

## LABORATORYJNE BADANIA ANIZOTROPII ELEKTRYCZNYCH WŁAŚCIWOŚCI SKAŁ

### Laboratory testing of anisotropy of electrical properties of rocks

Jadwiga ZALEWSKA, Irena GAŚSIOR & Grażyna SIKORA

*Instytut Nafty i Gazu;  
ul. Lubicz 25a, 31-503 Kraków;  
e-mail: zalewska@inig.pl, gasior@inig.pl, sikora@inig.pl*

**Abstract:** The study presents results of laboratory testing of rock electrical parameters anisotropy (electrical resistivity, formation factor, porous structure  $m$  and wettability  $n$  indices). The measurements have been carried out on 119 core plugs, originating from eight boreholes representing the Rotliegend formations in three exploration regions. Coefficient of relative transverse anisotropy of the electrical resistivity varied in range of  $K\rho \in 0.16 \div 2.20$ , while for relative azimuth anisotropy ranged within  $A\rho \in 0.17 \div 2.99$ .

**Key words:** anisotropy, electrical resistivity, formation factor, porous structure index,  $m$ , wettability index,  $n$

**Słowa kluczowe:** anizotropia, oporność elektryczna, wskaźnik struktury porowej,  $m$ , wskaźnik zwilżalności,  $n$

## WPROWADZENIE

Anizotropia elektrycznych właściwości skał ma istotne znaczenie dla oceny formacji skalnej ze względu na nasycenie wodą lub węglowodorami, w powiązaniu z elektryczną opornością właściwą tej formacji. Od czasu sformułowania przez Archiego (1942) związku między opornością skały i wody złożowej oraz porowatością i nasyceniem wodą złożową, prowadzono przez wiele lat udoskonalanie tych zależności (np. model Waxmana–Smitsa, Dual–Water, *etc.*) jednak dogłębne rozważenie anizotropii nigdy nie było obiektem tych badań. Prawdopodobnie wynika to z faktu, że w otworach pionowych, nawet tam gdzie występują skały anizotropowe, przyrządy pomiarowe odpowiadają bezpośrednio za pomiar składowej poziomej  $\sigma_h$ , czyli w omawianym przypadku poziome przewodnictwo, ignorując możliwość występowania dwóch różnych składowych poziomych:  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$ . Ogólnie uważa się również, że podczas gdy łupki są wyraźnie anizotropowe, to piaskowce powinny być izotropowe, przynajmniej w przybliżeniu (Kennedy 2004).

Badania ostatnich lat (Herrick & Kennedy 1996, LaTorraca & Hall 1991), jak i profilowania poziome pokazują, że takie podejście do skał zbiornikowych jest zbyt uproszczone. Obecny cel jest zrozumienie efektów anizotropii, zarówno w odpowiedzi przyrządów pomiarowych, jak i w ocenie formacji z wykorzystaniem standardowych technik. Ponieważ wszystkie skały klastyczne są w mniejszym lub większym stopniu uwarstwione, to oznaki tych efektów powinny być bez wątpienia obserwowane i uwzględniane w interpretacji geofizycznej.

Elektryczne parametry skał (elektryczna oporność właściwa  $\rho$ , parametr porowatości  $Pp$ , wskaźnik struktury porowej  $m$  i zwilżalności  $n$ ) są określane w laboratorium na próbkach wyciętych z rdzeni wiertniczych, a otrzymane wartości są przyjmowane jako typowe dla badanych skał. W przypadku braku parametrów Archiego (wskaźnika struktury porowej  $m$  i zwilżalności  $n$ ) pomierzonych na rdzeniach, w interpretacji materiałów geofizyki wiertniczej przyjmowane są wartości nominalne  $m$  i  $n$  jako równe dwa – nieco poniżej 2 dla skał bardziej miękkich lub młodszych, nieco powyżej 2 dla skał twardszych lub starszych. W wyniku tego, gdy celem jest specjalna analiza rdzeniowa dla parametrów Archie'ego, rdzenie są wycinane w miejscu, gdzie wizualnie wydają się być w miarę możliwości jednorodnie i izotropowe. Z drugiej strony, nie jest łatwo znaleźć skały osadowe, nawet w skali rdzenia, które rzeczywiście są jednorodne i izotropowe. To rodzi pytanie, czy zmierzone wartości rzeczywiście zapewniają żądane wartości parametrów. Jeżeli tak nie jest, to czy parametry Archiego określone dla jednorodnych próbek rdzeniowych, reprezentują intuicyjnie usprawiedliwione uśrednienie właściwości ich elementów składowych, prowadząc do uzasadnionego przewidywania średniego nasycenia wodą, czy też są one nieprzewidywalnymi pułapkami w zastosowaniu ich do interpretacji?

Dokonane w latach osiemdziesiątych odkrycie, że wykładniki nasycenia mogą wykazywać „anomalnie” niskie wartości, bliskie jedności, a nawet mniejsze, było nieoczekiwane. Najpierw nie przyjęto wyników pomiarów laboratoryjnych jako prawidłowych. Na koniec zrozumiano, że wyniki laboratoryjne nie były błędne, a niskie wartości  $n$ , w szczególności w piaskowcach eolicznych, zostały zaakceptowane (LaTorraca & Hall 1991). W innych okolicznościach wykładnik nasycenia może być anomalnie duży, np. o wartości cztery lub większej (Herrick & Kennedy 1996).

Zaafraan (1981) podaje, że przystępując do interpretacji ilościowej dowolnych pomiarów oporności zawsze należy rozważyć wpływ anizotropii, częstotliwości i przewodzącego szkieletu skały. Z prac Zaafrana wynika, że wpływ ten może osiągnąć poziom aż 27% (szkielet 10%, częstotliwość 10%, średnia anizotropia 7%). Oczywiście tak wysoka wartość będzie mieć znaczący wpływ na interpretację ilościową zarówno sondowań jak i profilowań otworowych. Wspomina również, że samo badanie anizotropii oporności wskazuje, że współczynnik anizotropii wynosi około 1.07. Ta relatywnie niska wartość sugeruje, że miąższość warstwy otrzymana w wyniku powierzchniowego sondowania oporności będzie oszacowana zbyt wysoko, o czynnik równy współczynnikowi anizotropii (tj. 7%).

Celem pracy było określenie anizotropii własności elektrycznych ośrodka skalnego i dostarczenie interpretatorowi wiarygodnych danych laboratoryjnych, umożliwiających bieżącą kontrolę poprawności interpretacji oraz sprawdzenie, czy anizotropia nie stanowi utrudnienia w interpretacji pomiarów oporności.

## METODYKA BADAŃ

Istotą laboratoryjnych pomiarów anizotropii własności elektrycznych skał jest odpowiednie przygotowaniu materiału rdzeniowego do badań.

Prace z tego zakresu prowadzone są w różnych ośrodkach, a ich autorzy podają różne metody pomiaru np. poprzez wycinanie wielościanów (przetworniki piezoelektryczne do ścian Lin 1985, Rai 1988, Yin 1992).

W INiG pomiary anizotropii właściwości fizycznych realizowane są metodą trójrdzeniową (po skonstruowaniu odpowiedniej przystawki), zaproponowaną przez Vernika (1993). Metodyka ta przewiduje pojedyncze pomiary właściwości skał na trzech rdzeniach – jednym wyciętym równolegle do osi symetrii próbki (Y), drugim – prostopadłe (X), a trzecim – pod kątem  $45^\circ$  do osi symetrii (Z) (Fig. 1) (Zalewska *et al.* 2008). Jest to metodyka wyznaczania tzw. anizotropii względnej, wyznaczanej względem osi otworu wiertniczego. W przypadku pozyskania próbek o wyraźnym warstwowaniu można te same badania prowadzić uwzględniając kierunek warstwowania próbki otrzymanej z rdzenia wiertniczego. Wspomnieć należy, że anizotropia własności elektrycznych pojedynczej warstwy określana jest mianem mikroanizotropii, dla sekwencji warstw – makroanizotropii.

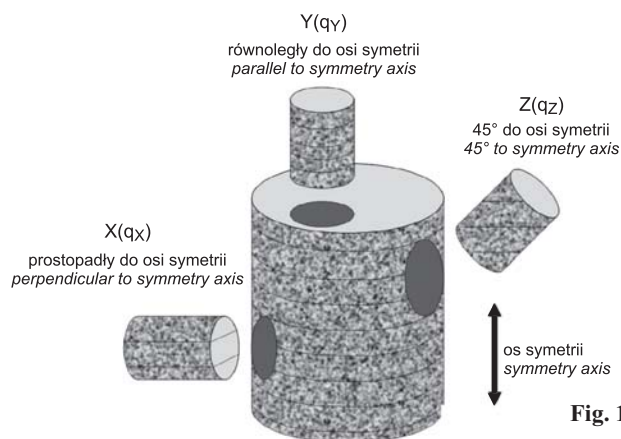


Fig. 1. Schemat sposobu wycinania próbek

Fig. 1. Procedure of samples coring

## WYNIKI BADAŃ

Badania elektrycznych parametrów skał wykonano przy zastosowaniu miernika ESCORT ELC03131D. Pomiary wykonano na 128 próbkach skał pochodzących z utworów czerwonego spągowca z 8 otworów wiertniczych. Badania przeprowadzono na rdzeniach w kształcie walca o średnicy 1" i wysokości 30 mm, wysuszonych w temperaturze  $110^\circ\text{C}$ , które następnie nasyciono wodnym roztworem NaCl o stężeniu 250 g/l w komorze próżniowej przy ciśnieniu 97 kPa.

Wyznaczono współczynniki względnej anizotropii poprzecznej ( $K$ ), rozumiejąc pod tym terminem stosunek wartości parametrów zmierzonych na próbce wyciętej w kierunku równoległym do wartości tych samych parametrów zmierzonych na próbce wyciętej w kierunku

prostopadłym do osi symetrii otworu wiertniczego. Współczynnik  $K$  określono z następujących relacji: dla elektrycznej oporności właściwej  $K\rho = \rho_Y/\rho_X$ , parametru porowatości  $Kp_p = Pp_Y/Pp_X$  oraz wskaźnika struktury porowej  $Km = m_Y/m_X$  i zwilżalności  $Kn = n_Y/n_X$  (gdzie: indeks  $Y$  oznacza kierunek równoległy do osi symetrii otworu, indeks  $X$  oznacza kierunek prostopadły do osi symetrii otworu wiertniczego).

Określono współczynnik względnej anizotropii azymutalnej ( $A$ ), definiując go jako stosunek wartości parametrów zmierzonych na próbce wyciętej w kierunku równoległym do wartości tych samych parametrów zmierzonych na próbce wyciętej pod kątem  $45^\circ$  względem osi symetrii otworu wiertniczego. Współczynnik  $A$  oceniono z zależności: dla elektrycznej oporności właściwej  $A\rho = \rho_Y/\rho_Z$ , parametru porowatości  $Ap_p = Pp_Y/Pp_Z$  oraz wskaźnika struktury porowej  $Am = m_Y/m_Z$  i zwilżalności  $An = n_Y/n_Z$  (gdzie: indeks  $Y$  oznacza kierunek równoległy do osi symetrii otworu, indeks  $Z$  oznacza kąt  $45^\circ$  względem osi symetrii otworu wiertniczego).

Na figurach 2–5 przedstawiono wartości średnie parametrów elektrycznych skał w badanych otworach wiertniczych dla trzech analizowanych rejonów: CG, CzW oraz P.

Średnie wartości elektrycznej oporności właściwej  $\rho$  zmierzonej na próbkach skał wyciętych w różnych kierunkach w stosunku do osi otworu są zróżnicowane ( $\rho_X$ :  $6.26 \div 13.01 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_Y$ :  $5.70 \div 11.33 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_Z$ :  $5.92 \div 13.13 \Omega\text{m}$ ). Najwyższymi średnimi arytmetycznymi wartościami elektrycznej oporności właściwej charakteryzują się próbki z otworu P-28, najniższymi zaś próbki z otworów: CG-8, 9 (Fig. 2).

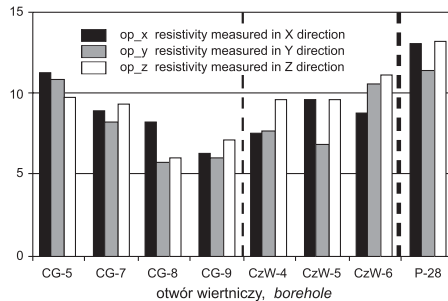


Fig. 2. Średnie wartości elektrycznej oporności właściwej  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] w otworach wiertniczych

Fig. 2. Average values of electrical resistivity  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] in boreholes

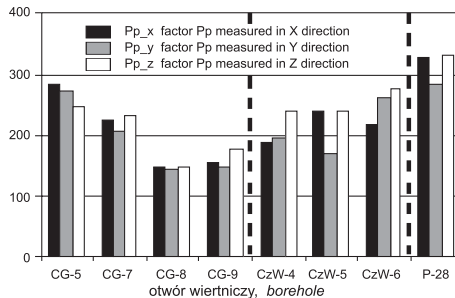


Fig. 3. Średnie wartości parametru porowatości  $Pp$  w otworach wiertniczych

Fig. 3. Average values of Formation Factor  $Pp$  in boreholes

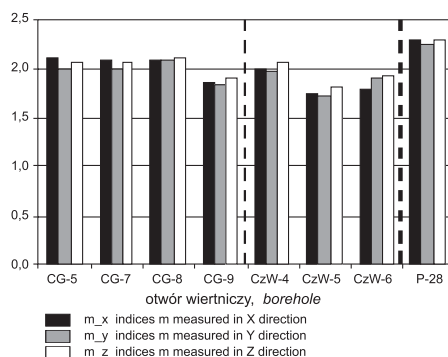


Fig. 4. Średnie wartości wskaźnika struktury porowej  $m$  w otworach wiertniczych

Fig. 4. Average values of porous structure indices  $m$  in boreholes

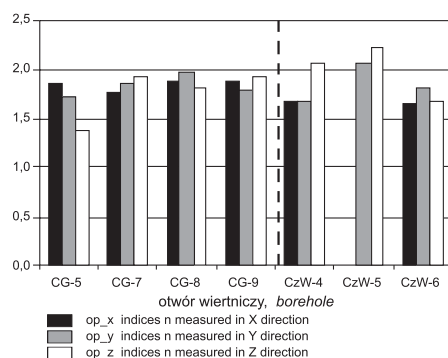


Fig. 5. Średnie wartości wskaźnika zwilżalności  $n$  w otworach wiertniczych

Fig. 5. Average values of wettability indices  $n$  in boreholes

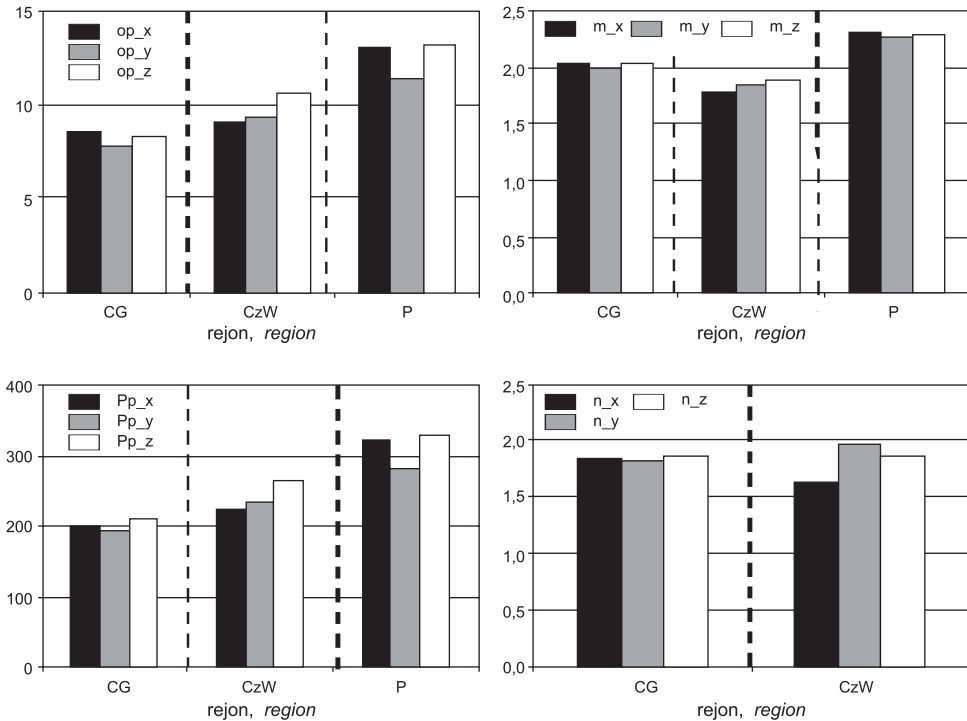
Średnie wartości wskaźnika struktury porowej  $m$  mierzonego na próbkach skał wyciętych w różnych kierunkach a pochodzących z otworów CG-5, 7, 8 oraz CzW-4 nie odbiegają statystycznie od siebie ( $m_x^{sr}$ :  $1.99 \div 2.12$ ,  $m_y^{sr}$ :  $1.98 \div 2.08$ ,  $m_z^{sr}$ :  $2.05 \div 2.11$ ). Najwyższą średnią wartością parametru  $m$  charakteryzują się (podobnie jak poprzednio) próbki z otworu P-28 ( $m_x^{sr}$ :  $2.30$ ,  $m_y^{sr}$ :  $2.26$ ,  $m_z^{sr}$ :  $2.29$ ). Próbkę z otworów: CG-9, CzW-5, 6 posiadają niższe zakresy wartości tego parametru – odpowiednio ( $m_x$ :  $1.75 \div 1.85$ ,  $m_y$ :  $1.71 \div 1.92$ ,  $m_z$ :  $1.80 \div 1.93$ ) (Fig. 4).

Jeśli chodzi o wskaźnik zwilżalności  $n$ , to najbardziej zróżnicowane są wielkości mierzone w kierunku Z (od 1.39 w otworze CG-5 do 2.22 w otworze CzW-5). Wskaźnik  $n$  zmierzony w kierunku X zmienia się od 1.65 do 1.89, zaś w kierunku osi Y przyjmuje wartości z zakresu od 1.68 dla otworu CzW-4 do 2.07 dla otworu CzW-5 (Fig. 5).

Generalnie, dla składowych elektrycznej oporności właściwej  $\rho$  zauważono zależność  $\rho_x > \rho_y < \rho_z$  dla próbek z badanych otworów z wyjątkiem CG-5, gdzie  $\rho_x > \rho_y > \rho_z$  oraz CzW-4,6, gdzie  $\rho_x < \rho_y < \rho_z$ . Analiza średnich wartości parametru porowatości  $Pp$  prowadzi do analogicznych wniosków.

Badanie współczynnika struktury porowej  $m$  również potwierdziło generalną zależność określoną powyżej, z wyłączeniem próbek z otworu CzW-6, które wykazały, że  $m_x < m_y < m_z$ .

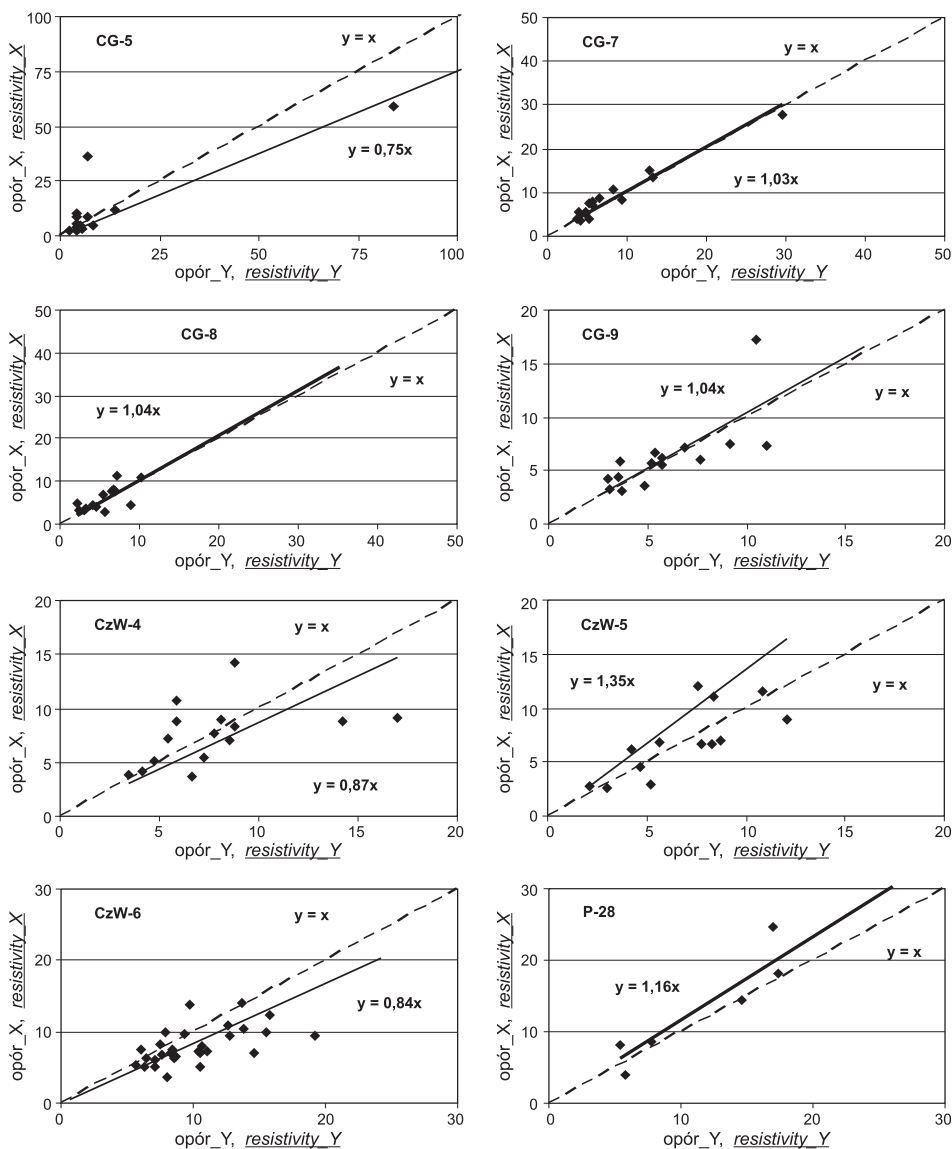
Figura 6 ilustruje średnie wartości elektrycznych parametrów skał w trzech analizowanych rejonach. Z analizy statystycznej wynika, że rejon P wyróżnia się spośród wydzielonych rejonów. Próbkki skał wspomnianego rejonu charakteryzują się najwyższymi średnimi wartościami współczynników struktury porowej  $m$  (śr.  $m$ : 2.26÷2.30), najwyższym parametrem porowatości  $Pp$  (śr.  $Pp$ : 283.2÷328.2) i oporności właściwej (śr.  $\rho$ : 11.3÷13.1  $\Omega\text{m}$ ). W rejonach CG i CzW wskaźniki  $m$  oraz  $n$  nie odbiegają statystycznie od siebie (CG: śr.  $m$ : 1.83÷2.04, śr.  $n$ : 1.82÷1.86, CzW: śr.  $m$ : 1.78÷1.89, śr.  $n$ : 1.63÷1.98). Nieco niższymi średnimi wartościami oporności właściwej i parametru porowatości charakteryzuje się rejon CG w porównaniu z rejonem CzW (rejon CG:  $\rho$ : 7.7÷8.5  $\Omega\text{m}$ ;  $Pp$ : 192.4÷208.5, rejon CzW:  $\rho$ : 9.0÷10.6  $\Omega\text{m}$ ,  $Pp$ : 225.4÷265.4).



**Fig. 6.** Średnie wartości elektrycznych parametrów skał w analizowanych rejonach

**Fig. 6.** Average values of rocks electrical parameters in study area

Sporządzono wykresy zależności poziomej elektrycznej oporności właściwej  $\rho_x$  od pionowej  $\rho_y$  dla ośmiu badanych otworów wiertniczych (Fig. 7). Analizując wartości stosunku  $\rho_x/\rho_y$  w poszczególnych otworach, można stwierdzić, że jest on zbliżony do jedności w otworach CG-7, CG-8 i CG-9, gdzie niemal wszystkie punkty leżą na prostej ( $y=x$ ). Wyróżniają się próbki z otworów CzW-5, gdzie  $\rho_y=1.35\rho_x$  i P-28 gdzie  $\rho_y=1.16\rho_x$ .



**Fig. 7.** Zależność poziomej elektrycznej oporności właściwej  $\rho_X$  od pionowej  $\rho_Y$  dla ośmiu badanych otworów

**Fig. 7.** Dependence of horizontal electrical resistivity  $\rho_X$  vs. vertical  $\rho_Y$  for eight examined boreholes

Histogramy przedstawione na figurze 8 prezentują zmiany współczynnika względnej anizotropii poprzecznej  $K$  i azymutalnej  $A$  dla utworów czerwonego spągowca z rejonu NE obrzeża Wału Wolsztyńskiego. Współczynnik względnej anizotropii poprzecznej, wyznaczony na podstawie pomiarów wykonanych na 119 próbkach z tego rejonu, wykazał w 52%

obserwacji, że  $K\rho < 1$  i  $K_{Pp} < 1$ , a 68% badanych próbek wskazało na wartość współczynnika względnej anizotropii azymutalnej  $A < 1$ , czyli  $\rho_y < \rho_z$ . Podobne zależności charakteryzują również współczynnik porowatości  $K_{Pp}$ . Anizotropię wskaźnika zmian struktury porowej charakteryzuje zależność  $m_y < m_x$  ( $Km < 1$  dla ok. 53% próbek) i  $m_y < m_z$  ( $Am < 1$  dla 67% badanych próbek). Dla wskaźnika zwilżalności  $n$ , połowa ilości badanych próbek (~51%) wykazała, że  $Kn < 1$ . Podobne wyniki otrzymano dla współczynnika anizotropii azymutalnej  $An$  parametru zwilżalności.

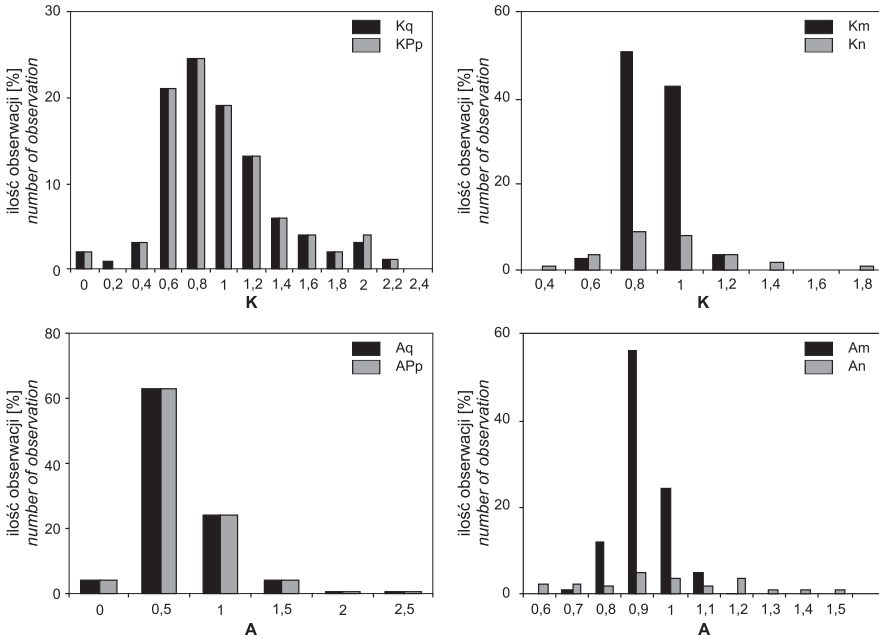


Fig. 8. Histogramy zmian współczynników anizotropii dla utworów czerwonego spągowca

Fig. 8. Histograms of anisotropy factors variation for the Rotliegendes formation

## PODSUMOWANIE

Właściwości elektryczne skał zbiornikowych od dawna są uważane za ważne, ponieważ spośród innych dostępnych profilowań otworowych pomiar oporności stanowi niemal bezpośredni wskaźnik obecności węglowodorów.

Anizotropia elektrycznych parametrów skał ma wpływ na ocenę formacji z zastosowaniem modelu Archiego poprzez powiązanie nasycenia formacji wodą z opornością formacji. Anizotropia skał osadowych jest skutkiem występowania warstw posiadających różne właściwości elektryczne.

Zaniedbywanie istnienia anizotropii może powodować błędną ocenę porowatości i nasycenia wodą formacji. Ponadto, brak zaufania do wyników badań laboratoryjnych, jeżeli stoją one w sprzeczności z wyobrażeniami o tym, jak powinny zachowywać się skały, może również powodować błędną ocenę formacji.



Wydaje się więc, że przed przystąpieniem do ilościowej interpretacji pomiaru oporności skał pozostaje do rozważenia efekt anizotropii elektrycznych parametrów skał.

*Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.*

## LITERATURA

- Archie G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristic. *Petroleum Technology*, 5, 1, 1422–1430.
- Herrick D.C. & Kennedy W.D., 1996. Electrical properties of rocks. Effects of secondary porosity, laminations, and thin beds. *Society of Professional Well Log Analysts*, C, 1–11.
- Kennedy W.D. & Herrick D.C., 2004. Conductivity Anisotropy in Shale-Free Sandstone. *Petrophysics*, 45, 1, 38–58.
- Lin W., 1985. Ultrasonic velocities and dynamic elastic moduli of Mesaverde rocks. *Lawrence Livermore National Laboratory Report*, UCID-20273.
- LaTorraca G.A. & Hall C.G., 1991. Observations of rock fabric controls on the electrical properties of sandstone. *SCA Conference Transactions Society of Core Analyst*, 9116, 1–16.
- Rai C.S. & Hanson K.E., 1988. Shear-wave velocity anisotropy in sedimentary rocks. A laboratory study. *Geophysics*, 53, 800–806.
- Vernik L. & Nur A., 1992. Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source-rocks. *Geophysics*, 57, 727–735.
- Yin H., 1992. Acoustic velocity and attenuation of rocks. Isotropy, intrinsic anisotropy, and stress induced anisotropy. *Ph.D. thesis*, Stanford University, 1–245.
- Zaafraan Z.M., 1981. Studying the effect of sandstone anisotropy on the quantitative interpretation of resistivity sounding and logging. *SPWLA, June 23–26*, BB.
- Zalewska J., Buniak A., Gąsior I., Cebulski D. & Wawrzyniak K., 2008. Metodyka oceny anizotropii skał na podstawie badań laboratoryjnych, danych z profilowań geofizycznych i pomiarów sejsmicznych. *Prace INiG*, 149, 1–95.