

Jadwiga Zalewska, Grażyna Sikora, Irena Gąsior
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Laboratoryjne badania anizotropii sprężystych właściwości skał

W artykule przedstawiono wyniki laboratoryjnych pomiarów anizotropii prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w skałach, w zależności od kierunku pomiaru. Badania anizotropii przeprowadzono zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Vernika, która przewiduje pomiary właściwości skał na trzech rdzeniach: jednym wyciętym równolegle (Y), drugim – prostopadle (X), a trzecim – pod kątem 45° (Z) do osi symetrii próbki. Badania wykonano na 119 rdzeniach wiertniczych, pochodzących z siedmiu otworów wiertniczych, reprezentujących utwory czerwonego spągowca dwóch rejonów poszukiwawczych. Określono współczynniki anizotropii poprzecznej i azymutalnej skał, wyznaczono stałe sprężyste oraz określono parametry Thomsena.

Laboratory studies of anisotropy elastic properties of rocks

This work shows results of the laboratory reasearches into anisotropic rock velocities of ultrasonic wave propagation in relation with direction of the measurement. The investigation of the anisotropy was carry in accordance with method proposed by Vernik, which provide measurement of the rock properties on three cores: one cut parallel (Y), second – perpendicularly (X), and third – at an angle of 45° (Z) to axis of probe symmetry. The measurements carried on 119 rock cores, derived from seven well logs, which represent rotliegend formations of two explorative region. The transverse and azymutal coefficient of anisotropy elastic modulus and Thomsen parameters was determined.

Wstęp

Badania natury fal sprężystych w ośrodkach anizotropowych były przedmiotem wielu opracowań, m.in.: [3, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15].

Vernik [15] badał także prędkość rozchodzenia się fal oraz anizotropię sejsmiczną; zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i *in situ*. Według jego oceny nasza wiedza na temat wielkości anizotropii sejsmicznej i jej zależności przyczynowo-skutkowych jest nadal niewielka. Fakt ten był podstawowym powodem podjęcia prac badawczych w INiG, w zakresie laboratoryjnych badań anizotropii sprężystych właściwości skał.

Standardowe przetwarzanie danych sejsmicznych jest oparte na założeniu izotropii ośrodka w płaszczyźnie warstwowania. W sytuacji, gdy ośrodek jest anizotropowy, takie założenie może prowadzić do poważnych błędów

w poszczególnych etapach przetwarzania i interpretacji danych [1, 7].

Szybki rozwój nowych metod przetwarzania sejsmicznego powoduje potrzebę wprowadzania wskaźników anizotropii do grupy parametrów wejściowych, celem poprawy jakości i dokładności przestrzennych odwzorowań geologicznych. Uwzględnienie wskaźników anizotropii na wstępnym etapie przetwarzania sejsmicznych materiałów prac terenowych ma znaczący wpływ na obliczanie i wprowadzanie poprawek kinematycznych NMO (*Normal Moveout Correction*), analizy prędkości, migrację głębokościową, wprowadzanie poprawek kinematycznych przy obecności upadu DMO (*Dip Moveout Removal*) oraz w analizach zmian amplitudy z offsetem AVO (*Amplitude Versus Offset*).

Badania laboratoryjne

W ramach pracy wykonano kompleksowe badania rdzeni wiertniczych (porozymetryczne, mineralogiczne, spektrometryczne, metodą NMR, przepuszczalności i elektrycznych parametrów skał), ale przede wszystkim prędkości propagacji fal ultradźwiękowych.

Pomiary wykonano na 119 rdzeniach wiertniczych, reprezentujących utwory czerwonego spągowca, które pochodziły z siedmiu otworów wiertniczych i obejmowały dwa rejony poszukiwawcze: Cicha Góra (CG-5, 7, 8, 9) i Czarna Wieś (CzW-4, 5, 6).

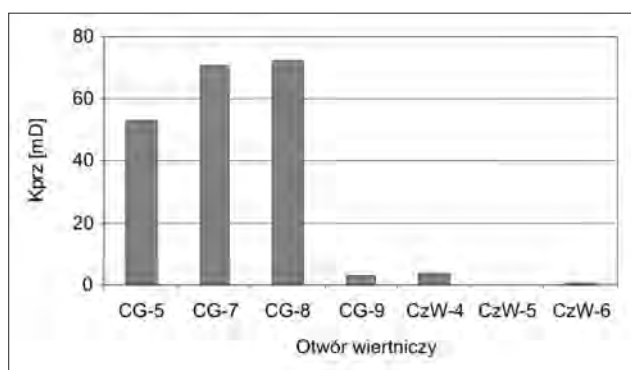
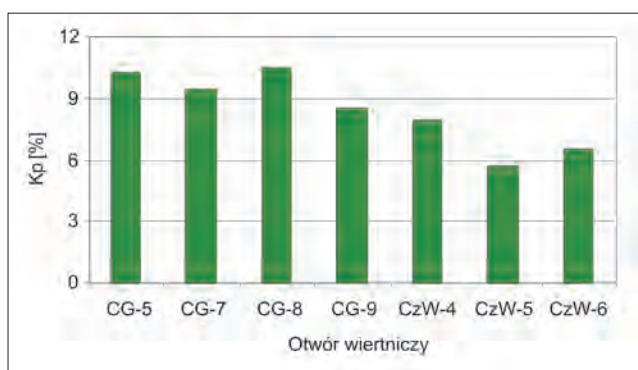
Porozymetria helowa i przepuszczalność absolutna

Badane próbki charakteryzowały się porowatością w zakresie od 0,58 do 20,92%, przy średniej wartości 8,14%. Najwięcej, bo aż 76% próbek posiadało porowatość z przedziału 5÷15%; 19% próbek miało porowatość poniżej 5% i tylko 6% charakteryzowało się porowatością powyżej 15%. Średnie wartości współczynnika porowatości w poszczególnych otworach wiertniczych przedstawiono na rysunku 1.

Analizowane próbki posiadały współczynnik przepuszczalności K_{prz} w zakresie od 0,0 do 738,43 mD. Najwięcej, bo aż 83% wszystkich badanych próbek posiadało przepuszczalność poniżej 5 mD. Najwyższe średnie wartości

wspomnianego współczynnika występowały w otworach wiertniczych CG-7 oraz CG-8 (śr. $K_{prz} = 52,8 \div 72,1$ mD), a w pozostałych średnie te były niższe i przyjmowały wartości od 0,12 do 4,12 mD (rysunek 1).

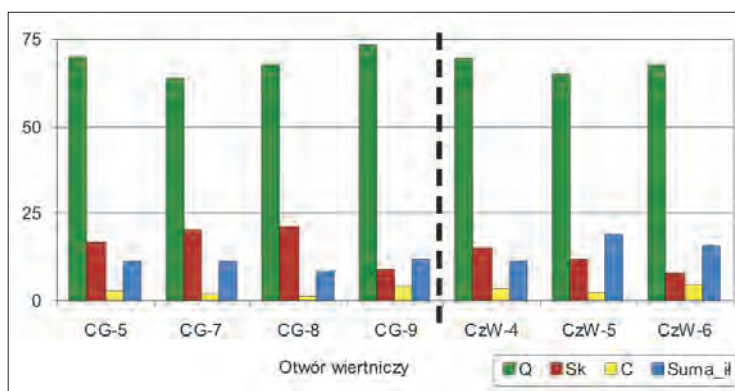
Generalnie należy stwierdzić, że próbki reprezentujące rejon CG cechowały się wyższymi współczynnikami porowatości i przepuszczalności aniżeli próbki pochodzące z rejonu CzW (rejon CG; $K_p = 8,49 \div 10,43\%$, $K_{prz} = 3,33 \div 72,07\%$ mD; rejon CzW; $K_p = 5,73 \div 7,90\%$, $K_{prz} = 0,12 \div 4,12$ mD). Wyjątek stanowiły rdzenie z otw. CG-9, których średnia wartość K_{prz} była równa 3,33 mD i znacząco odbiegała od pozostałych (rysunek 1).



Rys. 1. Histogramy średnich wartości współczynnika porowatości K_p i przepuszczalności K_{prz} w analizowanych otworach wiertniczych

Analiza rentgenowska

Na podstawie badań rentgenowskich stwierdzono, że badane piaskowce czerwonego spągowca charakteryzowały się zróżnicowanym składem mineralnym. Głównym składnikiem był kwarc (którego zawartość zmieniała się w szerokich granicach; od 36 do 88%) i skalenie (1÷39%). Węglany reprezentowane były przez kalcyt (1÷18%), dolomit (1÷17%) i ankeryt (1÷15%). Minerale ilaste to przede wszystkim illit i chloryt (3÷36%). Sporadycznie, w niewielkiej ilości występował anhydryt, hematyt i halit. Na rysunku 2 przedstawiono średnie wartości głównych składników mineralnych w analizowanych otworach wiertniczych.



Rys. 2. Histogramy średnich wartości głównych składników mineralnych w poszczególnych otworach wiertniczych (Q – kwarc, Sk – skalenie, C – kalcyt, Suma_il – sumaryczna zawartość minerałów ilastych)

Jądrowy rezonans magnetyczny

Metodą jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR) wyznaczono współczynnik porowatości całkowitej $K_{p_{NMR}}$ i efektywnej $K_{p_{NMR_{ef}}}$ oraz określono, jaką część przestrzeni

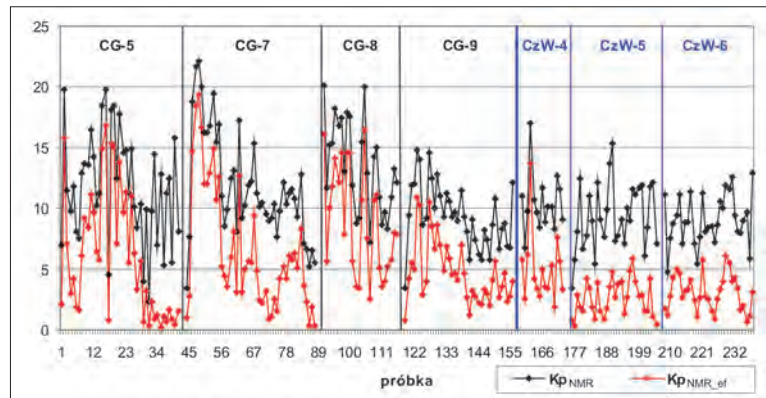
porowej zajmuje woda nieredukowalna (związana w minerałach ilastych i mikroporach – K_{p1}), woda kapilarna (K_{p2}) i woda wolna (K_{p3}), a także określono współczynnik

nasylenia wodą nieredukowalną (Sw_{nr}). Zostało to zilustrowane na rysunkach 3 i 4.

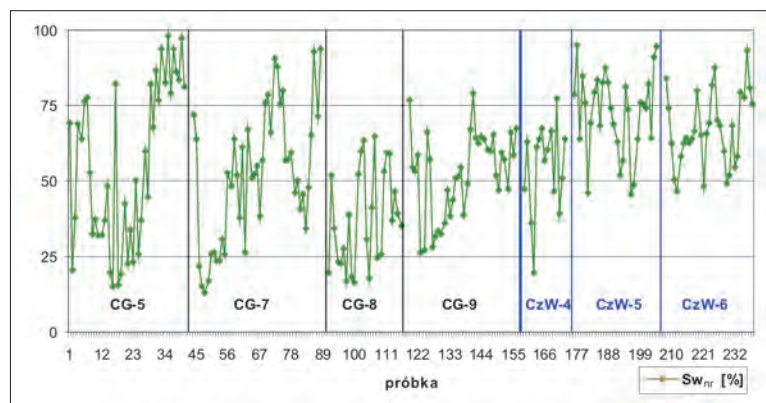
Wyższymi średnimi wartościami współczynników porowatości całkowitej Kp_{NMR} i efektywnej $Kp_{NMR_{ef}}$ wyróżniają się próbki skał z rejonu CG ($Kp_{NMR} = 9,37 \div 13,53\%$; $Kp_{NMR_{ef}} = 4,74 \div 8,95\%$). W odniesieniu do rejonu CzW ($Kp_{NMR} = 9,07 \div 10,37\%$; $Kp_{NMR_{ef}} = 2,60 \div 4,97\%$) (rysunek 3) wyznaczone współczynniki miały wartości niższe.

Spośród parametrów wyznaczonych metodą NMR największym zróżnicowaniem charakteryzował się współczynnik nasylenia wodą nieredukowalną – Sw_{nr} ($Sw_{nr} = 12,86 \div 98,05\%$). Próbkę reprezentujące rejon CG charakteryzowały się niższymi średnimi wartościami tego współczynnika ($Sw_{nr-sr} = 37,70 \div 55,80\%$) w porównaniu z rejonem CzW ($Sw_{nr-sr} = 54,60 \div 72,74\%$) (rysunek 4).

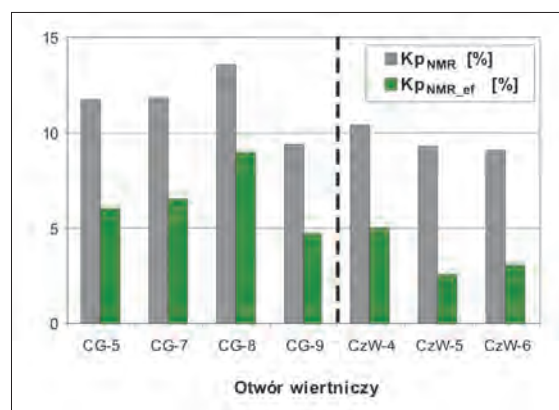
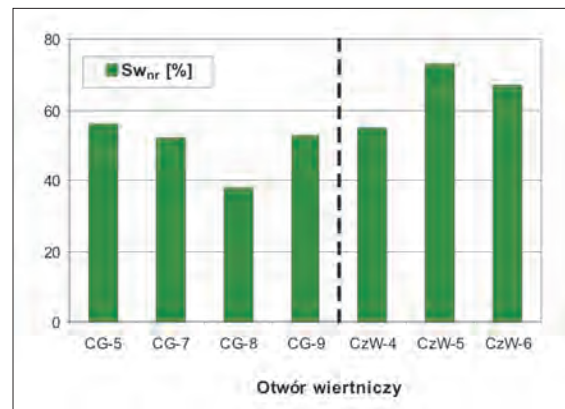
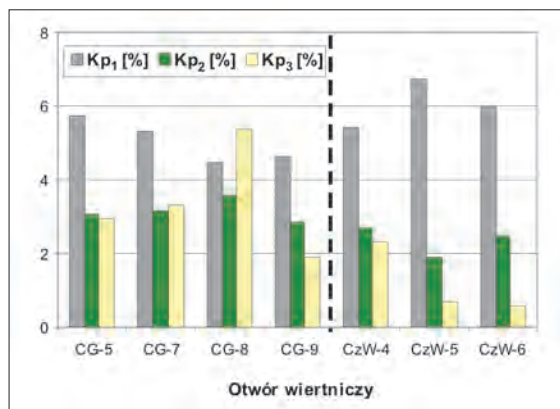
Analizując wielkość przestrzeni porowej wypełnionej wodą nieredukowalną (Kp_1) możemy stwierdzić, że wyższymi wartościami charakteryzowały się próbki reprezentujące rejon CzW, natomiast wyższe wartości wody kapilarnej (Kp_2) i wolnej (Kp_3) widoczne są w rejonie CG (rysunek 5).



Rys. 3. Współczynniki porowatości całkowitej (Kp_{NMR}) i efektywnej ($Kp_{NMR_{ef}}$), zmierzone na próbkach skał metodą NMR



Rys. 4. Współczynniki nasylenia wodą nieredukowalną (Sw_{nr}), zmierzone na próbkach skał metodą NMR



Rys. 5. Średnie wartości parametrów wyznaczonych metodą NMR dla poszczególnych otworów wiertniczych

Propagacja fal ultradźwiękowych

Badania prędkości propagacji fal podłużnych V_p i poprzecznych V_s wykonano defektoskopem ultradźwiękowym UMT-12, umożliwiającym również określenie czasu ich propagacji. W pomiarach zastosowano dwa typy ultradźwiękowych głowic: nadawczych i odbiorczych – odpowiednich dla fal podłużnych i poprzecznych, pracujących przy częstotliwości 1 MHz.

Pomiary laboratoryjne V_p i V_s przeprowadzono na próbkach w kształcie walca o średnicy 1", nasyconych solanką o stężeniu 250 g/l NaCl.

Metodyka prowadzenia badań została opisana w pracy [4]. Uzyskane rezultaty przedstawiono w tablicy 1.

Na rysunkach 6 i 7 zaprezentowano średnie wartości prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych, zmierzone na próbkach skał w poszczególnych otworach wiertniczych.

Najniższe średnie wartości prędkości rozchodzenia się fali podłużnej we wszystkich trzech kierunkach uzyskano dla otworu wiertniczego CG-8 ($V_{pX} = 3704$ m/s, $K_{py} = 3691$ m/s, $V_{pZ} = 3662$ m/s). Generalnie można stwierdzić, że średnie wartości prędkości propagacji fali podłużnej piaskowców czerwonego spągowca w rejonie CG i CzW są do siebie zbliżone.

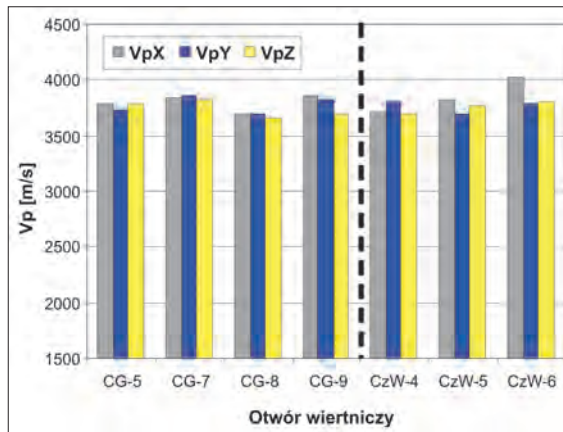
Zestawienie otrzymanych wyników V_s , pomierzonej na identycznym zbiorze próbek (rysunek 7) pozwala za-

uważyć, że zróżnicowanie wartości poszczególnych składowych prędkości V_s w relacji poszczególnych otworów jest mniejsze niż dla V_p (tablica 1).

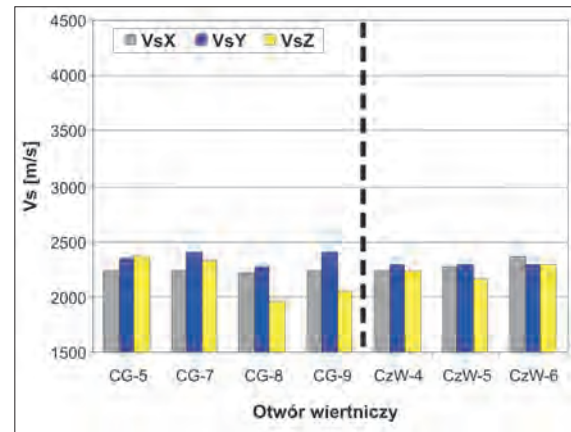
Wartości wszystkich składowych prędkości V_s dla rejonów CG i CzW mieszczą się w granicach $V_s = 1952 \div 2411$ m/s, z czego próbki z CG-8 ($V_{sX} = 2221$ m/s;

Tablica 1. Zestawienie zakresów zmian oraz średnich wartości prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych analizowanych próbek w poszczególnych otworach

Parametr	Ilość próbek	Zakres zmian parametru		Średnia wartość	Ilość próbek	Zakres zmian parametru		Średnia wartość
		od	do			od	do	
Otwór: CG-5				Otwór: CG-7				
Prędkość propagacji fali podłużnej								
V_{pX} [m/s]	14	3102	5140	3795	15	3111	4702	3839
V_{pY} [m/s]	14	2848	5120	3727	15	3157	4578	3854
V_{pZ} [m/s]	14	2774	5044	3780	15	2722	4571	3816
Prędkość propagacji fali poprzecznej								
V_{sX} [m/s]	14	1766	2859	2229	15	1720	2698	2227
V_{sY} [m/s]	14	2002	2845	2351	15	2006	2890	2407
V_{sZ} [m/s]	14	1665	3021	2371	15	1844	2790	2322
Otwór: CG-8				Otwór: CG-9				
Prędkość propagacji fali podłużnej								
V_{pX} [m/s]	15	2994	4228	3704	15	3200	4791	3852
V_{pY} [m/s]	15	2635	4373	3691	15	3452	4518	3825
V_{pZ} [m/s]	15	2945	4099	3662	15	3082	4402	3699
Prędkość propagacji fali poprzecznej								
V_{sX} [m/s]	15	1721	2517	2221	15	1856	2687	2238
V_{sY} [m/s]	15	1746	2606	2270	15	2131	2738	2411
V_{sZ} [m/s]	15	1725	2077	1952	15	1781	2460	2061
Otwór: CzW-4				Otwór: CzW-5				
Prędkość propagacji fali podłużnej								
V_{pX} [m/s]	15	3262	4382	3715	14	2792	4569	3823
V_{pY} [m/s]	15	3260	4382	3800	13	2926	4661	3697
V_{pZ} [m/s]	15	3095	4177	3688	14	3008	4242	3760
Prędkość propagacji fali poprzecznej								
V_{sX} [m/s]	15	1835	2603	2238	14	1730	2625	2267
V_{sY} [m/s]	15	1885	2753	2298	13	1859	2620	2287
V_{sZ} [m/s]	15	1827	2531	2235	14	1696	2479	2157
Otwór: CzW-6								
Prędkość propagacji fali podłużnej					Prędkość propagacji fali poprzecznej			
V_{pX} [m/s]	31	3316	4656	4034	$V_{sX} - 31$	2023	2925	2366
V_{pY} [m/s]	31	3182	4605	3784	$V_{sY} - 31$	1962	3044	2297
V_{pZ} [m/s]	31	3219	4401	3804	$V_{sZ} - 31$	1864	2732	2299



Rys. 6. Średnie wartości prędkości rozchodzenia się fal podłużnych V_p



Rys. 7. Średnie wartości prędkości rozchodzenia się fal poprzecznych V_s

$V_sY = 2270$ m/s; $V_sZ = 1952$ m/s) – podobnie jak dla prędkości fali podłużnej – dały wartości najniższe. Eliminując wskazane wartości ze zbioru danych otrzymamy przedział $V_s = 2061 \div 2411$ m/s, a dla poszczególnych składowych prędkości będą to zakresy: $V_sX = 2227 \div 2366$ m/s;

$V_sY = 2287 \div 2411$ m/s; $V_sZ = 2061 \div 2371$ m/s. Analizując wyniki badań zestawione w tabelicy 1, można stwierdzić, że średnie wartości składowych prędkości fali podłużnej i poprzecznej piaskowców czerwonego spągowca w rejonie CG i CzW są do siebie zbliżone.

Anizotropia propagacji fal ultradźwiękowych

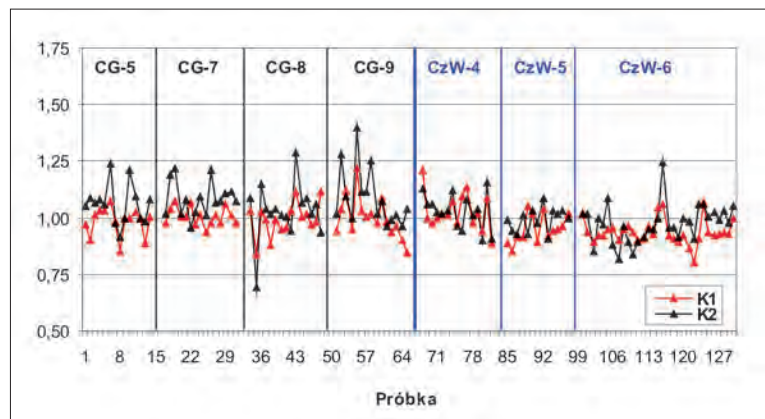
Anizotropia własności sprężystych oznacza różnicowanie prędkości fal sprężystych w zależności od kierunku propagacji fali.

Współczynniki anizotropii poprzecznej (oznaczone symbolem K) wyznaczono z zależności: dla fali podłużnej $K_1 = V_{py}/V_{px}$, a dla fali poprzecznej $K_2 = V_{sy}/V_{sx}$.

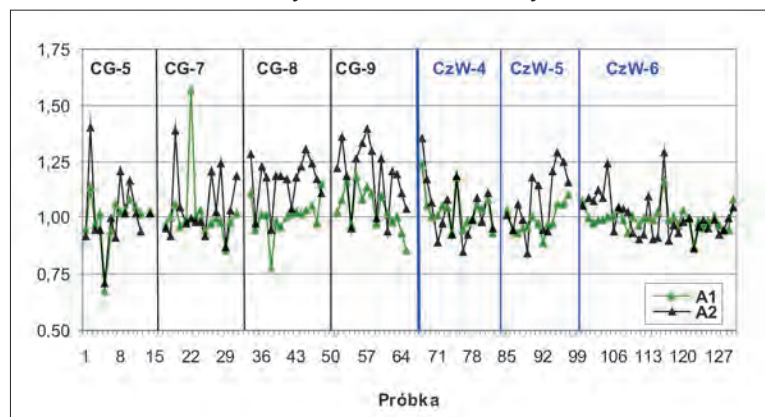
Współczynniki anizotropii azymutalnej (oznaczone symbolem A) oceniono z relacji: dla fali podłużnej $A_1 = V_{py}/V_{pz}$ oraz dla fali poprzecznej $A_2 = V_{sy}/V_{sz}$. Rozkład tych współczynników w badanych otworach wiertniczych zilustrowano na rysunkach 8 i 9.

Wyliczone współczynniki anizotropii prędkości dla skał z przebadanych otworów wiertniczych potwierdzają tezę przedstawioną przez Thomsena [13], że anizotropia fal S jest zazwyczaj większa niż anizotropia fal P (rysunki 10, 11).

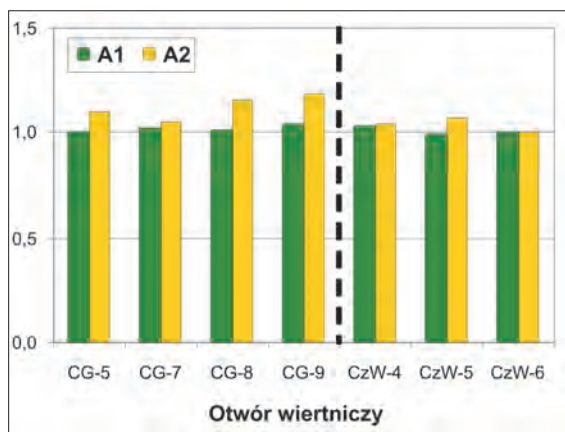
Wielkości współczynników anizotropii azymutalnej A_1 dla fali podłużnej w obu rejonach są do siebie zbliżone; nieco wyższe wartości współczynników anizotropii azymutalnej A_2 dla fali poprzecznej wykazują próbki skał z rejonu CG. Podobne właściwości wykazują współczynniki anizotropii poprzecznej (K_1 , K_2).



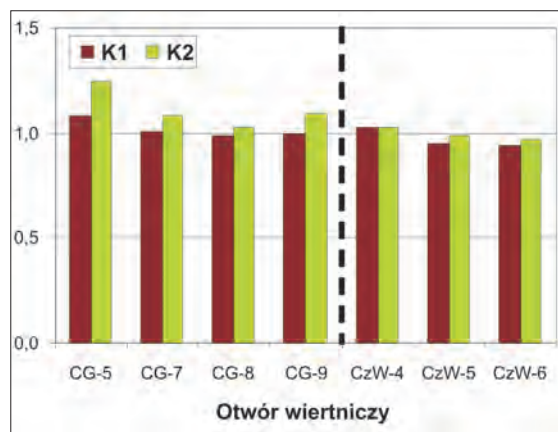
Rys. 8. Rozkład współczynników anizotropii poprzecznej (K_1 , K_2) w badanych otworach wiertniczych



Rys. 9. Rozkład współczynników anizotropii azymutalnej (A_1 , A_2) w badanych otworach wiertniczych



Rys. 10. Średnie wartości współczynników anizotropii azymutalnej w poszczególnych otworach



Rys. 11. Średnie wartości współczynników anizotropii poprzecznej w poszczególnych otworach

Słaba anizotropia

Anizotropia VTI (*Vertical Transverse Isotropy*) jest najprostszym i najczęściej przyjmowanym modelem dla skał osadowych. W sejsmice wykorzystywana jest do modelowania ośrodków płaskorównoległych, zamykających laminację bądź warstwowanie. Charakteryzuje się symetryczną macierzą sztywności, posiadającą pięć niezależnych składowych: C_{11} , C_{13} , C_{33} , C_{44} oraz C_{66} [13, 17].

Do wyznaczenia tych składowych posłużyły prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych, określone na podstawie badań laboratoryjnych. Składowe te, oprócz C_{13} , powstają z zestawienia prędkości fal i gęstości, natomiast składowa C_{13} oceniona została z zależności matematycznej, do której niezbędna jest znajomość przebiegu fali pod kątem 45° . Stałe sprężyste obliczono według wzorów przytoczonych w pracy Wang’a [16] i przedstawiono w tabelicy 2.

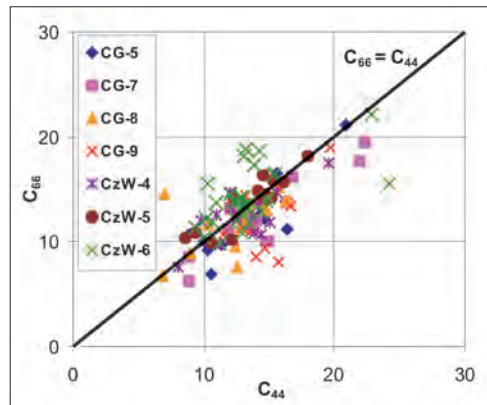
Ogólnie wiadomo, że dla skał izotropowych $C_{11} = C_{33}$ i $C_{44} = C_{66}$, a dla ośrodka

anizotropowego $C_{11} > C_{33}$ i $C_{66} > C_{44}$. Na rysunkach 12 i 13 zestawiono stałe sprężyste C_{44} i C_{66} oraz C_{11} i C_{33} dla

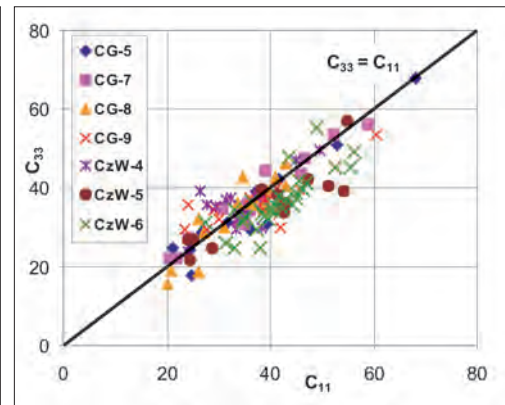
Tabela 2. Zakresy zmian i średnie wartości stałych sprężystych w analizowanych otworach

Parametr	Ilość próbek	Zakres zmian parametru		Średnia wartość	Ilość próbek	Zakres zmian parametru		Średnia wartość
		od	do			od	do	
Otwór: CG-5				Otwór: CG-7				
C_{11}	14	21,30	68,24	36,04	15	20,42	58,96	36,87
C_{13}	11	-10,39	21,64	6,59	14	-6,56	14,13	7,90
C_{33}	14	18,00	67,71	34,83	15	21,98	55,90	37,02
C_{44}	14	8,89	20,91	13,61	15	8,87	22,28	14,41
C_{66}	14	6,90	21,11	12,29	15	6,24	19,41	12,36
Otwór: CG-8				Otwór: CG-9				
C_{11}	15	20,24	42,94	33,25	15	23,60	60,35	37,09
C_{13}	15	-2,53	19,55	6,35	14	-11,76	22,11	3,65
C_{33}	15	15,68	45,93	33,31	15	29,57	53,66	36,16
C_{44}	15	6,88	16,47	12,52	15	11,46	19,71	14,34
C_{66}	15	6,69	15,20	11,94	15	8,07	18,98	12,49
Otwór: CzW-4				Otwór: CzW-5				
C_{11}	15	24,10	49,43	34,37	14	19,51	54,80	38,33
C_{13}	13	-10,76	24,63	6,35	13	-1,88	17,50	7,11
C_{33}	15	24,07	49,43	35,94	13	21,69	57,03	35,56
C_{44}	15	8,05	19,51	13,18	13	8,61	18,02	13,54
C_{66}	15	7,63	17,44	12,48	14	7,49	18,09	13,32
Otwór: CzW-6								
C_{11}	31	27,52	56,13	41,22				
C_{13}	31	-19,50	20,61	7,40				
C_{33}	31	24,60	55,35	36,35				
C_{44}	31	9,35	24,18	13,43				
C_{66}	31	9,96	22,15	14,20				

analizowanych próbek. Jak wynika z przedstawionych rysunków, zdecydowana większość punktów $C_{33} = f(C_{11})$ i $C_{66} = f(C_{44})$ znajduje się w bliskości prostej równej $y = x$ co z większym prawdopodobieństwem pozwala mówić o ośrodku izotropowym. Wszystkie punkty odbiegające od prostej świadczą o anizotropowym charakterze badanych skał.



Rys. 12. Wykres zależności stałych sprężystych C_{66} i C_{44} dla analizowanych próbek skał



Rys. 13. Wykres zależności stałych sprężystych C_{33} i C_{11} dla analizowanych próbek skał

Parametry Thomsena

W oparciu o składowe macierzy naprężeń wyliczono parametry Thomsena [16]: $\delta, \varepsilon, \gamma, \sigma, \eta$ – służące do opisywania „słabych” anizotropii w skałach poprzecznie izotropowych (model VTI). Poszczególne atrybuty opisują: δ – wpływ izotropii poprzecznej na amplitudę fali P , ε – intensywność anizotropii fali P , γ – intensywność anizotropii fali S , σ – wpływ zróżnicowania impedancji akustycznej dla fal P i S na intensywność zjawiska anizotropii fali P , η – wpływ izotropii poprzecznej ośrodka na wielkość anizotropii fali P .

Thomsen [13] opublikował dane dotyczące anizotropii różnych skał osadowych. Jego obserwacje i badania skał wykazały, że większość skał charakteryzuje się słabą anizotropią; mimo że budujące je minerały mogą być silnie anizotropowe. W świetle zdefiniowanych przez Thomsena parametrów,

słaba anizotropia oznacza, że $\varepsilon, \delta, \gamma \ll 1$, a umiarkowana, że $\varepsilon, \delta, \gamma < 0,2$. W tabelicy 3 przedstawiono zakresy zmian

Tablica 3. Zakresy zmian i średnie wartości parametrów anizotropii Thomsena

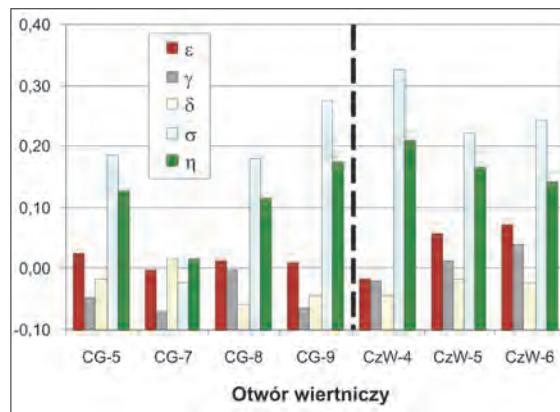
Parametr	Ilość próbek	Zakres zmian parametru		Średnia wartość	Ilość próbek	Zakres zmian parametru		Średnia wartość
		od	do			od	do	
Otwór: CG-5					Otwór: CG-7			
ε	14	-0,068	0,189	0,024	15	-0,064	0,069	-0,003
γ	14	-0,174	0,099	-0,046	15	-0,162	0,044	-0,069
δ	11	-0,243	0,444	-0,017	14	-0,256	0,218	0,017
σ	10	-0,534	0,874	0,187	14	-0,498	0,725	-0,023
η	11	-0,271	0,839	0,127	14	-0,144	0,405	0,016
Otwór: CG-8					Otwór: CG-9			
ε	15	-0,096	0,208	0,014	15	-0,161	0,200	0,011
γ	15	-0,197	0,534	-0,002	15	-0,243	0,042	-0,063
δ	14	-0,288	0,106	-0,059	14	-0,278	0,697	-0,044
σ	14	-0,211	0,675	0,179	13	-0,198	0,598	0,276
η	14	-0,085	0,454	0,113	14	-0,208	0,561	0,175
Otwór: CzW-4					Otwór: CzW-5			
ε	15	-0,161	0,135	-0,018	13	-0,049	0,191	0,059
γ	15	-0,125	0,116	-0,020	13	-0,078	0,103	0,013
δ	13	-0,310	0,393	-0,042	12	-0,247	0,262	-0,018
σ	11	-0,093	0,880	0,326	12	-0,885	0,886	0,221
η	11	-0,028	0,872	0,209	12	-0,204	0,571	0,165
Otwór: CzW-6								
ε	31	-0,063	0,274	0,073				
γ	31	-0,179	0,254	0,039				
δ	31	-0,275	0,384	-0,024				
σ	30	-0,868	0,788	0,241				
η	30	-0,229	0,485	0,141				

oraz średnie wartości parametrów anizotropii Thomsena w poszczególnych otworach wiertniczych.

Wyższymi średnimi wielkościami parametrów: ε , γ , δ , σ , η charakteryzowały się próbki skał reprezentujące rejon CzW (rysunek 14).

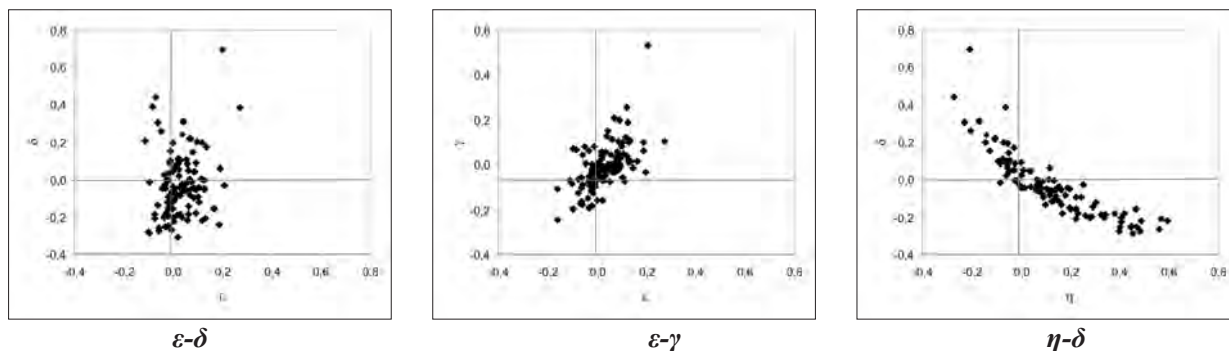
Na wykresach krzyżowych (rysunek 15), zgodnie z sugestią Sayers'a [11], naniesiono parametry anizotropii Thomsena, wyliczone na podstawie danych laboratoryjnych, w celu ich zobrazowania graficznego.

Rysunek 15, sporządzony dla próbek piaskowców czerwonego spągowca z analizowanego rejonu, obrazuje brak korelacji pomiędzy parametrami ε i δ – co pozwala wnioskować o niewystępowaniu w tym przypadku tzw. anizotropii eliptycznej. Parametry ε i δ nie są ze sobą skorelowane i założenie ich równości prowadziłoby do dużych błędów w ocenie anizotropii ośrodka. Anizotropia eliptyczna, jako szczególny przypadek anizotropii TI, raczej nie jest spotykana w przyrodzie [13]. Jak podaje



Rys. 14. Średnie wartości parametrów anizotropii Thomsena w analizowanych otworach wiertniczych

Sayers [11], δ jest najważniejszym parametrem anizotropowym, bowiem wpływa na poprawki kinematyczne (NMO i AVO). Może on przyjmować wartości zarówno dodatnie jak i ujemne, ale fakt ten nie jest jeszcze wytłumaczony.



Rys. 15. Wykres krzyżowy

Podsumowanie

Wyznaczenie współczynników anizotropii skał na podstawie laboratoryjnych badań rdzeni wiertniczych oraz określenie parametrów Thomsena daje informację o prędkościach fal podłużnych i poprzecznych w zależności od kierunku ich propagacji, co pozwala zoptymalizować kryteria oceny anizotropii ośrodka skalnego.

Uzyskane parametry anizotropii powinny być wykorzystane jako dane wejściowe w standardowej interpretacji materiałów sejsmicznych, co umożliwi określenie własności sprężystych ośrodka w stopniu znacznie bar-

dziej precyzyjnym niż dotychczas. Migracja sejsmiczna uwzględniająca anizotropię własności sprężystych ośrodka skalnego pozwoli dokładniej ocenić kształt i głębokość struktur geologicznych.

Niniejsza praca jest pierwszym krokiem inicjującym kierunek badania anizotropii, który pozwoli na ocenę nieuwzględnianych dotąd parametrów, a w konsekwencji dostarczy danych do interpretacji sejsmicznych – umożliwiających posługiwanie się algorytmami przetwarzania z zastosowaniem parametrów anizotropii.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

[1] Banik N.C.: *Velocity anisotropy of shales and depth estimation in the North Sea basin*. Geophysics, vol. 49, 1984.
 [2] Banik N.C.: *An effective anisotropy parameter in transversely isotropic media*, Geophysics, vol. 52, 1987.
 [3] Cerveny V.: *Ray tracing in factorized anisotropic inhomogeneous media*. Geoph. J. Inter. 99, s. 91-100, 1989.
 [4] Ciechanowska M., Zalewska J.: *Anizotropia sprężystych właściwości skał*. Materiały z konferencji Geopetrol 2006, s. 587-600.

- [5] Jech I., Psenicik I.: *First order perturbation method for anisotropic media*. Geoph. J. Inter. 99, s. 100-112, 1989.
- [6] Jędrzejowska-Tyczkowska H., Bartoń R., Żukowska K.: *Meta-atrybuty sejsmiczne – koncepcja i zastosowania praktyczne*. Nafta-Gaz nr 10, 2006.
- [7] Kendall R., i in.: *Anisotropic prestack migration for multicomponent data – methodology and examples*. Extended Abstracts 63th EAGE Conference, 2001.
- [8] Kostecki A., Półchłópek A.: *Studium odwzorowania strukturalnego w ośrodku anizotropowym VTI*. Materiały z konferencji Geopetrol 2006.
- [9] Kostecki A., Półchłópek A.: *Studium odwzorowania strukturalnego w ośrodku anizotropowym VTI*. Nafta-Gaz nr 10, 2006.
- [10] Petrashen G.: *Wave propagation in anisotropic elastic media*. Nauka, Leningrad 1980.
- [11] Sayers C.M.: *Seismic anisotropy of shales*. Geophysical Prospecting, 53, s. 676-776, 2005.
- [12] Shearer P., Chapman C.: *Ray tracing in anisotropic media with linear gradient*. Geoph. J. Inter. 94, 575-580, 1988.
- [13] Thomsen L.: *Weak elastic anisotropy*. Geophysics nr 10, vol. 51, s. 1954-1966, 1986.
- [14] Thomsen L.: *Seismic anisotropy*. Geophysics nr 1, vol. 66, s. 40-41, 2001.
- [15] Vernik L., Nur A.: *Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source-rocks*. Geophysics, 57, s. 727-735, 1992.
- [16] Wang Z.: *Seismic anisotropy in sedimentary rocks. Part 1: A single-plug laboratory method*. Geophysics nr 5, vol. 67, s. 1415-1422, 2002; *Part 2: Laboratory data*. Geophysics nr 5, vol. 67, s. 1423-1440, 2002.
- [17] Winterstein D.F.: *Velocity anisotropy terminology for geophysicists*. Geophysics, 55, s. 1070-1088, 1990.
- [18] Zalewska J., Sikora G., Gąsior I.: *Laboratoryjne badania anizotropii sprężystych właściwości skał*. I Polski Kongres Geologiczny, Kraków 26-28 czerwca 2008.



Mgr inż. Grażyna SIKORA – absolwentka Politechniki Krakowskiej, kierunku Inżynieria Chemiczna i Procesowa, specjalność Inżynieria Procesów Technologicznych. Od lutego 2007 r. pracownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej INiG w Krakowie.



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



Mgr Irena GĄSIOR – absolwentka Wydziału Matematyki UJ. Zajmuje się opracowywaniem nowych metod pomiarowo-interpretacyjnych profilowań geofizyki wiertniczej. Jest autorką m.in. programów komputerowych do interpretacji profilowań geofizyki wiertniczej oraz oprogramowania dla geofizycznego systemu GEOBAZA i GEOBANK. Współautorka systemu GeoWin.

ZAKŁAD GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

Zakres działania:

- rójwymiarowa wizualizacja i analiza wewnętrznej struktury przestrzeni porowej skał metodą mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT);
- określanie rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej próbek skał i kamienia cementowego metodą magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR);
- oznaczanie jakościowego i ilościowego składu mineralnego skał oraz wydzielonej frakcji ilastej na podstawie analizy rentgenowskiej;
- wyznaczanie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych: uranu, toru i potasu w skałach, płuczkach wiertniczych i materiałach budowlanych;
- ocena elektrycznych parametrów skał (wskaźnika struktury porowej i zwilżalności);
- określanie zależności elektrycznej oporności właściwej płuczek wiertniczych od temperatury;
- ocena prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w skałach, kamieniach cementowych i płuczkach wiertniczych;
- interpretacja profilowań geofizycznych w zakresie oceny stanu zacementowania rur okładzinowych w otworach wiertniczych;
- wyznaczanie kategorii zwiercalności skał na podstawie profilowań geofizyki wiertniczej, w korelacji z fizyko-mechanicznymi i sprężystymi właściwościami rdzeni wiertniczych.

Kierownik: mgr inż. Jadwiga Zalewska

Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków

Faks: 12 650-67-70, 12 653-16-65

Telefon: 12 653-25-12 wew. 132 lub 165

E-mail: jadwiga.zalewska@inig.pl