyinterpretowaną oporność strefy niezmiennionej – Rt i strefy przemycanej – Rxo. W interwale 1698,0–2020,1 m wykonano profilowanie magnetycznego rezonansu jądrowego sondą MRIL®-Prime (Halliburton). Odcinek pomiarowy MRIL® objął spagową część formacji mioceńskiej (1698–1775 m) oraz stropową

część jury górnej (1775,0–2020,1 m) (tab. 1). Wykonano pomiar i łączną interpretację czasu relaksacji podłużnej T_1 oraz poprzecznej T_2 . Korelacje pomiędzy poszczególnymi parametrami, pochodzącymi zarówno z badań laboratoryjnych, jak i profilowań otworowych, pozwoliły na jakościową i ilościową charakterystykę badanych formacji skalnych. Szczegółowe analizy wykonano w utworach miocenu (iłowce, mułowce i piaskowce) oraz jury górnej (wapienie, wapienie dolomityczne i dolomity).

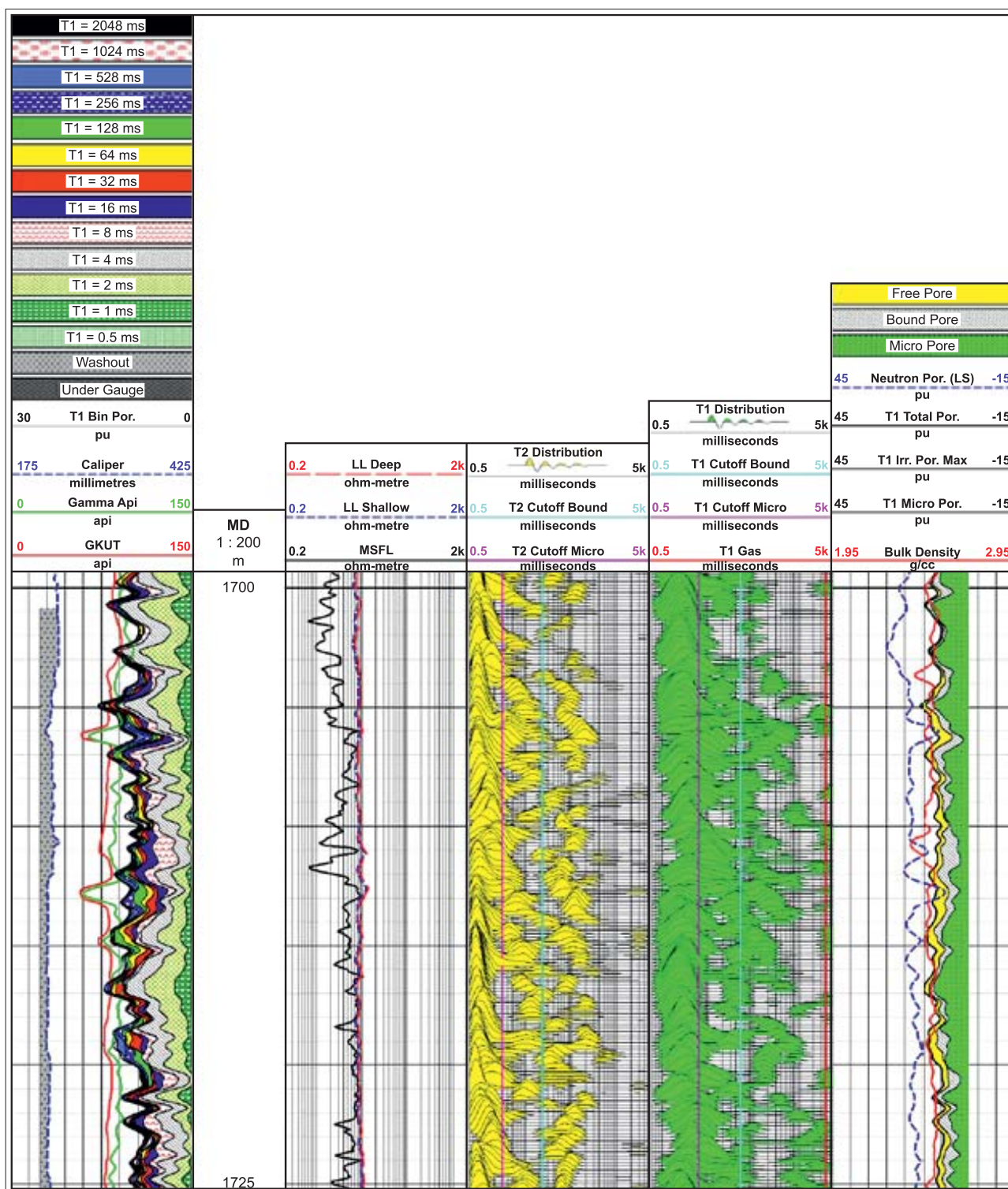
Badania laboratoryjne wykonano na rdzeniach wiertniczych, pochodzących z głębokości 1678–3000 m. Najliczniejszą grupę stanowiły próbki skał jurajskich (17 próbek, w tym 14 reprezentujących jurę górną i trzy reprezentujące jurę środkową). Wśród próbek znalazło się siedem pochodzących z triasu i permu oraz 12 próbek karbońskich (karbon dolny). Najmniej liczną grupę stanowiły próbki mioceńskie (2). Wyniki analiz laboratoryjnych dotyczyły następujących parametrów: δ_r – gęstość, δ_b – gęstość objętościowa, K_p – współczynnik porowatości całkowitej, K – przepuszczalność absolutna, K_{p1} – zawartość wody nieredukowalnej, K_{p2} – zawartość wody kapilarnej, K_{p3} – zawartość wody wolnej, $K_{pNMR\text{eff}}$ – współczynnik porowatości efektywnej z NMR, K_{pNMR} – współczynnik porowatości ogólnej z NMR, $S_{w\text{nr}}$ – współczynnik nasylenia wodą nieredukowalną z pomiaru NMR.

ANALIZA I INTERPRETACJA DANYCH

Interpretacja jakościowa profilowania otworowego MRIL

W pierwszym etapie przeprowadzono jakościową analizę wyników pomiarów sondą MRIL, skupiając się na zróżnicowaniu rozkładów czasów relaksacji T_1 i T_2 w zależności od litologii.

Obserwuje się wyraźną zmienność rozkładów (kolumny czwarta i piąta na rycinie 3 (także ryc. 5 i 7). W ostatniej kolumnie wykresów występują kolorowe obszary, w których na zielono zaznaczono część porowatości obejmującą mikropory. W osadach piaskowcowo-iłowcowych do tej grupy można zaliczyć sygnał rejestrowany na krótkich czasach, która odpowiada wodzie związanej w iłach. W utworach węglanowych nie ma wody związanej w iłach, ale może także występować mikroporowatość. Odpowiada jej sygnał o bardzo krótkich czasach relaksacji T_1 i T_2 . W ostatniej kolumnie szarym kolorem jest zaznaczony obszar odpowiadający wodzie związanej w porach kapilarnych. Suma obszarów zielonego i szarego oznacza objętość wody związanej w minerałach iłastych oraz w porach o średnicach kapilarnych. Woda swobodna (*free fluid index* – FFI) jest oznaczona kolorem żółtym, jest to obszar między wykresem porowatości ogólnej i wody związanej. Składowe części sygnału T_1 są prezentowane w pierwszej kolumnie rycinie 3 (także ryc. 5 i 7). Wyraźnie widać rozróżnienie kolorystyczne sygnału odpowiadającego zróżnicowanym czasom relaksacji. Położenie pików na skali czasowej, wyrażonej w milisekundach, wyraźnie koresponduje



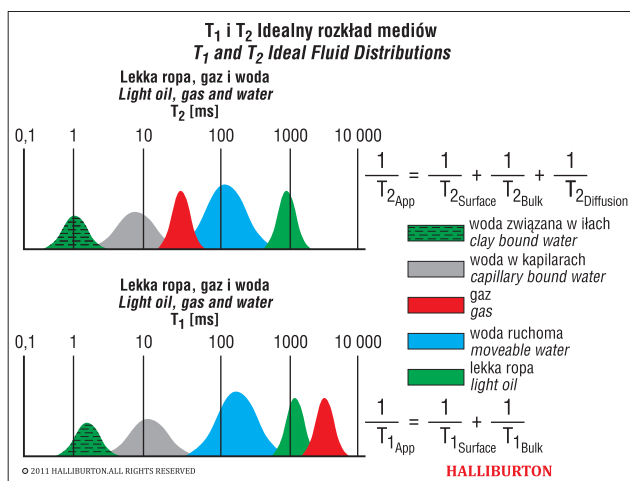
Ryc. 3. Fragment zapisu profilowania sondą MRIL w iłowcowo-piaskowcowych utworach miocenu, interwał głębokości 1700–1725 m
Fig. 3. Part of the MRIL log in the Miocene shaly-sandy deposits, depth interval 1700–1725 m

z kolorowymi fragmentami wykresów na wspomnianych rycinach w kolumnie pierwszej. Ideę rozdziału czasów relaksacji T_1 i T_2 na części odpowiadające relaksującym jądrom wodoru, obecnym w określonych mediach, ilustruje rycina 4 (Balliet, 2011).

Położenie pików, odpowiadającego obecności gazu w rycinie 4 jest wyraźnie różne dla T_1 i T_2 , podczas gdy w przypadku pozostałych mediów piki są zlokalizowane prawie w tych samych interwałach na osi czasu. Zróznicowa-

ne położenie pików na wykresach T_1 i T_2 dla gazu jest wykorzystane do jakościowej analizy obu czasów relaksacji w aspekcie identyfikacji potencjalnych stref zawierających gaz (Balliet, 2011; Romero, 2013a). Maksima pików T_1 są przesunięte w stronę większych wartości czasu.

Utwory węglanowe jury górnej charakteryzują się niewielkim zaileniem. Można to prześledzić na wykresach profilowania gamma GR i GKUT na rycinie 5 (w pierwszej kolumnie). Minimalny jest również udział mikroporów



Ryc. 4. Czasy relaksacji T_1 i T_2 , rejestrowane podczas profilowania NMR w otworze, z zaznaczeniem odcinków, w których dominuje sygnał pochodzący od wody związanej w ilach (*clay-bound water*), wody związanej w porach o średnicach kapilarnych (*capillary-bound water*), wody swobodnej (*moveable water*), gazu (*gas*) i lekkiej ropy (*light oil*) (wg Ballieta, 2011, zmieniony)

Fig. 4. Relaxation times T_1 and T_2 , recorded during the NMR well logging, indicating sections in which dominant signal comes from the clay-bound water, capillary-bound water, moveable water, gas and light oil (after Balliet, 2011, modified)

i porów o średnicach kapilarnych w prezentowanym fragmencie utworów jury górnej. Na rycinie 5 w szóstej kolumnie przeważa kolor żółty, wskazujący na obecność mediów swobodnie wypływających ze skały. Porowatość zmierzona na próbkach w tym interwale jest wysoka (dla $H = 1792,25$ m $K_{pNMR} = 16,43\%$, a dla $H = 1794,65$ m $K_{pNMR} = 13,56\%$, natomiast wartości wyinterpretowane z profilowania MRIL wynoszą odpowiednio: 9,78 i 7,39%) (Dokumentacja otworu Ł-4, 2011).

Fragment utworów węglanowych, prezentowany na rycinie 5, charakteryzuje się także niskim współczynnikiem nasycenia wodą (nawet 20%), wskazującym na możliwe nasycenie gazem. Firma Halliburton wykonała mapę wartości T_1 i T_2 (ryc. 6; Balliet, 2011), na której wyraźnie widać obecność gazu. Mapa i wykresy obszarów prezentujących części sygnału o określonych wartościach T_1 w prezentacji 1D (Straley i in., 1997; Balliet, 2011; Romero, 2013a) są wynikami pomiarów, które pozwalają na szybką, jakościową ocenę właściwości zbiornikowych i zdolności produkcyjnych formacji.

Obraz rozkładów czasów relaksacji T_1 i T_2 w ilastych utworach miocenu zilustrowano na rycinie 7. W szóstej kolumnie przeważa kolor zielony, wskazujący na obecność wody w mikroporach, w minerałach ilastych w postaci wody związanej lub grup hydroksylowych.

Na rycinach 3, 5 i 7 obserwuje się zmiany kształtu i położenia maksimum rozkładów czasów relaksacji T_1 oraz T_2 . Na wykresach, w czwartej i piątej kolumnie wprowadzono linie odcięcia (*cutoff*) ograniczające strefy czasowe mikroporów oraz porów kapilarnych. Na wykresie T_1 (kolumna piąta) zaznaczono także linię odcięcia dla gazu (ok. 3800 ms). W utworach klastycznych (ryc. 3 i 7) wartości czasów odcięcia wynosiły odpowiednio: dla mikroporów $T_1 = 6$ ms, a $T_2 = 3$ ms. Dla wody związanej w porach kapilarnych $T_1 = 50$ ms, a $T_2 = 22$ ms. W utworach węglanowych (ryc. 5) wartości czasów odcięcia wynosiły odpowiednio:

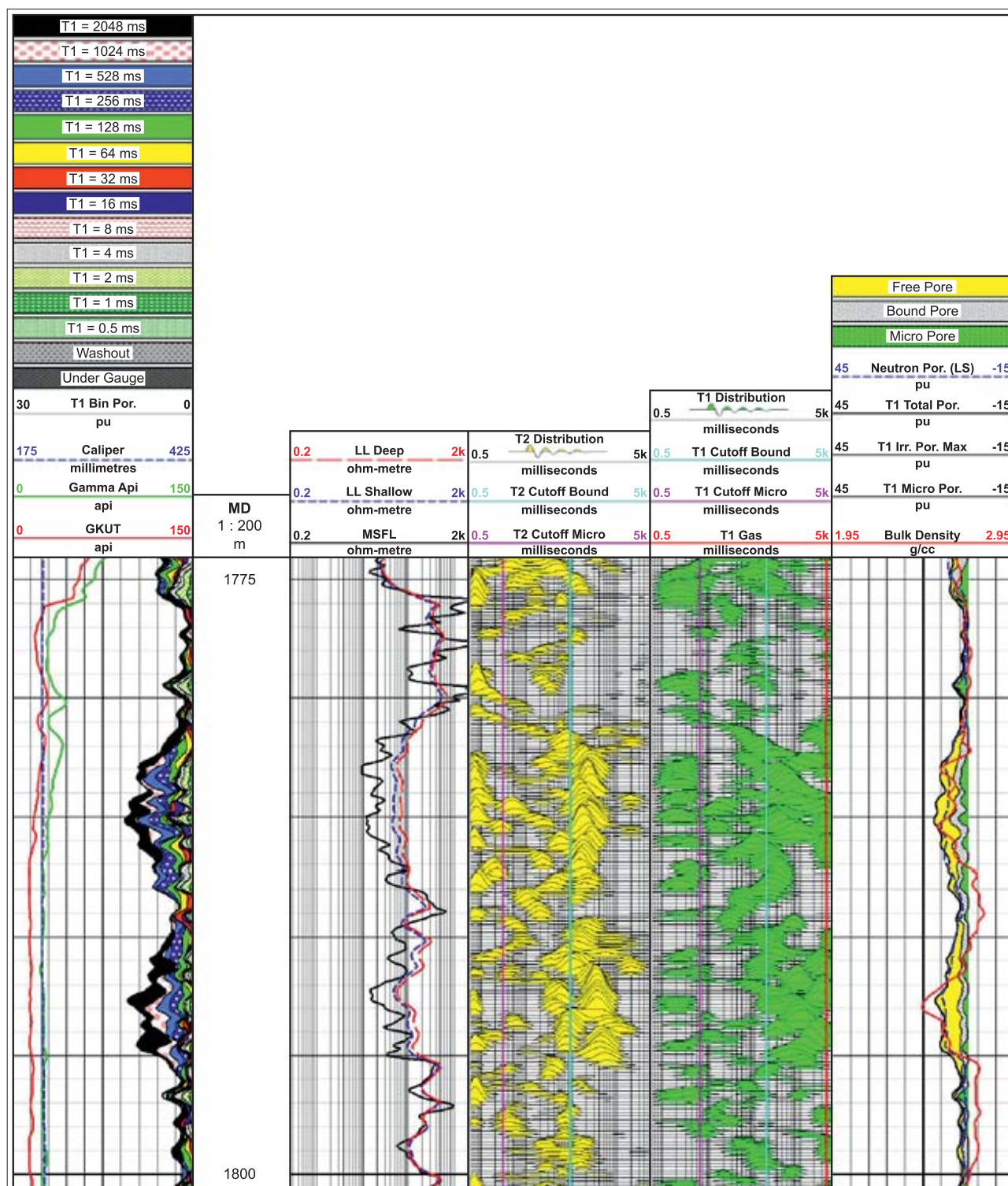
dla mikroporów $T_1 = 6$ ms, a $T_2 = 3$ ms, dla wody związanej w porach kapilarnych $T_1 = 200$ ms, a $T_2 = 90$ ms. Wartości czasów odcięcia są dobierane na podstawie wyników badań laboratoryjnych i doświadczenia interpretatora (Puskarczyk, 2011; Romero, 2013b). Wartości prezentowane w pracy były dobrane przez zespół interpretatorów Geofizyki Krańców SA i Halliburton Co. Wykresy te są podstawą szybkiej oceny zdolności produkcyjnych formacji. Skupienie maksimum rozkładów T_1 i T_2 w odcinkach o krótkich czasach poniżej linii odcięcia dla mikroporów i wody związanej, wskazuje na obecność wody zamkniętej w minerałach ilastych i porach o średnicach kapilarnych (ryc. 7). Ośrodek skalny o takiej charakterystyce nie jest traktowany jako dobra skała zbiornikowa.

Porównanie porowatości z badań laboratoryjnych i pomiarów otworowych

Porównanie porowatości ogólnej z badań laboratoryjnych, będącej wynikiem eksperymentu NMR (z wykorzystaniem zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego) i standardowych pomiarów z użyciem piknometru helowego wykazuje dużą zgodność (ryc. 8). Pomiarzy zostały wykonane w tych samych próbkach. Analizy przeprowadzono jedynie w interwale pomiarowym objętym profilowaniem MRIL. Obserwowano podwyższone wartości porowatości ogólnej z pomiaru piknometrem helowym w porównaniu z wynikiem z eksperymentu NMR. Zestawienie porowatości ogólnej i efektywnej z eksperymentu NMR wykazuje bardzo dużą zbieżność, co jest wynikiem zastosowanej techniki pomiaru i przetwarzania sygnału (ryc. 9). Zgodnie z oczekiwaniem porowatość efektywna jest niższa od ogólnej.

Następnie wykonano porównanie wyników badań laboratoryjnych NMR i pomiaru sondą MRIL w otworze (ryc. 10). Zaobserwowano wyraźnie niższe wartości współczynnika porowatości ogólnej otrzymane za pomocą profilowania MRIL. Wyższe wartości porowatości ogólnej z badań próbek są wynikiem doboru materiału skalnego do badań laboratoryjnych. Wybiera się fragmenty skał, z których można potem wyciąć rdzenie, czyli twarde elementy, możliwie bez udziału materiału ilastego w węglanach i związane części skał klastycznych, o większej zawartości piaskowców. Na rycinach 8–11 przedstawiono wyniki badań próbek z serii węglanowej jury górnej. Porównanie porowatości ogólnej i efektywnej sondą MRIL (ryc. 11) wskazuje także na niższe wartości porowatości w porównaniu z wynikami laboratoryjnymi. Wartości porowatości ogólnej i efektywnej pomierzone w otworze skorelowano jedynie w interwale 1777,3–1801,3 m, z którego pochodziły próbki. Obniżona porowatość z profilowania NMR może wynikać z obecności stref nasyconych gazem. Mniejsza ilość protonów w jadrach wodoru na jednostkę objętości w gazie powoduje rejestrację mniejszego sygnału i zniżenie porowatości. Efekt ten, znany z profilowań neutronowych, może być rekompensowany przez włączenie krzywej gęstości objętościowej (RHOB) do przetwarzania danych NMR.

Kolejną przyczyną, która powoduje zróżnicowanie porowatości w badaniach laboratoryjnych i otworowych, jest pionowa rozdzielczość sondy i zbieranie przez nią informacji z interwału głębokości, a nie dostarczanie danych punktowych, jak ma to miejsce w badaniach próbek. Rozdzielczość



Ryc. 5. Fragment zapisu profilowania sondą MRIL w węglanowych utworach jury górnej, interwał głębokości 1775–1800 m
 Fig. 5. Part of the MRIL log in the Upper Jurassic carbonates, depth interval 1775–1800 m

ponowna sond MRIL zależy od wielu czynników, m.in. do-
 branego programu działania sondy oraz rodzaju i zasolenia
 płuczki wiertniczej. Rozdzielczość pionowa sondy MRIL
 ®-Prime w odwiercie Ł-4 wynosiła ok. 1,2 m. Na rycinie
 11 można zaobserwować grupę punktów o współrzędnych
 wyraźnie odbiegających od linii trendu. Punkty te odpowia-
 dają danym z interwału 1791,8–1793,7 m, gdzie występuje
 także podwyższona porowatość ogólna, obliczona z profilo-
 wania gęstościowego (PHID). W wymienionym interwale

oraz jego najbliższym sąsiedztwie wyinterpretowano bardzo
 niski współczynnik nasycenia wodą (ok. 20%). W doku-
 mentacji otworu podano także, że podczas wiercenia obser-
 wowano przyływ gazu na głębokości 1777–1794 m.

Porównanie przepuszczalności

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych obli-
 czono przepuszczalność fizyczną wg wzoru Coatesa [1]

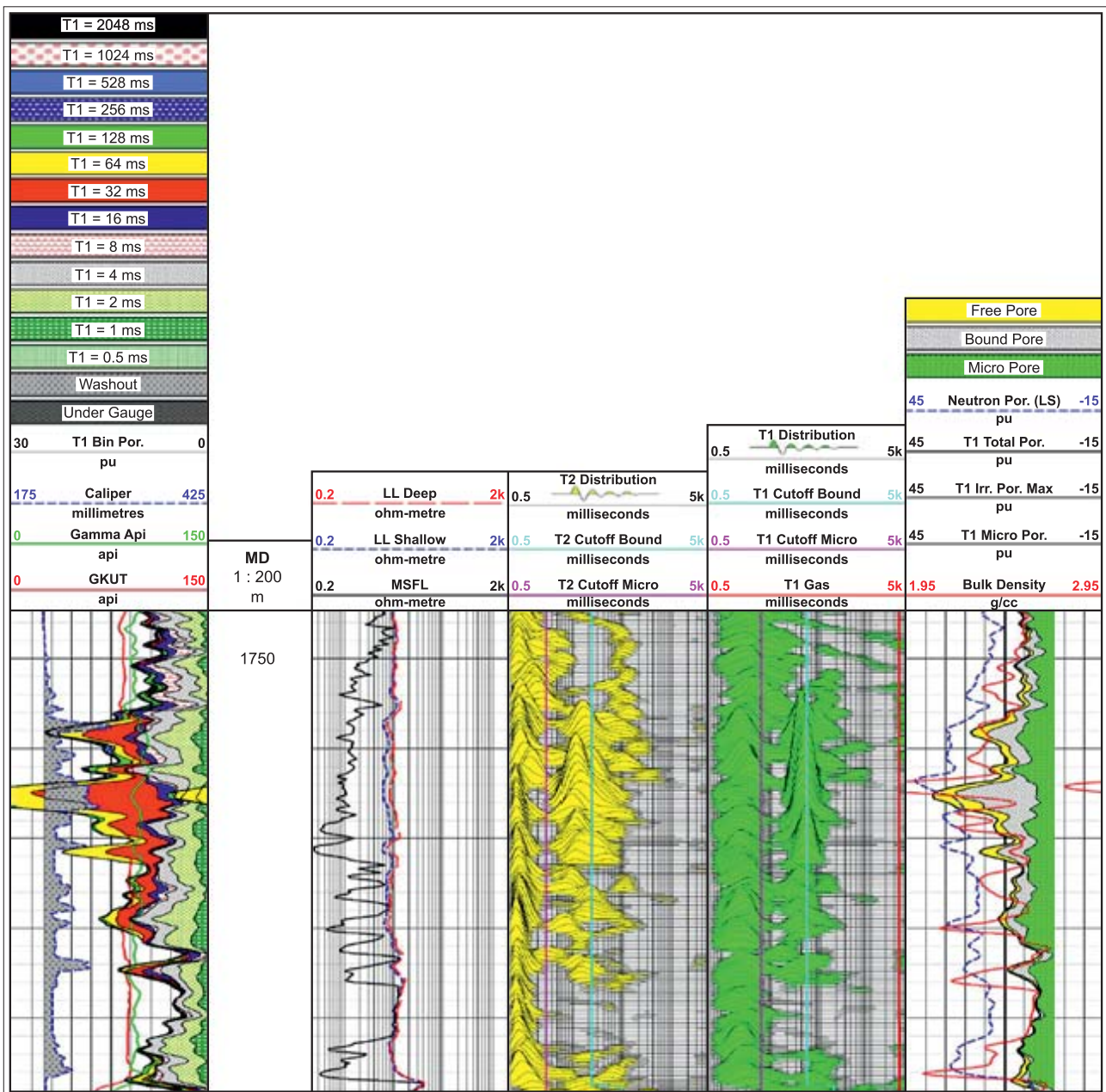
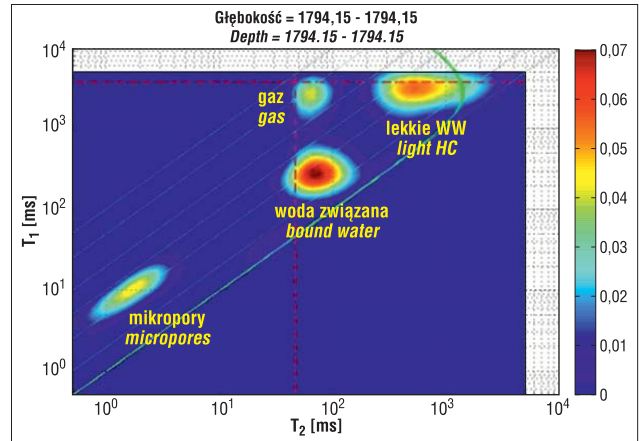
oraz „wody związanej” [2] (Coates & Dumanoir, 1974). Wykorzystano ciągły profil przepuszczalności fizycznej, wyinterpretowanej przez firmę Halliburton (K_{PMRI}) na podstawie pomiaru sondą MRIL®-Prime oraz obliczonej wg wzoru Zawiszy [3] (Zawisza, 1993).

$$K_{-c} = (C \cdot K_{pNMR})^4 \cdot \left(\frac{K_{p3}}{K_{p1} + K_{p2}} \right) \quad [1]$$

→

Ryc. 6. Mapa czasów relaksacji T₁ i T₂, skonstruowana przez firmę Halliburton na podstawie wyników rejestracji sondą MRIL®-Prime w otworze Ł-4 (wg Ballieta, 2011, zmieniony)

Fig. 6. Map of the T₁ and T₂ relaxation times, constructed by Halliburton Co. on the basis of the MRIL®-Prime well logging results from the Ł-4 well (after Balliet, 2011, modified)



Ryc. 7. Fragment zapisu profilowania sondą MRIL w ilastych utworach miocenu, interwał głębokości 1748–1775 m

Fig. 7. Part of the MRIL log in the Miocene shaly deposits, depth interval 1748–1775 m

$$K_{-wz} = (C \cdot K_{pNMR})^4 \cdot \left(\frac{K_{p2} + K_{p3}}{K_{p1}} \right) \quad [2]$$

$$K_{-ZAW} = C \cdot K_p^{C1} \cdot (1 - S_w)^2 \quad [3]$$

dla utworów piaszczysto-ilastych:

$$K_{-ZAW} = 45\,000 \cdot K_p^{3,15} \cdot (1 - S_{wi})^2 \quad [3a]$$

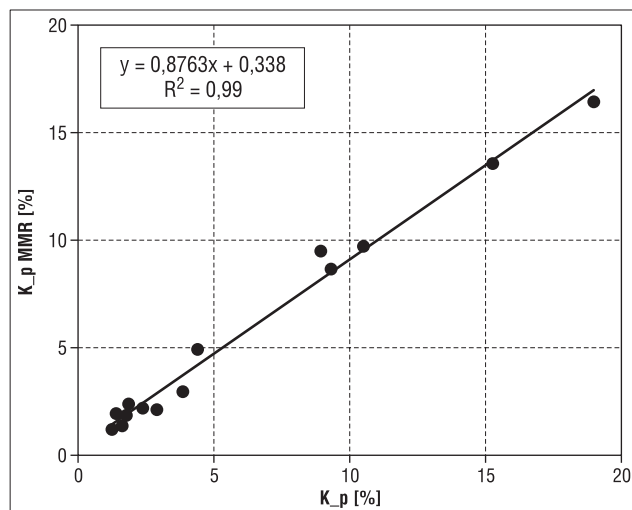
dla utworów węglanowych jury:

$$K_{-ZAW} = 10\,000 \cdot K_p^2 \cdot (1 - S_{wi})^2 \quad [3b]$$

Wartości przepuszczalności fizycznej, obliczone na podstawie wyników NMR uzyskanych w laboratorium, z wykorzystaniem wzorów [1] i [2] różnią się o rząd wielkości. Różnica jest szczególnie wyraźna dla próbek o małych wartościach przepuszczalności fizycznej. Jedynie kilka próbek o większych przepuszczalnościach ma podobne wartości (ryc. 12, 13). W obu wzorach została przyjęta

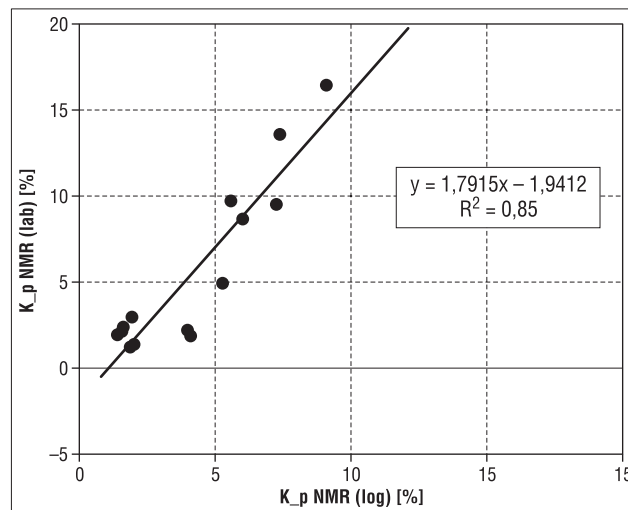
stała $C = 10$, zgodnie z podaną literaturą. W publikacjach jest podawana także wartość $C = 70$, przyjęcie której powoduje podwyższenie przepuszczalności.

Obliczone wartości przepuszczalności fizycznej na podstawie wyników badań laboratoryjnych nie zgadzają się ani z wynikami podanymi przez firmę Halliburton, ani z przepuszczalnością obliczoną na podstawie wzoru Zawisy, ani też z przepuszczalnością będącą wynikiem bezpośredniego pomiaru z użyciem przepuszczalnościomierza. Na głębokości 1777,25–1801,3 m, na której wykonano porównanie 14 próbek zmierzonych przepuszczalnościomierzem jedna okazała się nieprzepuszczalna, cztery miały wartość przepuszczalności 0,01 mD, czyli równą dolnemu zakresowi pomiarowemu przyrządu. Maksymalna wartość przepuszczalności fizycznej K_{lab} , na głębokości $H = 1792,25$ m wyniosła 20,21 mD, podczas gdy inne metody dały następujące wartości na tej głębokości: $K_c = 105$ mD, $K_{wz} = 439$ mD, $K_{ZAW} = 100,44$ mD i $K_{PMRI} = 1,06$ mD. Ten przykład pokazuje, jak duży może być rozrzut pojedynczych wartości współczynnika.



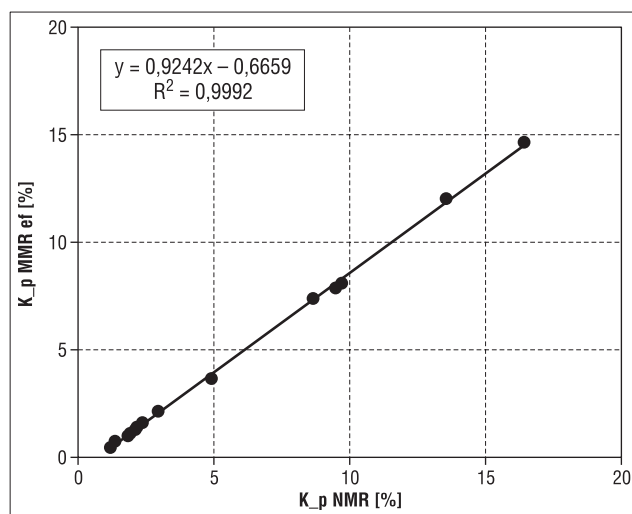
Ryc. 8. Zależność porowatości całkowitej NMR od porowatości całkowitej (piknometr)

Fig. 8. NMR total porosity vs. total porosity from pycnometer



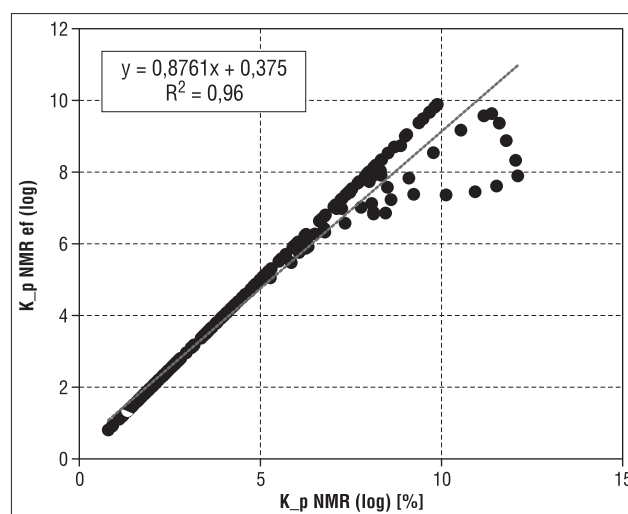
Ryc. 10. Zależność porowatości ogólnej NMR (lab) od porowatości ogólnej NMR (log)

Fig. 10. Total porosity (NMR laboratory measurement results) vs. total porosity (NMR well logging)



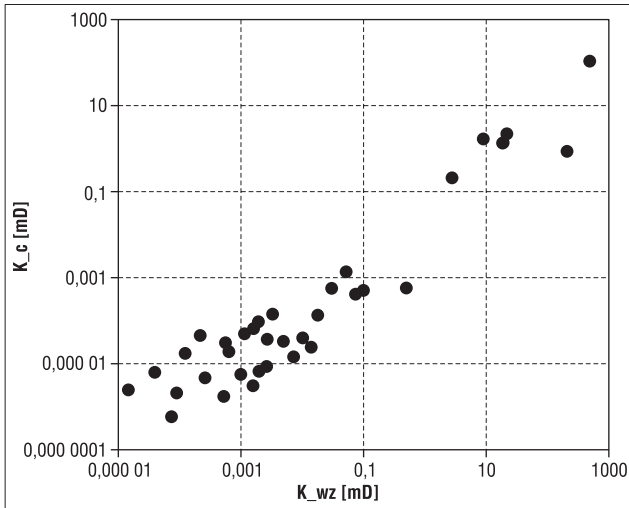
Ryc. 9. Zależność porowatości efektywnej od całkowitej NMR (pomiar laboratoryjny)

Fig. 9. Effective porosity vs. total porosity (NMR lab measurement)



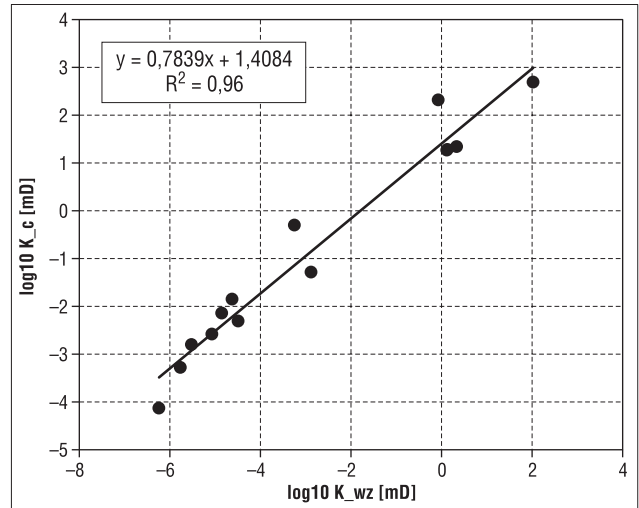
Ryc. 11. Zależność porowatości efektywnej od ogólnej (profilowanie MRIL)

Fig. 11. Effective porosity vs. total porosity (MRIL well logging)



Ryc. 12. Zależność między przepuszczalnością fizyczną, wyliczoną wg wzoru Coatesa i wzoru opartego na wodzie związanej (wszystkie próbki)

Fig. 12. Relation between absolute permeability calculated according to the Coates equation and water formula (all samples)

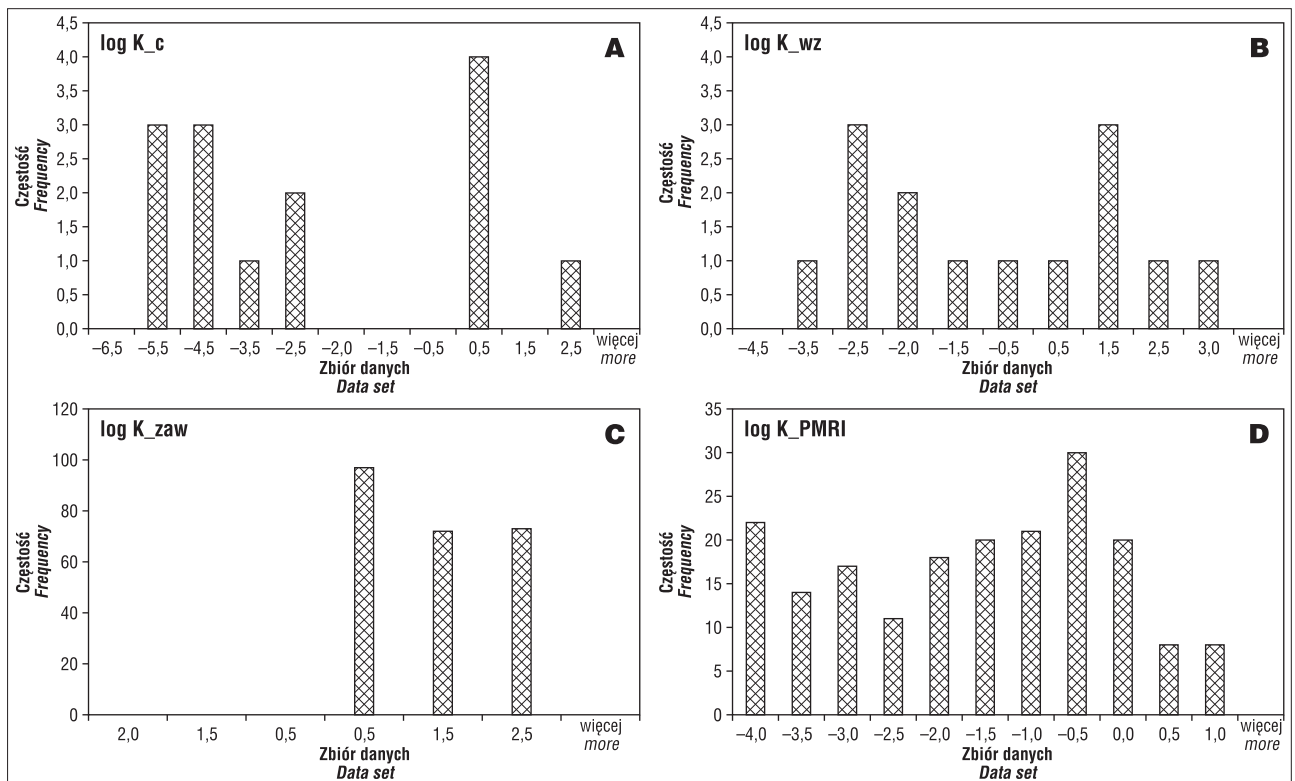


Ryc. 13. Relacja między logarytmem przepuszczalności fizycznej, wyliczonej wg wzoru Coatesa i wzoru opartego na wodzie związanej (próbki z jury górnej)

Fig. 13. Relation between the logarithm of absolute permeability calculated according to the Coates equation and bound water formula (Upper Jurassic samples)

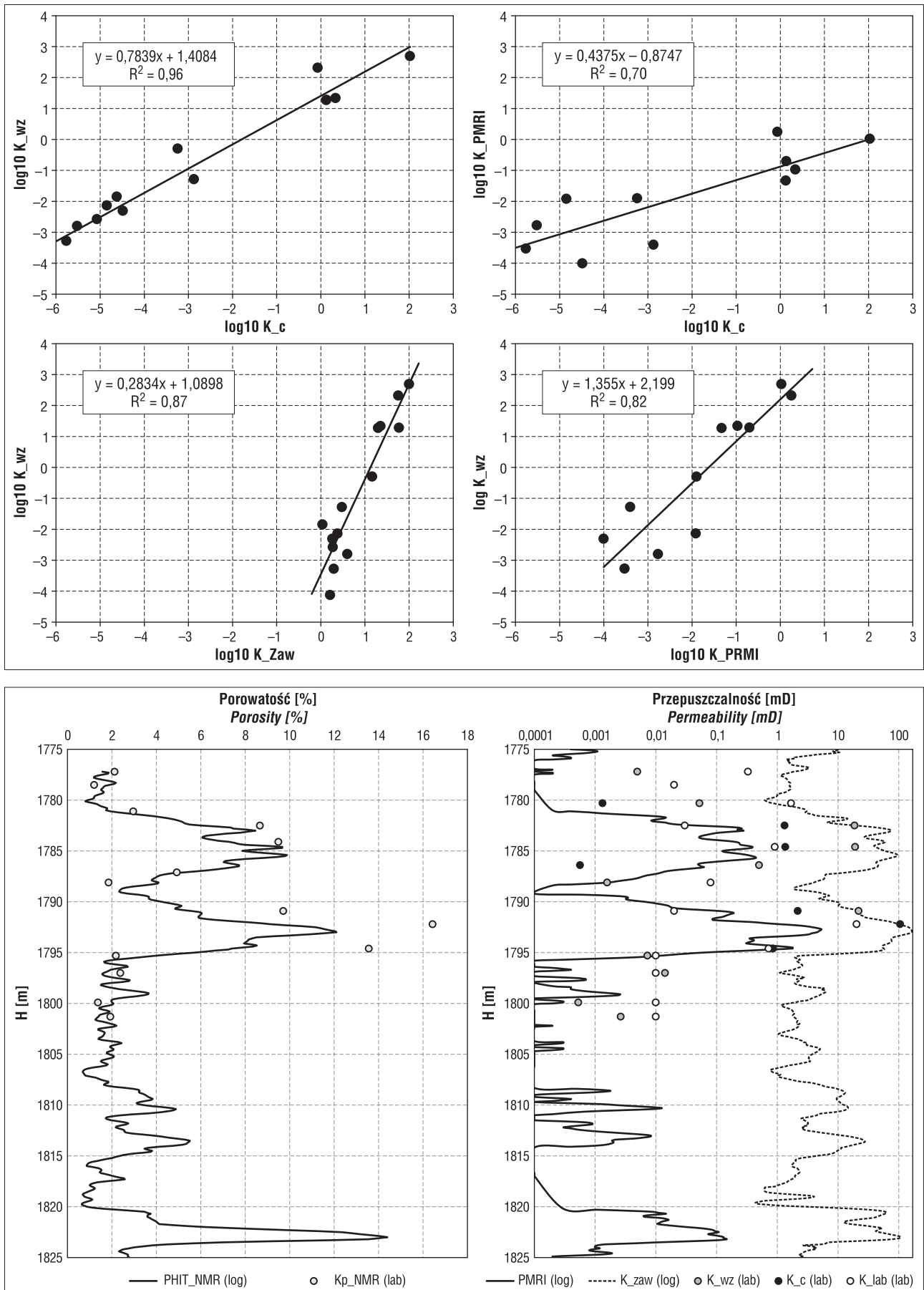
Na rycinach przedstawiono histogramy logarytmu przepuszczalności fizycznej (ryc. 14), obliczonej różnymi metodami oraz korelacje pomiędzy wartościami logarytmów przepuszczalności (ryc. 15) badanych skał. Zróżnicowane wartości tego współczynnika, widoczne na rycinach 14 i 15, są skutkiem wykorzystania określonych stałych we wzorach [1]–[3], nie w pełni odpowiadających analizowanej formacji. Zbiór danych jest mniej liczny w przypadku histogramów przepuszczalności fizycznej, obliczonej z użyciem

wzorów Coatesa i „wody związanej” w porównaniu ze zbiorami danych uzyskanymi na podstawie wzoru Zawiszy i rozwiązaniem przedstawionym przez firmę Halliburton, obliczonymi z krokiem 0,1 m. W trzech przypadkach (ryc. 14A, B i D) rozkład obejmuje duży przedział zmian przepuszczalności, od ułamków milidarcy do nawet kilkuset mD i jest dwumodalny. Przepuszczalność fizyczna, obliczona wg wzoru Coatesa, przyjmuje najmniejsze wartości i jest najmniej zróżnicowana. Najwyższe wartości



Ryc. 14. Histogramy logarytmu przepuszczalności obliczonej wg różnych wzorów: **A** – Coatesa, **B** – na podstawie wody związanej, **C** – Zawiszy, **D** – wynik interpretacji firmy Halliburton

Fig. 14. Histograms of permeability logarithm calculated according to various equations: **A** – Coates equation, **B** – bound water formula, **C** – Zawisza equation, **D** – Halliburton Co. interpretation



Ryc. 16. Zestawienie porowatości, wyliczonej na podstawie badań NMR w otworze z porowatością wyznaczoną z badań laboratoryjnych (diagram po lewej stronie); zestawienie przepuszczalności obliczonej różnymi metodami (diagram po prawej stronie)
Fig. 16. Comparison of porosity calculated on the basis of NMR well logging with porosity determined from laboratory measurements (left); Comparison of permeability calculated according to various equations (right)

Ryc. 15. Korelacje między wartościami logarytmu przepuszczalności fizycznej, obliczonej wg różnych wzorów

Fig. 15. Correlations between logarithm of absolute permeability calculated according to various equations



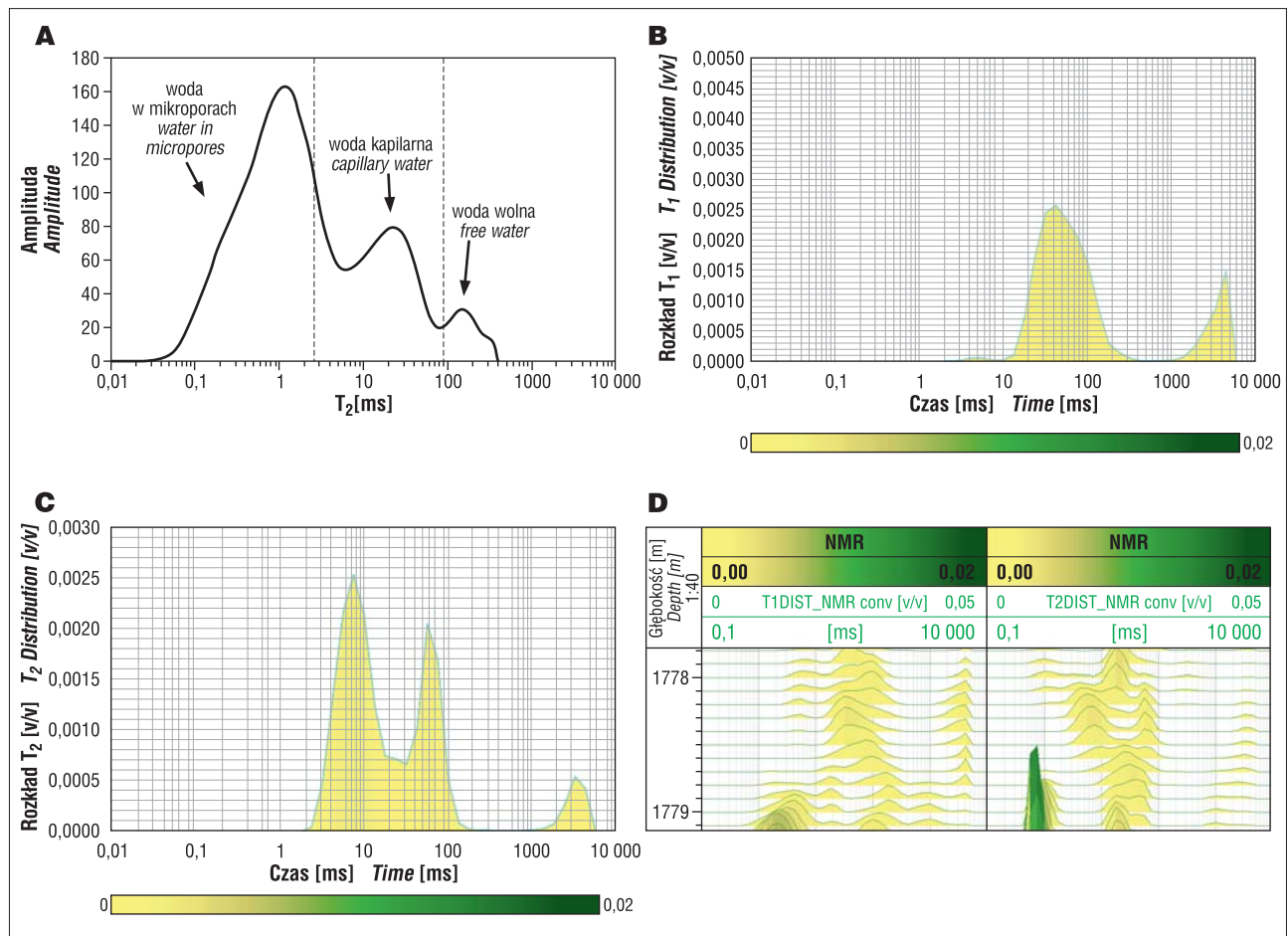
w tej grupie osiąga przepuszczalność obliczona z użyciem wzoru „wody związanej”. Dane we wszystkich zbiorach korelują ze sobą (ryc. 15). Najbardziej zbliżone do siebie są wyniki uzyskane przez firmę Halliburton (K_{PMRI}) oraz otrzymane na podstawie wzoru wykorzystującego „wodę związaną” (K_{WZ}), mimo że współczynnik determinacji nie jest w tym przypadku najwyższy. Przepuszczalność obliczona wg wzoru Zawiszy (K_{ZAW}) ma przedział zmienności zawężony do wartości 0,62–165,04 mD. Najwyższe wartości przepuszczalności w każdym przypadku są zgodne ze strefą o najlepszych właściwościach zbiornikowych (o najwyższej porowatości, wyznaczonej z wszystkich metod i najniższym współczynniku nasycenia wodą (ryc. 16).

Zestawienie wyników przepuszczalności obliczonej różnymi metodami z porowatością ogólną wyznaczoną na podstawie pomiarów NMR w otworze i w laboratorium (ryc. 16) wykazuje podobny trend zmienności omawianych parametrów (Maziarka, 2015). Szczególnie wyraźnie jest widoczne podobieństwo przebiegu wykresów prze-

puszczalności fizycznej wyinterpretowanej przez firmę Halliburton i obliczonej wg wzoru Zawiszy. Jednak oba zestawy wartości różnią się o kilka rzędów wielkości. Taka różnica jest wyraźnie związana z cechowaniem wyników, czyli doborem stałych we wzorach empirycznych. Wartości przepuszczalności fizycznej, wyliczone na podstawie wyników laboratoryjnych eksperymentów NMR, z wykorzystaniem wzorów Coatesa i „wody związanej” oraz wyniki pomiarów przepuszczalnościomierzem są bardzo rozrzucone i jedynie kilka punktów mogło być umieszczone na wykresach K_{PMRI} lub K_{ZAW} .

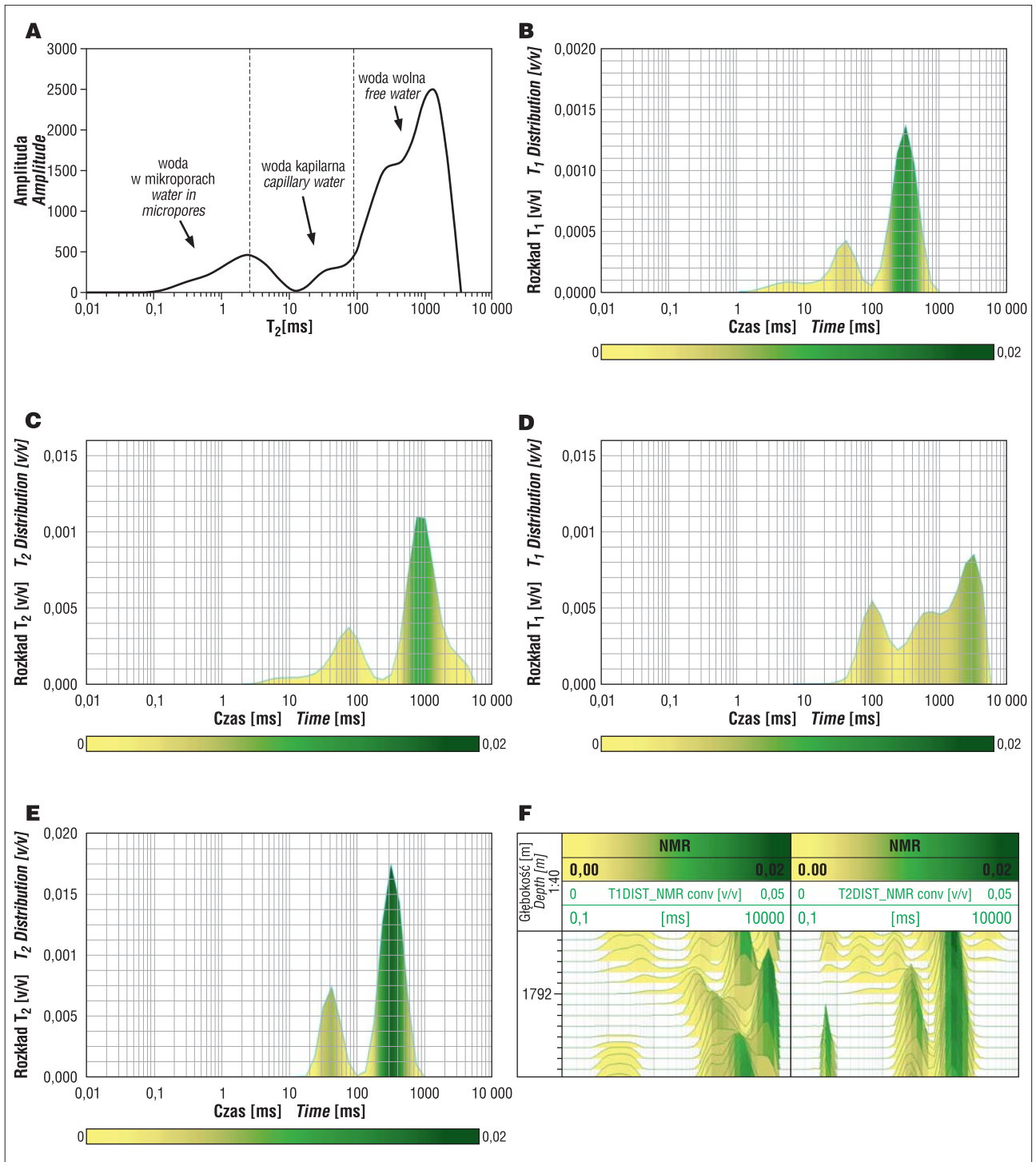
Zestawienie pojedynczych rozkładów czasów relaksacji T_1 i T_2

Wyniki pomiarów sondami otworowymi oraz pomiary laboratoryjne umożliwiają analizę pojedynczych rozkładów czasów relaksacji T_1 i T_2 na wybranych głębokościach. Zestawienia prezentowane na rycinach 17 i 18 mają na celu pokazanie podobieństwa wykresów, które mogą posłużyć cechowaniu wielkości przepuszczalności. Wybrano dwa przykłady z serii utworów węglanowych jury. Na rycinie 18 pokazano także, że duża zmienność niejednorodnej formacji skalnej powoduje, że bardzo trudne jest dowiązanie głębokościowe punktowych wyników badań laboratoryjnych oraz ciągłych (rejestranych co 0,1 m) wyników



Ryc. 17. A – rozkład T_2 , wynik badania laboratoryjnego, H = 1778,55 m, jura górna – wapień; B – rozkład T_1 , wynik pomiaru otworowego, H = 1778,5 m; C – rozkład T_2 , wynik pomiaru otworowego, H = 1778,5 m; D – rozkłady T_1 i T_2 , wynik pomiaru otworowego dla przedziału głębokości 1777,8–1779,1 m

Fig. 17. A – T_2 distribution, laboratory measurement result, H = 1778.55 m, Upper Jurassic – limestones; B – T_1 distribution, NMR well logging result, H = 1778.5 m; C – T_2 distribution, NMR well logging result, H = 1778.5 m; D – T_1 and T_2 distribution, NMR well logging result for depth interval 1777.8–1779.1 m



Ryc. 18. A – rozkład T_2 , wynik badania laboratoryjnego, H = 1792,25 m, jura górna – dolomit; B – rozkład T_1 , wynik pomiaru otworowego, H = 1792 m; C – rozkład T_2 , wynik pomiaru otworowego, H = 1792 m; D – rozkład T_1 , wynik pomiaru otworowego, H = 1792,2 m; E – rozkład T_2 , wynik pomiaru otworowego, H = 1792,2 m; F – rozkłady T_1 i T_2 , wynik pomiaru otworowego dla przedziału głębokości 1791,5–1792,7 m

Fig. 18. A – T_2 distribution, laboratory measurement result, H = 1792.25 m, Upper Jurassic – dolomites; B – T_1 distribution, NMR well logging result, H = 1792 m; C – T_2 distribution, NMR well logging result, H = 1792 m; D – T_1 distribution, NMR well logging result, H = 1792.2 m; E – T_2 distribution, NMR well logging result, H = 1792.2 m; F – T_1 and T_2 distribution, NMR well logging result for depth interval 1791.5–1792.7 m

otworowych. Zmienność formacji skalnej oraz różna objętość materiału skalnego, wpływająca na wynik pomiaru w profilowaniu geofizyki otworowej i w badaniu laboratoryjnym, powodują, że obrazy z tych samych głębokości nie są identyczne. Dlatego na rycinach 17d i 18f przedstawiono serie rozkładów T_1 i T_2 . Rozkład T_1 jest uzupełnieniem infor-

macji w zakresie wydzielenia sygnału odpowiadającego wodzie związanej w mikroporach (Kp_1), porach kapilarnych (Kp_2) i wodzie wolnej (Kp_3). W połączeniu z wykresami na rycinach 17 i 18 warto zwrócić uwagę na wartości określające porowatość i objętość wody związanej z pomiarów laboratoryjnych i profilowań otworowych (tab. 2).

Tab. 2. Wyniki interpretacji rozkładów czasów relaksacji (szarym kolorem oznaczono wyniki badań laboratoryjnych, INiG-PIB, Kraków)**Table 2.** Interpretation results of relaxation times distribution (grey – laboratory measurements, Oil and Gas Institute – National Research Institute, Krakow)

| Zawartość wody <i>Volume of water</i> | | | | Porowatość <i>Porosity</i> [%] | Nasylenie wodą związaną <i>Bound water</i> <i>saturation</i> [%] |
|--|----------|----------|--|--------------------------------------|--|
| K_{p1} | K_{p2} | K_{p3} | $K_{p1} + K_{p2}$ | K_p NMR | $S_{w\text{nr}}$ |
| Badanie laboratoryjne – jura górna, wapień / <i>Laboratory measurement – Upper Jurassic, limestone</i> | | | | | |
| 0,75 | 0,39 | 0,06 | 1,14 | 1,20 | 95 |
| Profilowanie otworowe – jura górna, wapień / <i>Well logging – Upper Jurassic, limestone</i> | | | | | |
| Mikropory <i>Micropores</i> (< 3 ms) | | | Woda związana <i>Bound Water</i> (< 90 ms) | | |
| 0,00 | – | 0,30 | 1,50 | 1,80 | 83,30 |
| Badanie laboratoryjne – jura górna, dolomit / <i>Laboratory measurement – Upper Jurassic, dolomite</i> | | | | | |
| 1,78 | 1,64 | 13,01 | 3,42 | 16,43 | 20,82 |
| Profilowanie otworowe – jura górna, dolomit / <i>Well logging – Upper Jurassic, dolomite</i> | | | | | |
| Mikropory <i>Micropores</i> (< 3 ms) | | | Woda związana <i>Bound Water</i> (< 90 ms) | | |
| 0,5 | – | 8,00 | 3,00 | 11,00 | 27,30 |

WNIOSKI WYNIKAJĄCE Z ANALIZY DOSTĘPNYCH WYNIKÓW OZNACZEŃ LABORATORYJNYCH I GEOFIZYKI OTWOROWEJ

Przedstawione wnioski odnoszą się do węglanowych utworów jury górnej. Pomiar sondą otworową NMR jest ważnym uzupełnieniem standardowego zestawu wyników pomiarowych i interpretacyjnych geofizyki otworowej. Pozwala to na wyznaczenie stref o dobrych właściwościach zbiornikowych i produkcyjnych już na poziomie interpretacji jakościowej.

Zestawienie wyników profilowania otworowego MRIL i wyników badań laboratoryjnych wskazuje, że wartości porowatości obu pomiarów, wykazują ten sam charakter zmienności. Wyniki badań rdzeni wiertniczych są nieco zawyżone w stosunku do wyników profilowań otworowych, o czym warto pamiętać, ponieważ wielkość porowatości wyraźnie wpływa na obliczenie zasobów złoża oraz przepuszczalność fizyczną.

Ten ostatni parametr, wyliczony na podstawie porowatości wyznaczonej metodą NMR, obejmuje bardzo szeroki zakres. Szczególnie należy podkreślić możliwość wyliczenia małych wartości, niemierzalnych fizycznie z użyciem starszych przyrządów, niskiej klasy.

Wynik obliczenia przepuszczalności na podstawie wzoru empirycznego, jest zależny od współczynników, dobieranych w różnicowany sposób, na podstawie dostępnego materiału pomiarowego. Porównanie histogramów i zależności korelacyjnych wskazuje, że konieczne jest poprawne wycechowanie wyników przez porównanie z pomiarami wykonanymi z użyciem przepuszczalnościomierzy o znacznie rozszerzonym zakresie pomiarowym.

Porównanie rozkładów T_2 uzyskanych z badań laboratoryjnych oraz pomiarów otworowych wykazuje ich podobieństwo, co potwierdza przydatność wyników wyznaczonych w pojedynczych próbkach. Jednak zmienność ośrodka geologicznego powoduje, że w niektórych przypadkach pojedyncze pomiary mogą być niewystarczające do dokładnej charakterystyki formacji zbiornikowej.

Autorzy dziękują PGNiG SA za udostępnienie danych geofizyki otworowej i wyników badań laboratoryjnych oraz informacji geologicznych. Pomiary i interpretację profilowań geofizyki otworowej wykonało przedsiębiorstwo Geofizyka Kraków SA, z udziałem zespołu firmy Halliburton przy pomiarze sondą MRIL®-Prime. Przetwarzanie rozkładów T_1 i T_2 zostało wykonane z użyciem programu Techlog w ramach Grantu Uczelnianego udzielonego przez firmę Schlumbergera WGGiOŚ AGH. Badania próbek skalnych wykonano w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie. Analizy wykorzystane w artykule zostały częściowo wykonane w ramach pracy magisterskiej mgr inż. Dagmary Maziarki, częściowo w ramach działalności statutowej Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH w 2015 r., umowa nr. 11.11.140.769. Autorzy dziękują Recenzentom za wskazówki, dzięki którym praca stała się bardziej przystępna.

LITERATURA

- BALLIET L.C. 2011 – NMR Applications & Technologies. Materiały firmy Halliburton, udostępnione przez PGNiG SA.
- COATES G.R. & DUMANOIR J.L. 1974 – A new approach to improved log derived permeability. *The Log Analyst*, 17.
- COATES G.R., XIAO L. & PRAMMER M.G. 1999 – NMR logging Principles & Applications. Halliburton Energy Services, Houston.
- DOKUMENTACJA otworu Ł-4, 2011. Archiwum PGNiG SA, Warszawa.
- FLOREK R., GLINIĄK P. & ZACHARSKI J. 2006 – Nowe spojrzenie na strefę nasuwczą Łątki w rejonie Łapanów–Tymowa. *Nafta-Gaz*, 62 (12): 647–654.
- HENNEL J.W. & KLINOWSKI J. 2000 – Podstawy magnetycznego rezonansu jądrowego. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.
- JARZYNA J., KRAKOWSKA P., PUSKARCZYK E. & SEMYRKA R. 2015 – Rock Reservoir Properties from the Comprehensive Interpretation of Nuclear Magnetic Resonance and Mercury Injection Porosimetry Laboratory Results. *Applied Magnetic Resonance*, 46/1: 95–115.
- KLAJA J. & KULINOWSKI P. 2008 – Wykorzystanie metody magnetycznego rezonansu jądrowego do badania lepkości płynów złożowych. *Nafta-Gaz*, 64, 7: 421–426.
- MAZIARKA D. 2015 – Profilowanie otworowe magnetycznego rezonansu jądrowego i badania MRJ na próbkach skał. Praca magisterska. WGGiOŚ, Biblioteka Główna AGH, Kraków.
- OPRACOWANIE wyników badań sejsmicznych dla tematu Łapanów 3D, 2008. Archiwum PGNiG SA w Warszawie.
- PUSKARCZYK E. 2011 – Ocena własności zbiornikowych skał przy wykorzystaniu zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego. Praca doktorska. WGGiOŚ, Biblioteka Główna AGH, Kraków.
- ROMERO P.A. 2013a – NMR Fluid Typing (Halliburton example). Available at the GeoNeurale Newsletter, www.GeoNeurale.com.
- ROMERO P.A. 2013b – Mixture of Gaussian fitting of NMR spectra for retrieving fluid distribution. Available at the GeoNeurale Newsletter, www.GeoNeurale.com.
- STRALEY Ch., ROSSINI D., VINEGAR H., TUTUNJIAN P. & MORRIS Ch. 1997 – Core analysis by low field NMR. *The Log Anal.*, 38 (2): 84–94.
- ZAWISZA L. 1993 – Simplified method of absolute permeability estimation of porous beds. *Archives of Mining Sciences*, 38 (4): 343–352.

Praca wpłynęła do redakcji 28.09.2015 r.
Akceptowano do druku 27.01.2016 r.