

## MODELE PRĘDKOŚCIOWE NA POTRZEBY SEJSMIKI NA PODSTAWIE PROFILOWAŃ GEOFIZYKI OTWOROWEJ

### Velocity models for seismics based on well log data

Jadwiga JARZYNA, Maria BAŁA & Paulina KRAKOWSKA

*AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,  
Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geofizyki;  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;  
e-mail: jarzyrna@agh.edu.pl, bala@geol.agh.edu.pl, krakow@agh.edu.pl*

**Treść:** Prędkości fal sprężystych, podłużnych  $V_p$  i poprzecznych  $V_s$  wyznaczono na podstawie pomiaru sondą FWS oraz w wyniku przetwarzania akustycznych obrazów falowych w aplikacji FalaFWS w systemie GeoWin. Do obliczenia prędkości obu typów fal oraz gęstości objętościowej użyto także teoretycznych wzorów łączących wielkości zależne od składu mineralnego, porowatości, współczynnika nasycenia wodą i rodzaju medium w porach skalnych w programie Estymacja. Porównano uzyskane wyniki w zakresie czasów interwałowych fal P i S, gęstości objętościowej i dynamicznych modułów sprężystości – Younga, ściśliwości objętości i postaci oraz stałej Poissona. Stwierdzono, że gdy nie ma wyników pomiaru w postaci  $V_p$  i  $V_s$  oraz nie ma zarejestrowanych akustycznych obrazów falowych, program Estymacja jako jedyny daje oczekiwane wyniki. Aplikacja FalaFWS poszerza zakres dostępnych wyników w strefach o niskich prędkościach fali S w stosunku do wyników bezpośredniego pomiaru.

**Słowa kluczowe:** profilowanie akustyczne, prędkość fal sprężystych podłużnych i poprzecznych, profilowanie FWS, program Estymacja, aplikacja FalaFWS, Niż Polski

**Abstract:** Compressional ( $V_p$ ) and shear ( $V_s$ ) elastic waves velocities were determined from logging measurements using FWS tool and acoustic full wavetrains processing using FalaFWS application in GeoWin system. Estymacja program was used to calculate both types of wave velocities ( $V_p$ ,  $V_s$ ) and bulk density theoretical formulas, which combine quantities dependent on mineral composition, porosity, water saturation and type of medium in the rock. The results were compared with respect to P and S waves slowless, bulk density and dynamic elastic moduli: Young modulus, bulk modulus, shear modulus and Poisson ratio. It was determined that in the absence of  $V_p$  and  $V_s$  with a lack of acoustic full wavetrains registration, only the Estymacja program provides the expected results. The FalaFWS application broadens the range of results compared to logging results in depth sections where velocity of mud is higher than the velocity of S wave in formation.

**Key words:** sonic logging, velocity of elastic waves, longitudinal wave, shear wave, FWS logging, Estymacja software, FalaFWS application, Polish Lowland

## WPROWADZENIE

Modele prędkościowe oraz analizę zmian dynamicznych parametrów sprężystości opracowano na potrzeby przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych na wybranym profilu przygotowanym w ramach projektu *Poprawa efektywności badań sejsmicznych w poszukiwaniach i rozpoznawaniu złóż gazu ziemnego w utworach czerwonego spągowca* (Górecki *et al.* 2010). Wyniki w zakresie prędkości fal podłużnych i poprzecznych oraz dynamicznych modułów Younga (E), ścisłości objętości (K) i postaci (MI) oraz współczynnika Poissona (NI), uzyskano na podstawie danych z trzech źródeł: pomiaru sondą FWS, przetwarzania i interpretacji akustycznych obrazów falowych (AOF) pomierzonych sondą FWS z użyciem aplikacji FalaFWS w systemie GeoWin oraz obliczenia prędkości fali P i S i gęstości objętościowej oraz dynamicznych modułów E, K, MI, NI w programie Estymacja.

Pomiary wykonane sondą FWS (Halliburton) dostarczyły danych na temat prędkości fal P i S w badanych interwałach z wyjątkiem stref, w których prędkość fali w płucze była wyższa niż prędkość fali S w badanej formacji (Baudzis 2002). W takich odcinkach poprawne wyniki uzyskano, stosując przetwarzanie akustycznych obrazów falowych programem FalaFWS w systemie GeoWin (Jarzyna *et al.* 2002, 2007, 2010). W interwałach, w których wykonano kompleksową interpretację profilowań geofizyki otworowej pod względem wyznaczenia porowatości i składu mineralnego oraz nasycenia wodą, zastosowano obliczanie prędkości fal sprężystych, gęstości objętościowej i dynamicznych modułów sprężystości z użyciem programu Estymacja (Bała & Cichy 2003, 2006).

## MATERIAŁ BADAWCZY

Prace w zakresie wyznaczenia parametrów sprężystych wykonano w otworach przedstawionych w tabeli 1, stosując ww. metody w zależności od dostępnych danych pomiarowych i wyników kompleksowej interpretacji. W przypadku otworów starszych, w których nie przeprowadzono pomiarów akustycznych z pełnym obrazem falowym oraz w odniesieniu do których nie były dostępne wyniki kompleksowej interpretacji profilowań geofizyki otworowej, wykonano taką interpretację (Górecki *et al.* 2010), aby zdobyć dane wejściowe do programu Estymacja.

**Tabela (Table) 1**

Wyznaczenie prędkości fal sprężystych i dynamicznych modułów sprężystości w otworach w obszarze badań

*Determination of elastic waves velocity and dynamic elastic parameters in wells within study area*

Otwór Well	Interwał głębokości [m] <i>Depth interval</i>	Dostępne wyniki pomiarów i interpretacji <i>Available measurement and interpretation results</i>	Parametry sprężyste wyznaczone na podstawie interpretacji <i>Elastic parameters determined on the basis of interpretation</i>
Winna Góra 1	116–3652 (pomiar) <i>(measurement)</i> 116–2956	AOF, $V_p$ i $V_s$ (FWS), PHI, SW, VSH, VSA, VLI, VDO, VANH	sonda FWS, program FalaFWS, program Estymacja <i>FWS tool, FalaFWS program, Estymacja program</i>

**Tabela (Table) 1** cd. / cont.

Środa Wielkopolska 4	150–3701	AOF, $V_p$ i $V_s$ (FWS), PHI, SW, VSH, VSA, VLI, VDO, VANH	sonda FWS, program FalaFWS, program Estymacja FWS tool, FalaFWS program, Estymacja program
Środa Wielkopolska 5	145–3652	AOF, $V_p$ i $V_s$ (FWS)	sonda FWS, program FalaFWS FWS tool, FalaFWS program
Golce 1	300–4144	PHI, SW, VSH, VSA, VLI, VDO, VANH	program Estymacja Estymacja program
Obrzycko 1	40–4380	PHI, SW, VSH, VSA, VLI, VDO, VANH	program Estymacja Estymacja program
Piła IG-1	5–5380	PHI, SW, VSH, VSA, VLI, VDO, VANH	program Estymacja Estymacja program

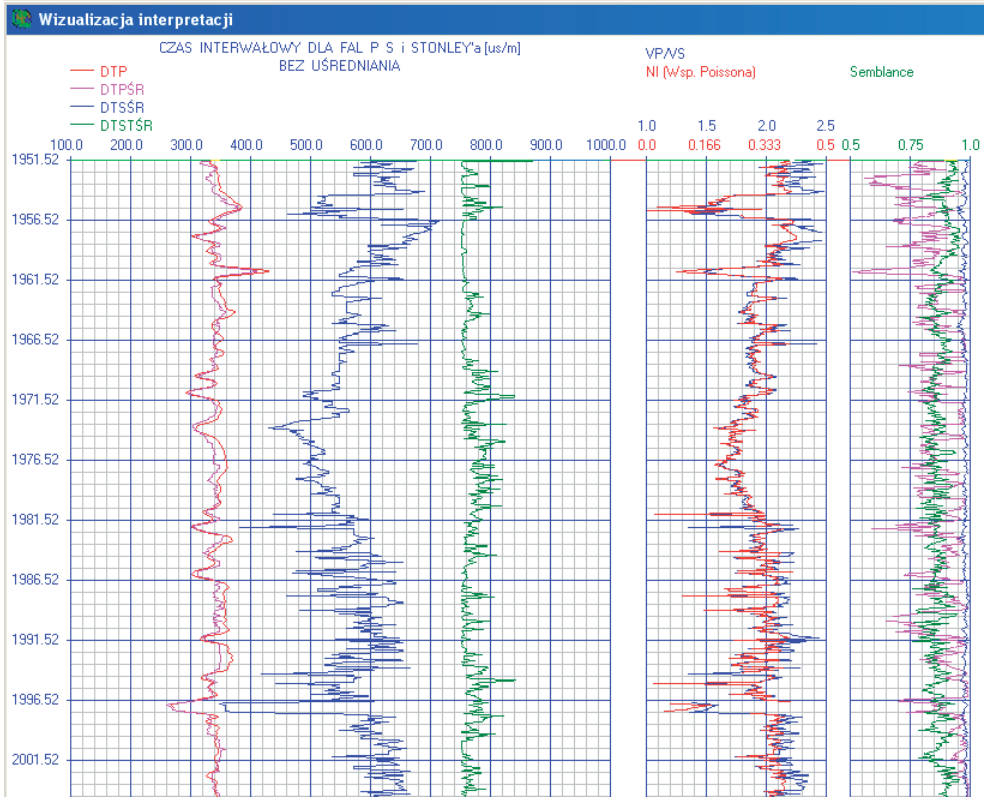
AOF – akustyczne obrazy falowe / *acoustic full wavetrains*;  $V_p$ ,  $V_s$  (FWS) – prędkości będące wynikiem pomiaru i przetwarzania danych z sondy FWS / *velocities which are the result of measurement and data processing from FWS tool*; PHI, SW, VSH, VSA, VLI, VDO, VANH – porowatość, współczynnik nasycenia wodą i objętość składników mineralnych, odpowiednio: łu, piaskowca, wapienia, dolomitu, anhydrytu, będące wynikami kompleksowej interpretacji profilowań geofizyki otworowej / *porosity, water saturation, and mineral components volume, claystones, sandstones, limestones, dolomites, anhydrites, respectively, which are the results of complex well logging interpretation*; VPEQ, VSEQ, RHEQ, NIEQ – wyniki programu Estymacja, odpowiednio: prędkość fali P, prędkość fali S, gęstość objętościowa, współczynnik Poissona / *results of Estymacja program: P-wave velocity, S-wave velocity, bulk density, Poisson ratio, respectively*.

## METODYKA

Aplikacja FalaFWS umożliwia analizę pojedynczych zapisów falowych w funkcji czasu. Taka analiza jest podstawą wyznaczenia współczynnika dobroci  $Q$  i współczynnika tłumienia fal sprężystych podłużnych i poprzecznych. W aplikacji tej możliwe jest także wykonanie automatycznej interpretacji zapisów falowych w celu uzyskania wartości czasu interwałowego fal P, S i Stoneleya w profilu otworu.

W przypadku otworów, w odniesieniu do których dysponowano akustycznymi obrazami falowymi (AOF), wykonano automatyczną interpretację z użyciem aplikacji FalaFWS. Wyniki interpretacji stanowiły podstawę do obliczenia elementarnych statystyk dla parametrów sprężystych. Interpretację z użyciem aplikacji FalaFWS wykonano z krokiem identycznym jak krok pomiarowy, 0.1 m.

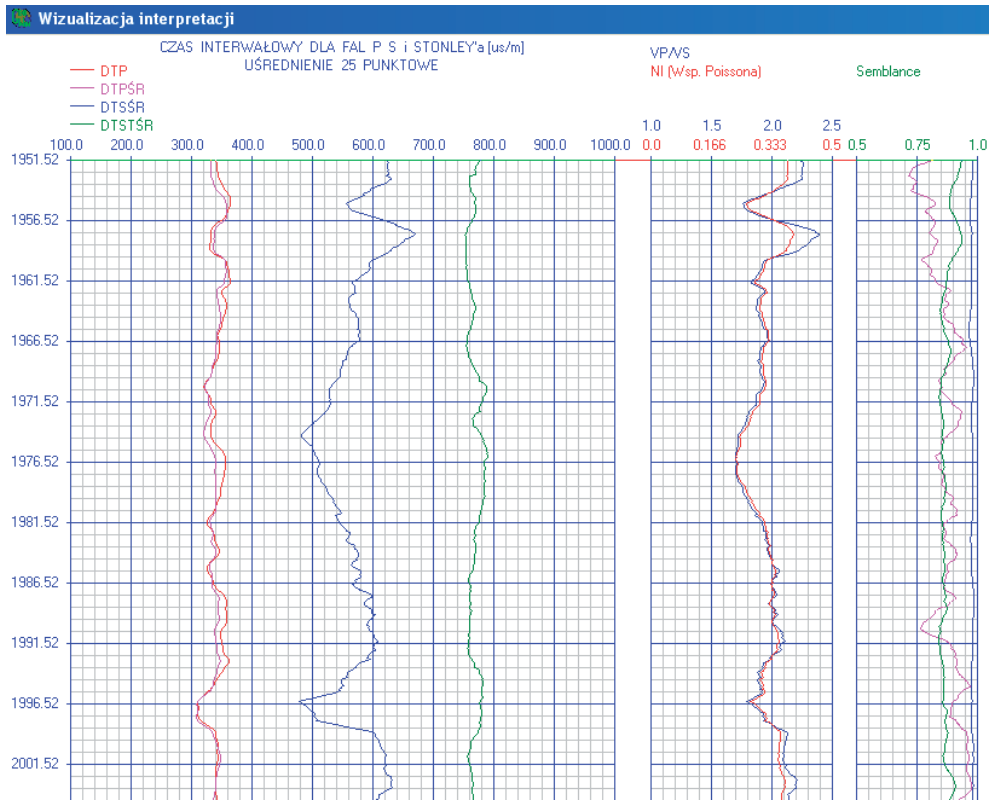
W aplikacji FalaFWS czasy interwałowe fali podłużnej, poprzecznej i Stoneleya są obliczane z wykorzystaniem funkcji semblance dla sześciu par akustycznych obrazów falowych, następnie obliczana jest wartość średnia. Wyniki zmian parametru wraz z głębokością są dostępne w postaci profilowań oraz jako tabele. Można dokładnie prześledzić wpływ średnicy otworu lub zmian innych parametrów, np. nasycenia gazem, na uzyskane wartości parametrów sprężystych.



**Fig. 1a.** Wynik interpretacji w aplikacji FalaFWS (GeoWin) w interwale 1951.52–2001.52 m, w otworze Środa Wielkopolska 5; czas interwałowy fali P, S i Stoneleya – odpowiednio kolory czerwony, niebieski i zielony; stosunek  $V_p/V_s$  i współczynnik Poissona – odpowiednio kolory niebieski i czerwony, semblance – wartość funkcji decydującej o czasach interwałowych fal P, S i Stoneleya

**Fig. 1a.** Interpretation results with FalaFWS application (GeoWin) at depth section 1951.52–2001.52 m in Środa Wielkopolska 5 well, P-wave, S-wave and Stoneley-wave slowness – color red, blue and green, respectively;  $V_p/V_s$  ratio and Poisson coefficient – color blue and red, respectively, semblance – value of function decided on the slowness of P, S and Stoneley waves

W aplikacji FalaFWS wykonano także uśrednianie wyników wzdłuż głębokości z zadanym krokiem. Prędkości fali podłużnej, poprzecznej oraz stosunek  $V_p/V_s$  w otworze Środa Wielkopolska 5, w interwale głębokości 1951.52–2001.52 m przedstawiono na figurze 1. W tabeli 2 zestawiono wartości podstawowych statystyk (średnia, minimum, maksimum i odchylenie standardowe oraz liczba danych) dla wybranych parametrów charakteryzujących ośrodki skalny. Czasy interwałowe fali podłużnej i poprzecznej zostały podane dwukrotnie, ponieważ w przypadku tego otworu dysponowano wartościami DC25 i DS25 z pomiaru oraz obrazami falowymi.



**Fig. 1b.** Wynik interpretacji w aplikacji FalaFWS (GeoWin) w interwale 1951.52–2001.52 m w otworze Środa Wielkopolska 5, po filtracji 25-punktowej; czas interwałowy fali P, S i Stoneleya – odpowiednio kolory czerwony, niebieski i zielony; stosunek  $V_p/V_s$  i współczynnik Poissona – odpowiednio kolory niebieski i czerwony, semblance – wartość funkcji decydującej o czasach interwałowych fal P, S i Stoneleya

**Fig. 1b.** Interpretation results with FalaFWS application (GeoWin) at depth section 1951.52–2001.52 m in Środa Wielkopolska 5 well, after 25-points filtration; P-wave, S-wave and Stoneley-wave slowness – color red, blue and green, respectively;  $V_p/V_s$  ratio and Poisson coefficient – color blue and red, respectively, semblance – value of function decided on the slowness of P, S and Stoneley waves

Na figurze 1 obserwuje się znaczną zmienność średniej wartości czasu interwałowego fali S przy małej zmienności tego parametru dla fali P. Zmienność czasu interwałowego fali S pociągnęła za sobą znaczną rozpiętość wartości współczynnika Poissona. W tabeli 2 widoczna jest różnica w wartościach podstawowych statystyk dla parametrów sprężystych wyznaczonych jako wyniki pracy programu FalaFWS (DP25, DS25, EE25, KK25, MI25, NI25 i  $V_p/V_s$ ) i jako wyniki pomiaru sondą FWS (DC25 i DS25). Liczba 25, występująca w mnemonikach, odpowiada uśrednieniu wyników z krokiem 25 punktów (podstawowy krok pomiarowy wynosił 0.1 m). W przypadku czasu interwałowego fali podłużnej różnice

nie są istotne, w przeciwieństwie do czasu fali S. W tabeli 2 obserwuje się odpowiednio większą zmienność odchylenia standardowego dla wysokich wartości DS25 z interpretacji programem FalaFWS w porównaniu z wartościami uzyskanymi w efekcie pomiaru sondą FWS. Wyższe odchylenia standardowe korelują z większym przedziałem zmienności czasu interwałowego fali S. Ponieważ często obserwowano zawyżone wartości średnie, minimalne i maksymalne, wyznaczone na podstawie interpretacji w programie FalaFWS dla fali S, w obliczeniach modułów sprężystości przyjęto minimalną wartość DS25.

**Tabela (Table) 2**

Podstawowe statystyki dla wybranych parametrów sprężystych w otworze Środa Wielkopolska 5 w interwale głębokości 3540.3–3652 m, perm dolny (P1-1), czerwony spągowiec: piaskowce drobnoziarniste i średnioziarniste, brązowe, czerwone

*Basic statistics for selected elastic parameters in Środa Wielkopolska 5 well, at depth section 3540.3–3652 m, Lower Permian (P1-1), Rotliegend: fine grained and middle grained sandstones, bronze and red colored*

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch. std.
<i>Variable</i>	<i>N.</i>	<i>Av.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>St. dev.</i>
DP25	45	244	167	269	19
DS25	45	583	448	676	69
EE25	45	20.42	14.75	33.56	4.78
KK25	45	31.79	19.39	87.77	11.26
MI25	45	7.44	5.22	12.58	2.01
NI25	45	0.38	0.26	0.46	0.05
$V_p/V_s$	45	2.41	1.75	3.49	0.36
CAL25	44	146	141	160	4
DC25	44	245	180	282	19
DS25	43	421	290	463	38
GR25	44	42	32	60	7
RH25	44	2.41	2.31	2.69	0.08

Zmienna / *variable*; N ważnych *N.* / *numbers*; Średnia *Av.* / *average*; Minimum *Min.* / *minimum*; Maksimum *Max.* / *maximum*; Odch. std. *St. dev.* – odchylenie standardowe / *standard deviation*.

DP25 [ $\mu\text{s/m}$ ], DS25 [ $\mu\text{s/m}$ ] oraz EE25 [GPa], KK25 [GPa], MI25 [GPa], NI25,  $V_p/V_s$  – odpowiednio średnie wartości czasu interwałowego fali P i S oraz modułów Younga, ścisłości objętości i odkształcenia postaci oraz współczynnika Poissona i stosunek prędkości fal P i S (wynik aplikacji FalaFWS) / *average values of P- and S-wave slowness and Young modulus, bulk modulus, shear modulus, Poisson ratio and also P- and S-wave velocity ratio (result of FalaFWS application), respectively*; DC25 i DS25 – wyniki pomiaru sondą FWS / *results of FWS tool measurement*; GR25 i RH25 – wyniki standardowych profilowań gamma i gęstości objętościowej / *results of standard gamma log and bulk density*.

Nie zawsze rozbieżność między wynikiem interpretacji w aplikacji FalaFWS i wynikiem pomiaru była tak duża, jak pokazano w tabeli 2. W tabeli 3 podano wyniki podstawowych statystyk obliczonych dla wybranych parametrów sprężystych w otworze Środa Wielkopolska 5, w interwale głębokości 2256.5–2365.5 m, odpowiadającym utworom triasu dolnego (Tp3), pstręgo piaskowca górnego (retu).

**Tabela (Table) 3**

Podstawowe statystyki dla wybranych parametrów sprężystych w otworze Środa Wielkopolska 5 w interwale głębokości 2256.5–2365.5 m, trias dolny (Tp3), pstry piaskowiec górny (ret): łożysce wapieniste, wapienie, margle, anhydryty

*Basic statistics for selected elastic parameters in Środa Wielkopolska 5 well, at depth section 2256.5–2365.5 m, Lower Triassic (Tp3), Upper Variegated Sandstone (Roethian): carbonate mudstones, limestones, marls, anhydrites*

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch. std.
<i>Variable</i>	<i>N.</i>	<i>Av.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>St. dev.</i>
DP25	44	200	157	267	31
DS25	44	402	300	541	70
EE25	44	49.38	26.19	80.44	17.48
KK25	44	46.57	28.05	67.61	12.69
MI25	44	18.76	9.23	31.30	6.89
NI25	44	0.32	0.26	0.42	0.04
$V_p/V_s$	44	2.02	1.67	3.04	0.26
CAL25	44	319	317	321	1
DC25	44	199	157	269	30
DS25	28	358	313	473	41
GR25	44	47	21	97	20
RH25	44	2.75	2.60	2.94	0.10

DP25 [ $\mu\text{s/m}$ ], ... – oznaczenia jak w tabeli 2.

*DP25 [ $\mu\text{s/m}$ ], ... – symbols as in table 2.*

Aplikacja FalaFWS daje także możliwość wyznaczenia prędkości fali S, a zatem stosunku  $V_p/V_s$  w tych fragmentach otworu, gdzie prędkość fali podłużnej w płuczce jest większa od prędkości fali S w formacji skalnej. Taka możliwość jest istotna w ośrodkach płytko zalegających, nieskonsolidowanych, w których nie można sondami akustycznymi, np. FWS, poprawnie zarejestrować akustycznego obrazu falowego w zakresie fali poprzecznej. W takich przypadkach prędkość fali S jest wyznaczona na podstawie prędkości fali Stoneleya, prędkości fali w płuczce oraz gęstości objętościowej formacji skalnej i płuczki. Prędkość

fali Stoneleya jest wynikiem interpretacji w aplikacji FalaFWS. Dlatego też, niezależnie od wyników dostarczonych przez PGNiG SA Oddział w Zielonej Górze, wykonano automatyczną interpretację akustycznych obrazów falowych w aplikacji FalaFWS i uzyskano  $V_p$  i  $V_s$  oraz dynamiczne moduły EE, KK, MI i NI w całych profilach badanych odcinków otworów, w których dostępne były wyniki pomiarów sondą FWS (Tab. 1). Interpretacja była prowadzona w otworach na Niżu Polskim przewiercających cechsztyńskie formacje solne. Zatem otwory były wypełnione zasolonymi płuczkami, w odniesieniu do których należy przyjąć stosunkowo wysokie prędkości. Dlatego też podczas pomiarów sondą FWS nie zawsze uzyskiwano wartość czasu interwałowego fali S. W takich przypadkach wynik aplikacji FalaFWS stanowił uzupełnienie brakujących wartości.

**Tabela (Table) 4**

Podstawowe statystyki dla wybranych parametrów sprężystych w otworze Środa Wielkopolska 5 w interwale głębokości 1056–1442 m, trias górny, retyk (Tre), iłowce, mułowce, piaskowce

*Basic statistics for selected elastic parameters in Środa Wielkopolska 5 well, at depth section 1056–1442 m, Upper Triassic, Rhaetic (Tre), claystone, mudstone, sandstone*

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch. std.
<i>Variable</i>	<i>N.</i>	<i>Av.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>St. dev.</i>
DP25	162	308	231	411	37
DS25	162	513	416	656	51
EE25	162	21.95	13.49	33.13	4.14
KK25	162	13.69	4.11	28.01	5.85
MI25	162	9.31	5.47	14.23	1.74
NI25	145	0.21	0.01	0.38	0.10
$V_p/V_s$	162	1.68	1.31	2.31	0.25
CAL25	162	336	310	417	20
DC25	162	309	225	421	40
GR25	162	70	31	113	10
RH25	162	2.39	1.88	2.72	0.14

DP25 [ $\mu\text{s/m}$ ], ... – oznaczenia jak w tabeli 2.

*DP25 [ $\mu\text{s/m}$ ], ... – symbols as in table 2.*

W tabeli 4 podano podstawowe statystyki dla klastycznych utworów triasu górnego, retyku, w interwale głębokości 1056–1442 m, w wypadku których nie uzyskano wyniku z pomiaru sondą FWS, ale dysponowano akustycznymi obrazami falowymi. Wynik interpretacji AOF z użyciem aplikacji FalaFWS dostarczył danych na temat czasów interwałowych



fali P i S. Czas interwałowy fali P (DP25) koreluje się z czasem z pomiaru (DC25). Przedział zmienności czasu interwałowego fali S z interpretacji programem FalaFWS, DS25, jest duży i odchylenie standardowe jest też znaczne. Podobnie duża jest zmienność wartości stosunku prędkości  $V_p/V_s$  i współczynnika Poissona (NI25). Niemniej, są to wielkości, które można wykorzystać do tworzenia szacunkowych modeli prędkości fali S.

Program Estymacja wykorzystuje teoretyczne relacje opisujące ośrodki porowate. Pozwala na obliczenie: prędkości fal podłużnych i poprzecznych (oznaczonych jako VPEQ, VSEQ) i czasów interwałowych (DPEQ, DSEQ) oraz modułów sprężystości (EEQ, KEQ, MIEQ), stosunku VPEQ/VSEQ i współczynnika Poissona (NIEQ), jak również gęstości objętościowej (RHEQ). Wymaga wprowadzenia danych z kompleksowej interpretacji profilowań geofizyki otworowej, obejmujących objętości poszczególnych składników mineralnych, współczynniki porowatości PHI i nasycenia wodą SW lub ropą albo gazem w profilu otworu (Górecki *et al.*, 2010). W prezentowanej pracy stosowano jeden z teoretycznych modeli opracowanych w programie – model Biota–Gassmanna (Bała & Cichy 2006).

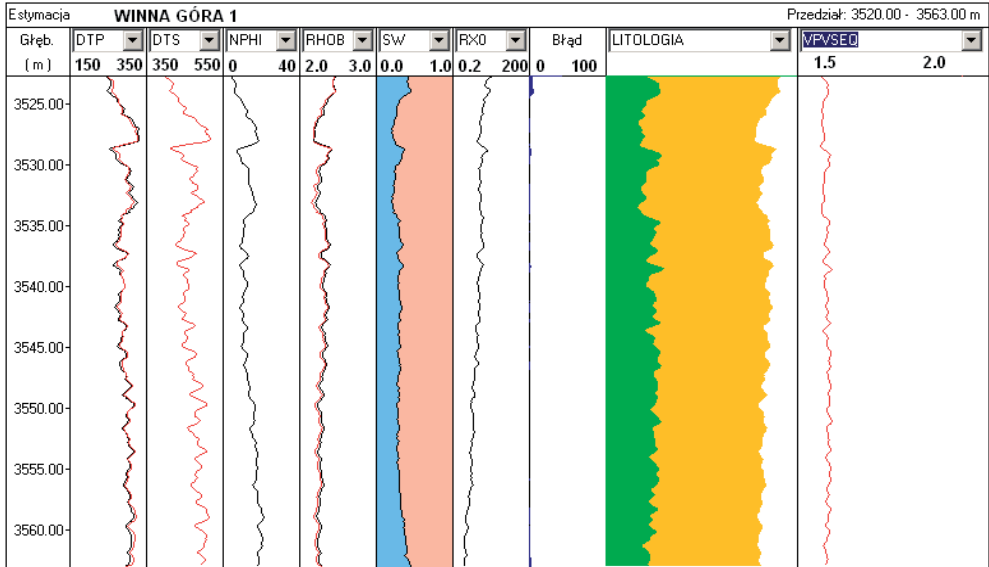
Przed wykonaniem obliczeń zadano parametry „szkieletowe” dla poszczególnych składników mineralnych oraz mediów nasycających przestrzeń porowatą występujących w otworze:  $K_{ma}(i)$  – moduł odkształcenia objętości dla szkieletu [GPa],  $M_{ma}(i)$  – moduł odkształcenia postaci dla szkieletu [GPa],  $\rho_{ma}(i)$  – gęstość szkieletu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $DT_{ma}(i)$  – czas interwałowy w szkielecie [ $\mu\text{s}/\text{m}$ ] oraz moduły odkształcenia objętości i gęstości dla wody i gazu lub ropy nasycających przestrzeń porowatą skał, przy czym (i) oznacza ilość składników mineralnych uwzględnianych w szkielecie skały w danym interwale obliczeń.

Przy zadawaniu parametrów szkieletowych uwzględniono domieszki różnych minerałów tworzących daną formację litostratygraficzną oraz brano pod uwagę głębokość zalegania interpretowanych utworów. Program Estymacja generuje teoretyczne profilowania, których wyniki porównywane są z wynikami profilowań akustycznego i gęstości objętościowej. Porównanie obliczonych (estymowanych) czasów DPEQ z zarejestrowanymi sondą akustyczną DT(PA) oraz RHEQ z wynikiem profilowania gęstościowego RHOB w otworze testowym pozwala na odpowiednie określenie wartości „szkieletowych” dla poszczególnych składników mineralnych, tak aby błąd estymacji był zminimalizowany.

Wyniki obliczonych (czerwone) i pomierzonych (czarne) profilowań w utworach piaskowcowych czerwonego spągowca w otworze Winna Góra 1 przedstawiono na figurze 2. Utwory czerwonego spągowca w postaci piaskowców o spoiwie węglanowym bądź ilasto-żelazisto-węglanowym z domieszkami frakcji ilastej zalegają w interwale 3520.5–3643 m. Charakteryzują się znaczną porowatością i nasyceniem wodą i gazem. Na figurze 2 zilustrowano następujące profilowania: czasy interwałowe fal podłużnych (DTP) i poprzecznych (DTS) [ $\mu\text{s}/\text{m}$ ], porowatość neutronową (NPHI) [%], gęstość objętościową (RHOB) [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ], współczynnik nasycenia wodą (SW) (w ułamkach), profilowania oporności pozornej w strefie przemytej (RXO) [ $\Omega \cdot \text{m}$ ], błąd estymacji [%], skład litologiczny i porowatość (w ułamkach) i na ostatniej ścieżce – stosunek VPEQ/VSEQ. Poniżej nagłówka każdej krzywej zaznaczono zakres jej zmienności.

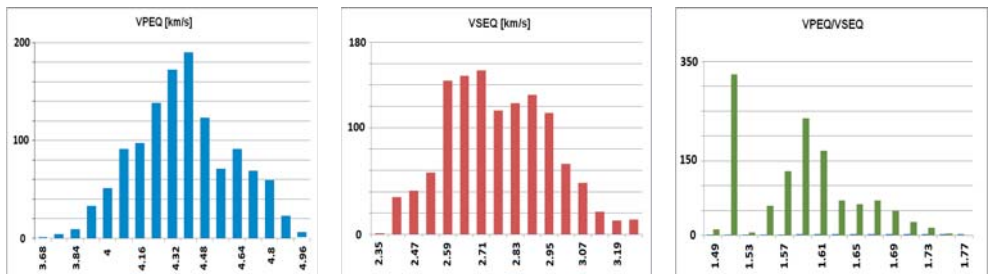
W odniesieniu do utworów czerwonego spągowca obliczono histogramy VPEQ, VSEQ oraz stosunku VPEQ/VSEQ (Fig. 3). Charakter rozkładu VPEQ i VSEQ jest zbliżony do

normalnego, podczas gdy histogram stosunku prędkości jest rozdzielony na dwie grupy. Do pierwszej ( $VPEQ/VSEQ < 1.576$ ) można zaliczyć warstwy o stosunkowo dużym nasyceniu gazem, drugą grupę stanowią piaskowce zawadnione o spoiwie węglanowym.



**Fig. 2.** Parametry estymowane w programie Estymacja – linie czerwone, profilowania pomierzone – linie czarne w utworach czerwonego spągowca w otworze Winna Góra 1, w interwale głębokościowym 3520.5–3555 m; objętość piaskowca, iłu i wapienia odpowiednio – kolor żółty, zielony, niebieski; współczynnik nasycenia gazem – kolor różowy, współczynnik nasycenia wodą – kolor niebieski

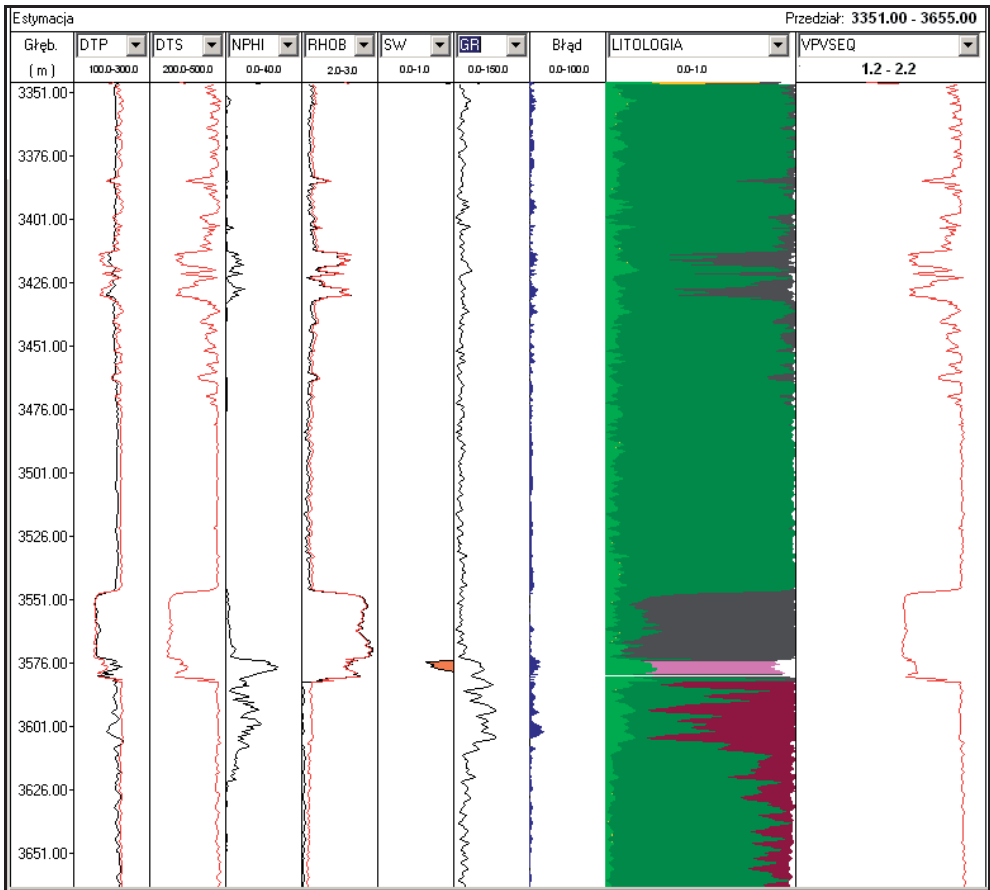
**Fig. 2.** Parameters estimated in Estymacja program – red lines, recorded logs – black lines in Rotliegend formation in Winna Góra 1 well, at depth section 3520.5–3555 m; sandstone, shale and limestone volume – yellow, green and blue color, respectively; gas saturation and water saturation – rose and blue color, respectively



**Fig. 3.** Histogramy VPEQ, VSEQ i stosunku VPEQ/VSEQ dla utworów czerwonego spągowca w otworze Winna Góra 1 w interwale 3520.5–3643 m

**Fig. 3.** Histograms of VPEQ, VSEQ and VPEQ/VSEQ ratio of Rotliegend formation in Winna Góra 1 well at depth section 3520.5–3643 m

Wyniki w postaci parametrów estymowanych i pomierzonych w otworze Piła IG-1 w utworach cechsztynu w interwale 3351–3653 m przedstawiono na figurze 4. Profil obejmuje sole młodsze Na3 (halit), anhydryt główny A3, dolomit płytowy Ca3 wykazujący nasycenie gazem, bardzo ciekłą wkładkę łu solnego I3 i anhydrytu kryjącego A2G, poniżej występują domieszki soli potasowych i soli kamiennej.



**Fig. 4.** Parametry obliczone w programie Estymacja – linie czerwone i pomierzonych – linie czarne w utworach cechsztynu w otworze Piła IG-1 w interwale głębokościowym 3351–3655 m; objętość soli NaCl, KCl oraz anhydrytu i dolomitu odpowiednio kolor zielony, brązowy oraz popielaty i różowy, zailenie – kolor seledynowy; niewielkie nasycenie węglowodorami występuje w utworach dolomitu

**Fig. 4.** Parameters estimated in Estymacja program – red lines, recorded logs – black lines in Zechstein formation in Piła IG-1 well at depth section 3351–3655 m; volume of salt NaCl, KCl and anhydrite and dolomite – green, bronze and gray and rose color, respectively, shaliness – celadon green color; small hydrocarbon saturation observed in the dolomite

Wyniki obliczeń z użyciem programu Estymacja przedstawiono także w tabelach 5–9 w postaci średnich, maksymalnych i minimalnych wartości wybranych parametrów obliczonych dla wyznaczonych formacji litostratigraficznych. Wyniki odnoszące się do otworu Obrzycko 1 zestawiono w tabeli 5.

**Tabela (Table) 5**

Wartości średnie, maksymalne i minimalne wybranych parametrów wyznaczonych przy użyciu programu Estymacja w otworze Obrzycko 1

*Means, maxima and minima of selected parameters determined using Estymacja program in Obrzycko 1 well*

Interwał głębokości [m] <i>Depth interval</i>	VPEQ [km/s]	VSEQ [km/s]	VPEQ/VSEQ	RHEQ [g/cm <sup>3</sup> ]	NIEQ	Stratygrafia Litologia <i>Stratigraphy Lithology</i>
201–526	3.663 3.895 3.164	1.8038 1.975 1.561	2.031 2.099 1.639	2.560 2.647 2.345	0.3398 0.3530 0.2030	kreda, santon: margle, łupki <i>Cretaceous, Santonian:</i> <i>marls, shales</i>
526–942	3.843 4.499 3.409	1.934 2.279 1.714	1.987 2.062 1.658	2.577 2.663 2.414	0.3304 0.3460 0.2140	kreda, santon (802.5 m): margle, łupki; turon: margle, wapienie <i>Cretaceous, Santonian</i> <i>(802.5 m): marls, shales;</i> <i>Turonian: marls,</i> <i>limestones</i>
942–985	3.282 3.531 3.120	1.959 2.152 1.826	1.676 1.71 1.641	2.309 2.578 2.216	0.2234 0.2400 0.2050	kreda, cenoman: margle, wapienie <i>Cretaceous, Cenomanian:</i> <i>marls, limestones</i>
985–1022.5	3.278 4.479 2.909	1.949 2.302 1.648	1.684 1.946 1.622	2.332 2.579 2.209	0.2265 0.3210 0.1930	kreda dolna: piaskowce, łupki <i>Lower Cretaceous:</i> <i>sandstones, shales</i>
1022.5–1325.5	4.000 4.825 3.014	2.063 2.566 1.561	1.939 2.009 1.874	2.559 2.682 2.319	0.3187 0.3350 0.3010	jura, kimeryd, oksford: wapienie, łupki <i>Jurassic, Kimmeridgian,</i> <i>Oxfordian: limestones,</i> <i>shales</i>

Tabela (Table) 5 cd. / cont.

1325.5–1692	3.726 4.225 3.264	2.264 2.657 1.980	1.646 1.726 1.562	2.436 2.601 2.225	0.2074 0.2480 0.1530	jura, lias górny, pliensbach, synemur, hetang: piaskowce, łupki <i>Jurassic, Upper Lias, Pliensbachian, Sinemurian, Hettangian: sandstones, shales</i>
1692–1978	3.912 4.321 3.416	2.335 2.667 1.986	1.676 1.776 1.62	2.512 2.603 2.292	0.2234 0.2680 0.1920	trias, retyk: piaskowce, łupki <i>Triassic, Rhaetian: sandstones, shales</i>
1978–2191	4.387 5.438 4.051	2.639 3.279 2.376	1.663 1.824 1.589	2.599 2.814 2.443	0.2156 0.2850 0.1720	trias, kajper górny, seria gipsowa: anhydryty; piaskowiec trzcinowy: piaskowce, łupki <i>Triassic, Upper Keuper, Gypsum Series: anhydrites; Reed Sandstone: sandstones, shales</i>
2191–2272	4.435 5.276 3.774	2.689 2.951 2.415	1.649 1.815 1.545	2.546 2.670 2.314	0.2067 0.2820 0.1400	trias, kajper górny, dolna seria gipsowa: anhydryty, łupki <i>Triassic, Upper Keuper, Lower Gypsum Series: anhydrites, shales</i>
2272–2349	4,324 5,130 3,490	2,614 2,959 2,191	1,654 1,846 1,570	2,534 2,686 2,252	0,2109 0,292 0,159	trias, kajper dolny: łupki, piaskowce, mułowce <i>Triassic, Lower Keuper: shales, sandstones, mudstones</i>
2349–2580.5	5,193 5,929 4,108	2,790 3,132 2,209	1,860 1,921 1,706	2,604 2,695 2,340	0,2962 0,314 0,238	trias, wapień muszlowy: wapienie, łupki, margle <i>Triassic, Muschelkalk: limestones, shales, marls</i>
2580.5–2704	5,426 6,051 3,884	2,963 3,323 2,321	1,832 1,852 1,673	2,705 2,799 2,504	0,2876 0,2940 0,2220	trias, pstry piaskowiec, ret: wapienie dolomityczne <i>Triassic, Bunter Sandstone, Roethian: dolomitic limestones</i>

Tabela (Table) 5 cd. / cont.

Interwał głębokości [m] <i>Depth interval</i>	VPEQ [km/s]	VSEQ [km/s]	VPEQ/ VSEQ	RHEQ [g/cm <sup>3</sup> ]	NIEQ	Stratygrafia Litologia <i>Stratigraphy Lithology</i>
2704–2875	4.848 5.666 4.214	2.894 3.367 2.493	1.677 1.891 1.542	2.593 2.686 2.472	0.2172 0.3060 0.1370	trias, pstry piaskowiec środkowy: wapienie, łupki, piaskowce <i>Triassic, Middle Bunter Sandstone: limestones, shales, sandstones</i>
2875–3230	4.692 4.893 3.803	2.896 3.072 2.376	1.620 1.648 1.582	2.623 2.654 2.448	0.1924 0.2090 0.1670	trias, pstry piaskowiec dolny: łupki, mułowce <i>Triassic, Lower Bunter Sandstone: shales, mudstones</i>
3230–3250.5	5.458 5.989 4.631	3.041 3.361 2.549	1.796 1.820 1.782	2.837 2.929 2.695	0.2754 0.2840 0.2700	iłowce przejściowe <i>Transitional Claystones</i>
3250.5–3252.5	5.593 5.706 5.441	3.116 3.186 3.021	1.795 1.801 1.791	2.817 2.845 2.778	0.2752 0.277 0.274	cechsztyn, anhydryt graniczny (A4G) <i>Zechstein, Top Anhydrite (A4G)</i>
3252.5–3286	4.700 4.751 4.557	2.562 2.592 2.469	1.835 1.846 1.831	2.109 2.165 2.063	0.2887 0.2920 0.2870	cechsztyn, sól najmłodsza (Na4) <i>Zechstein, Aller Salt (Na4)</i>
3286–3292.5	5.585 5.913 4.891	3.119 3.315 2.705	1.791 1.808 1.784	2.866 2.911 2.784	0.2735 0.2800 0.2710	cechsztyn, anhydryt pegmatytowy (A4D), ił czerwony (I4), anhydryt stropowy (A3G) <i>Zechstein, Pegmatitic Anhydrite (A4D), Red Claystone (I4), Top Anhydrite (A3G)</i>
3292.5–3452	4.681 4.788 4.057	2.551 2.609 2.161	1.835 1.877 1.830	2.116 2.249 2.045	0.2889 0.3020 0.2870	cechsztyn, sól młodsza (Na3) <i>Zechstein, Leine Salt (Na3)</i>
3452–3477.5	5.868 5.963 5.771	3.288 3.345 3.231	1.785 1.788 1.783	2.905 2.924 2.870	0.2712 0.2730 0.2700	cechsztyn, anhydryt główny (A3) <i>Zechstein, Main Anhydrite (A3)</i>

Tabela (Table) 5 cd. / cont.

3477.5–3517.5	4.122 4.575 3.719	2.209 2.492 1.976	1.867 1.91 1.836	2.205 2.406 2.069	0.2986 0.3110 0.2890	cechsztyn, szary il (I3) <i>Zechstein, Grey Claystone (I3)</i>
3517.5–3964	4.772 4.836 4.266	2.606 2.641 2.323	1.831 1.86 1.829	2.101 2.172 2.052	0.2874 0.2970 0.2870	cechsztyn, sól starsza (Na2) <i>Zechstein, Stassfurt Salt (Na2)</i>
3964–4020	6.029 6.611 5.703	3.361 3.614 3.189	1.793 1.837 1.782	2.891 2.927 2.758	0.2742 0.2900 0.2700	cechsztyn, anhydryt podstawowy (A2), dolomit główny (Ca2), anhydryt górny (A1G) <i>Zechstein, Basal Anhydrite (A2), Main Dolomite (Ca2), Upper Anhydrite (A1G)</i>
4020–4107.5	4.793 4.847 4.708	2.619 2.648 2.570	1.830 1.833 1.829	2.094 2.135 2.057	0.2872 0.2880 0.2870	cechsztyn, sól najstarsza (Na1) <i>Zechstein, Werra Salt (Na1)</i>
4107.5–4160	5.882 6.025 5.593	3.295 3.381 3.118	1.785 1.794 1.782	2.901 2.929 2.831	0.2713 0.2740 0.2700	cechsztyn, anhydryt dolny (A1D) <i>Zechstein, Lower Anhydrite (A1D)</i>
4160–4164	5.760 6.002 5.262	2.981 3.107 2.726	1.932 1.935 1.93	2.671 2.688 2.605	0.3172 0.3180 0.3170	cechsztyn, wapień (Ca1), łupek (I1) <i>Zechstein, limestone (Ca1), shale (I1)</i>
4164–4340	4.961 5.424 3.982	3.160 3.548 2.358	1.577 1.931 1.508	2.625 2.721 2.466	0.1563 0.317 0.108	czerwony spągowiec, sakson: piaskowce, łupki, zlepieńce <i>Rotliegend, Saxonian: sandstones, shales, conglomerates</i>
4340–4381	5.664 5.961 5.268	3.168 3.334 2.951	1.788 1.792 1.784	2.813 2.852 2.779	0.2724 0.2740 0.2710	czerwony spągowiec, autun, seria wylewna <i>Rotliegend, Autun, Volcanic Series</i>

Kolejne wartości w pionowych kolumnach oznaczają: wartość średnią, maksymalną i minimalną dla danej zmiennej.

*Successive values perpendicularly mean: average values, maximum and minimum for each variable.*

## **PORÓWNANIE CZASÓW INTERWAŁOWYCH FAL P I S UZYSKANYCH Z POMIARÓW, WYNIKÓW INTERPRETACJI W APLIKACJI FalaFWS ORAZ OBLICZEŃ Z UŻYCIEM PROGRAMU ESTYMACJA**

Porównano czasy interwałowe fal P i S z pomiaru oraz uzyskane w wyniku interpretacji akustycznych obrazów falowych z wynikami obliczeń w programie Estymacja. Każda z zastosowanych metod ma zalety i ograniczenia. Bezpośredni pomiar czasów interwałowych DTP i DTS podczas wykonywania profilowania akustycznego z pełnym obrazem falowym sondą FWS dostarcza wynik bezpośrednio po pomiarze. W testowanym otworze Winna Góra 1 było wiele interwałów, w których nie wyznaczono czasu interwałowego fali S. Są to odcinki, w których występują skały o słabych własnościach sprężystych, rozluźnione, zailone. Interpretacja AOF w aplikacji FalaFWS pozwala na uzupełnienie wyników w interwałach o słabych własnościach sprężystych. Obie metody dostarczą wyników jedynie w interwałach, w których jest wykonane profilowanie akustyczne z pełnym obrazem falowym.

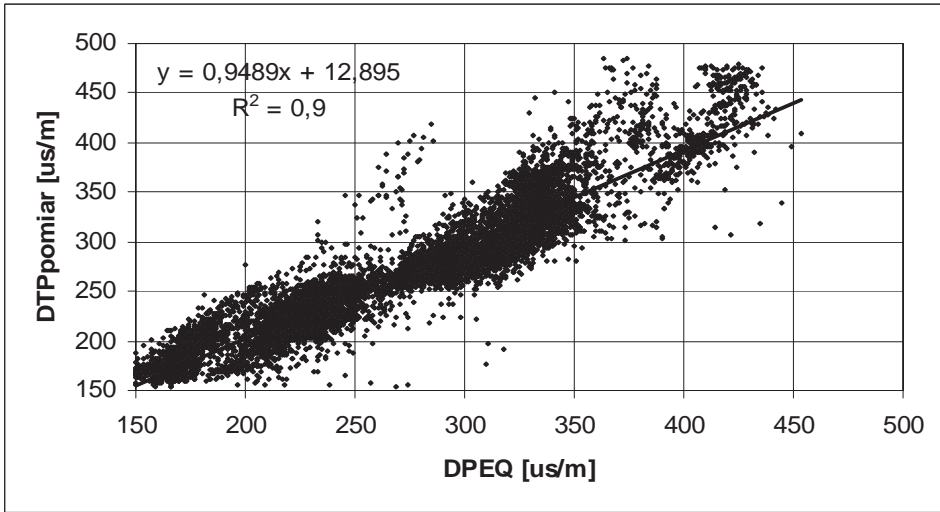
Obliczenie czasów interwałowych w programie Estymacja umożliwia uzyskanie wyniku w całym interwale głębokości, w którym wykonano kompleksową interpretację litologiczno-porowatościową. Najczęściej jest to największy interwał głębokościowy, większy niż w przypadku pomiaru sondą FWS. Dwie pierwsze metody dają wartości czasów interwałowych zmierzone w warunkach *in situ*. Są najbardziej obciążone wpływem warunków pomiarowych (zmienną średnicą otworu, zmiennymi parametrami płuczki w różnych odcinkach otworu, zmianą położenia sondy w otworze). Program Estymacja pozwala na wykonanie obliczeń przy założeniu wartości parametrów sprężystych dla składników szkieletu mineralnego i płynów porowych. Dokładność uzyskanego rozwiązania litologicznego oraz poprawność przyjętych wartości parametrów szkieletowych decyduje o poprawności uzyskanego wyniku.

Wynik interpretacji AOF w aplikacji FalaFWS w systemie GeoWin zależy także od kroku pomiarowego i kroku głębokościowego przyjętego w procesie interpretacji. Podobnie krok wykonywania obliczeń w programie Estymacja może wpływać na końcowy wynik. Na każdym etapie przetwarzania wyników pomiaru i interpretacji można wykonać uśrednienie wyników.

Porównanie wyników czasów interwałowych fal P i S wyznaczonych podczas pomiaru oraz obliczonych z użyciem programu Estymacja przedstawiono na figurach 5 i 6. Rysunki wykonano dla danych uśrednionych z krokiem pomiarowym 0.25 m. Relacja między czasami DTP wyznaczonymi z obu metod jest dobra. Współczynnik determinacji równy 0.9 wskazuje, że obie wartości mogą być wykorzystywane zamiennie. Rozrzut wyników wokół linii korelacji nie jest duży. Kilka wartości odstających może być skorygowanych podczas analizy wyników w wydzielonych poziomach litostratygraficznych.

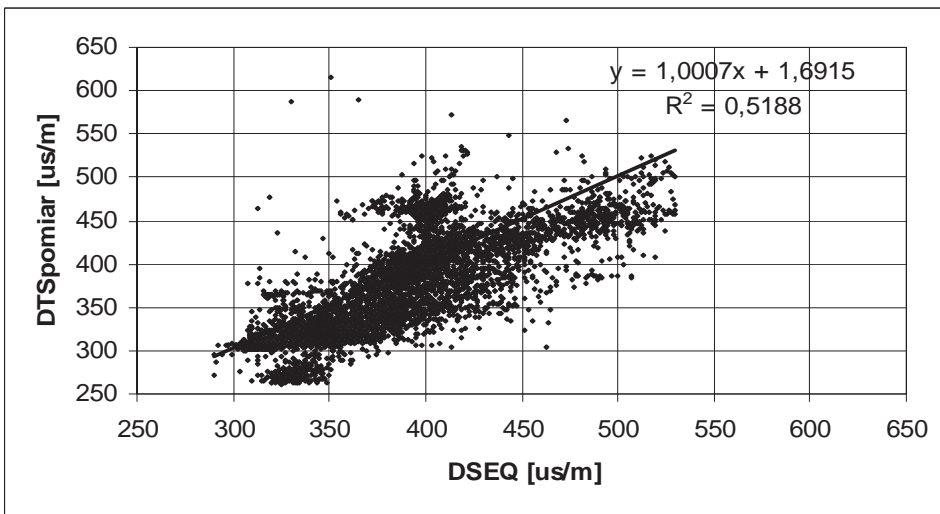
Zależność między czasami DTS charakteryzuje się znacznie niższym współczynnikiem determinacji. Jednak obserwuje się wyraźne skupienie punktów pomiarowych wokół linii korelacji. Wartości DTS pomiar są generalnie niższe od obliczonych w programie Estymacja.





**Fig. 5.** Porównanie wartości czasu interwałowego fali P z pomiaru (DTPpomiar) i czasu interwałowego obliczonego w programie Estymacja (DPEQ) w interwale 494–3643 m w otworze Winna Góra 1

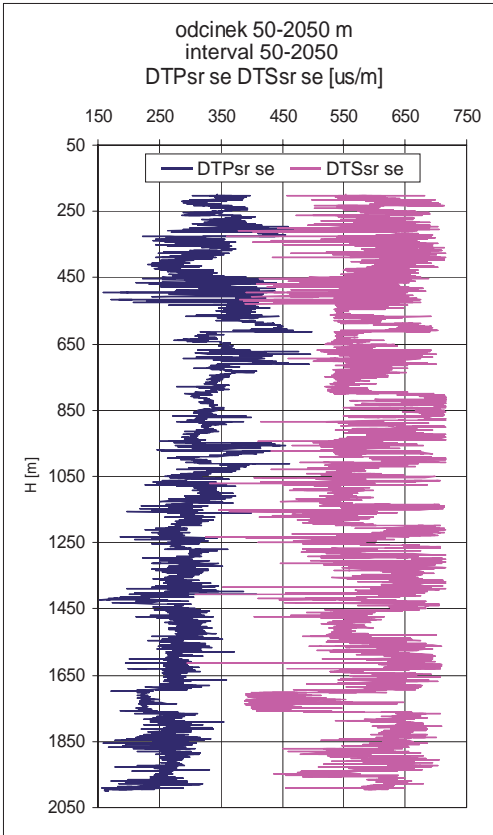
**Fig. 5.** Comparison of P-wave slowness from FWS logging (DTPpomiar) and P-wave slowness determined using Estymacja program (DPEQ) at depth section of 494–3643 m in Winna Góra 1 well



**Fig. 6.** Porównanie wartości czasu interwałowego fali S z pomiaru (DTSpomiar) i czasu interwałowego obliczonego w programie Estymacja (DSEQ) w interwale 494–3643 m w otworze Winna Góra 1

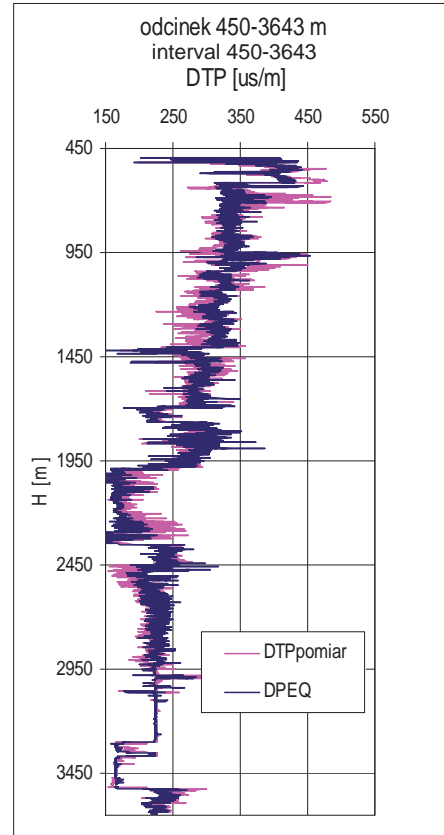
**Fig. 6.** Comparison of S-wave slowness from FWS logging (DTSpomiar) and S-wave slowness determined using Estymacja program (DSEQ) at depth section of 494–3643 m in Winna Góra 1 well

Czasy interwałowe uzyskane z pomiaru oraz w wyniku interpretacji programem FalaFWS i Estymacja w funkcji głębokości przedstawiono na figurach 7 i 8. Obserwuje się wyraźną zmienność parametrów będącą skutkiem interpretacji z krokiem pomiarowym równym 0.1 m. Na figurze 7 widać duży przedział zmienności DTS.



**Fig. 7.** Czasy interwałowe fal P i S w górnym interwale otworu Winna Góra 1; wynik interpretacji w aplikacji FalaFWS

**Fig. 7.** P-wave and S-wave slowness in the upper section of Winna Góra 1 well; result from FalaFWS application

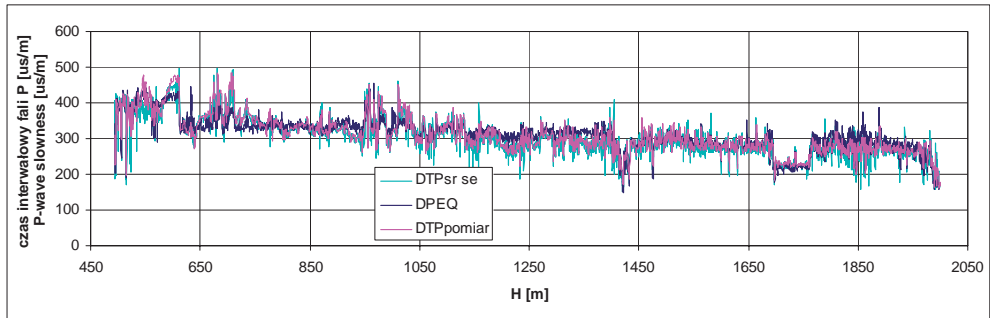


**Fig. 8.** Czas interwałowy fali P z pomiaru i obliczony w programie Estymacja w otworze Winna Góra 1

**Fig. 8.** P-wave slowness determined using Estymacja program in Winna Góra 1 well

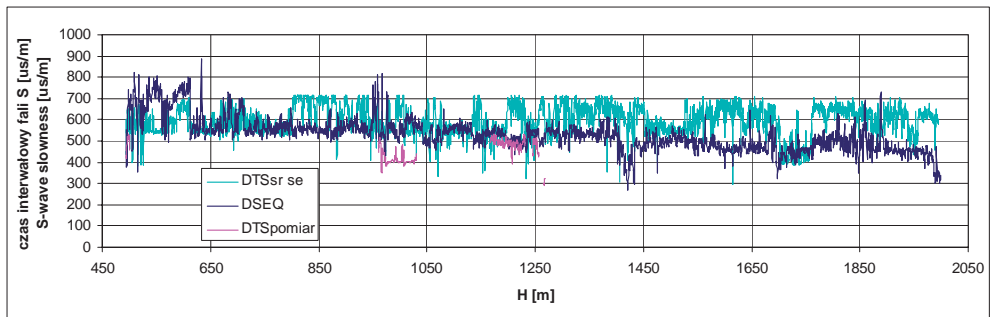
Porównano także wyniki uzyskane trzema metodami w zakresie czasów interwałowych fal P i S. Czasy DTP w funkcji głębokości przedstawiono na figurze 9. Czasy interwałowe fali S uzyskane w wyniku pomiaru (DTSpomiar), w wyniku interpretacji w programie

FalaFWS dla średniej wartości DTS (z sześciu par AOF) oraz w wyniku obliczenia w programie Estymacja zilustrowano na figurze 10.



**Fig. 9.** Czasy interwałowe fali P uzyskane z trzema metodami (pomiar FWS, FalaFWS i Estymacja) w funkcji głębokości w górnym interwale otworu Winna Góra 1

**Fig. 9.** P-wave slowness from three methods (FWS logging, FalaFWS application, Estymacja program) vs. depth in the upper section of Winna Góra 1 well

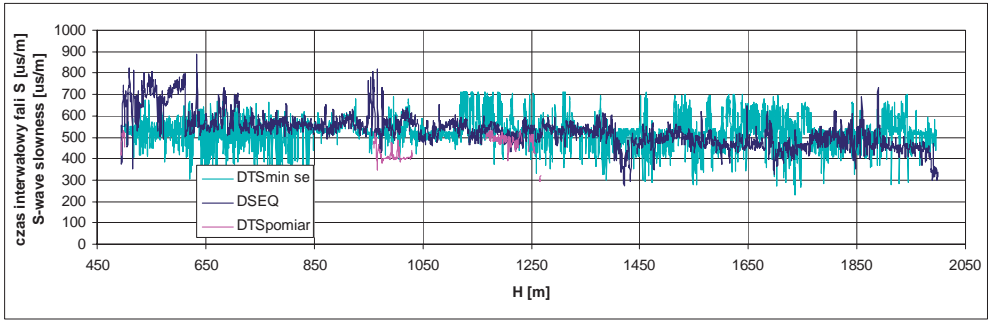


**Fig. 10.** Zestawienie czasów interwałowych fali S uzyskanych z trzema metodami (pomiar, aplikacja FalaFWS, program Estymacja) w funkcji głębokości w górnym interwale otworu Winna Góra 1

**Fig. 10.** S-wave slowness from three methods (FWS logging, FalaFWS application, Estymacja program) vs. depth in the upper section of Winna Góra 1 well

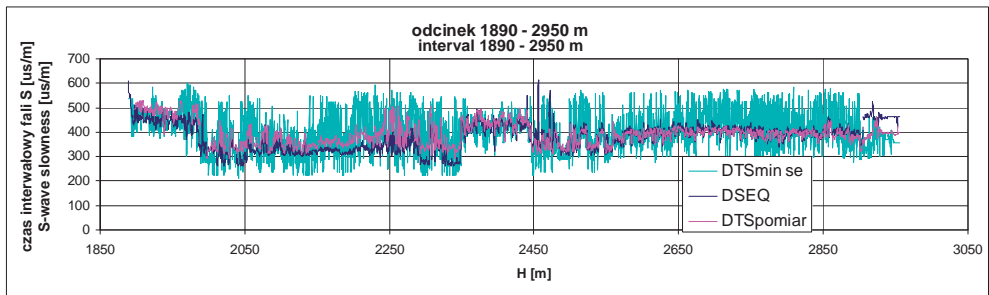
Widoczna jest rozbieżność między wynikami uzyskanymi z aplikacji FalaFWS i Estymacja w niektórych interwałach. Wartość DTSsr se jest wyższa od wartości DSEQ i wyniku pomiaru. Wykonano zatem jeszcze jedno zestawienie, wybierając wartość minimalną DTSmin se jako wynik interpretacji w programie FalaFWS (Fig. 11).

W dolnym interwale otworu WG 1 obserwuje się większą zgodność wyznaczonych wartości czasów interwałowych fali S (Fig. 12).



**Fig. 11.** Czasy interwałowe fali S uzyskane z trzema metodami (pomiar, aplikacja FalaFWS – minimalna wartość DTSse, program Estymacja) w funkcji głębokości w górnym interwale otworu Winna Góra 1

**Fig. 11.** S-wave slowness from three methods (FWS logging, FalaFWS application – minimal value of DTSse, Estymacja program) vs. depth in the upper section of Winna Góra 1 well



**Fig. 12.** Czasy interwałowe fali S uzyskanych z trzema metodami (pomiar, aplikacja FalaFWS – minimalna wartość DTSse, program Estymacja) w funkcji głębokości w dolnym interwale otworu Winna Góra 1

**Fig. 12.** S-wave slowness from three methods (FWS logging, FalaFWS application – minimal value of DTSse, Estymacja program) vs. depth in the lower section of Winna Góra 1 well

W celu porównania wyników wykonano zestawienia podstawowych statystyk dla czasów interwałowych fal P i S i dynamicznych modułów sprężystości oraz dla gęstości objętościowej uzyskanych trzema metodami. W tabelach 6–9 zestawiono wybrane dane zgrupowane dla wydzielonych serii litostratygicznych w dolnej części interwału pomiarowego otworu WG 1.

W tabelach zestawiono wyniki obliczeń z programów FalaFWS i Estymacja oraz wyniki pomiaru. Obserwuje się zgodność czasu interwałowego fali P w wypadku trzech źródeł danych. Czas interwałowy fali S obliczony w aplikacji FalaFWS (5DSsr se) jako średnia z sześciu par AOF jest zawyżony w porównaniu z wynikiem pomiaru (5DPM) i wynikiem uzyskanym z programu Estymacja (5DPQ). Minimalna wartość czasu interwałowego fali S z aplikacji FalaFWS (DTSmin se) jest zbliżona do wartości uzyskanej dwiema pozostałymi metodami. Dynamiczne moduły sprężystości obliczone na podstawie czasów interwałowych wyznaczonych w aplikacji FalaFWS i Estymacja nie są porównywalne ze względu na różnice w czasach

interwałowych, odpowiednio 5DPsr se i 5DSsr se oraz 5DPQ i 5DSQ. Wykorzystanie minimalnej wartości czasu interwałowego fali S (DTSmin se) poprawia zgodność wyników.

Dane w tabelach wskazują na zgodność czasu interwałowego fali P uzyskanego każdą z metod. Podobnie zgodne wyniki obserwuje się w odniesieniu do gęstości objętościowej uzyskanej z pomiaru i z programu Estymacja. Największe rozbieżności obserwuje się w wypadku czasu interwałowego fali S i parametrów, które są obliczone z wykorzystaniem tego parametru. Zawyżone wartości średnie czasu interwałowego fali S uzyskane z aplikacji FalaFWS zdecydowały o użyciu w dalszych obliczeniach minimalnych wartości tego parametru w przedziałach litostratygraficznych. Dzięki temu nie obserwuje się dużych rozbieżności w dynamicznych parametrach sprężystych obliczonych przy różnych danych wejściowych. Uwzględnienie w tabelach wynikowych wartości minimalnych i maksymalnych pozwala na dobór odpowiednich wielkości w interpretacji sejsmicznej.

**Tabela (Table) 6**

Podstawowe statystyki dla parametrów sprężystych wyznaczonych trzema metodami w otworze Winna Góra 1, w interwale: 1873–1966 m; kajper dolny, iłowce, mułowce piaskowce

*Basic statistics of elastic parameters calculated using three methods in Winna Góra 1 well, at section 1873–1966 m; Lower Keuper, claystone, mudstone, sandstone*

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch. std.
<i>Variable</i>	<i>N.</i>	<i>Av.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>St. dev.</i>
5DPsr se	308	264	236	315	12
5DSsr se	308	558	460	660	33
DTSmin se	308	473	374	584	45
5EE	308	22.00	15.97	29.57	2.33
5KK	308	24.09	12.18	40.17	3.77
5NI	308	0.34	0.22	0.41	0.03
5DPQ	308	282.02	213.00	347.39	17.80
5DSQ	308	458.83	404.81	610.63	28.71
5EEQ	308	28.66	17.36	41.37	3.27
5KKQ	308	15.86	12.09	36.95	3.38
5NIQ	308	0.19	0.15	0.32	0.03
5RHQ	308	2.50	2.37	2.63	0.05
5CAL	308	319	313	349	4
5DPM	308	270	226	335	15
5DSM	266	491	393	530	23

**Tabela (Table) 6** cd. / cont.

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch. std.
<i>Variable</i>	<i>N.</i>	<i>Av.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>St. dev.</i>
5GR	308	71	37	120	15
5RH	308	2.52	2.33	2.66	0.66

Oznaczenia w tabelach 6–9 / *Symbols in tables 6–9:*

Zmienna / *variable*; N ważnych *N.* / *numbers*; Średnia *Av.* / *average*; Minimum *Min.* / *minimum*; Maksimum *Max.* / *maximum*; Odch. std. *St. dev.* – odchylenie standardowe / *standard deviation*.

5DPsr se – średnia wartość czasu interwałowego fali P (aplikacja FalaFWS), krok 0.25 m / *average P-wave slowness value (FalaFWS application), step 0.25m (depth distance)*.

5DSsr se – średnia wartość czasu interwałowego fali S (aplikacja FalaFWS), krok 0.25 m / *average S-wave slowness value (FalaFWS application), step 0.25m*.

DTSmin se – minimalna wartość czasu interwałowego fali S (aplikacja FalaFWS), krok 0.25 m / *minimum S-wave slowness (FalaFWS application), step 0.25 m*.

5EE, 5KK, 5NI – odpowiednio wartości modułu Younga, ścisłości objętości i współczynnika Poissona (aplikacja FalaFWS), krok 0.25 m / *Young modulus, bulk modulus, Poisson ratio values, respectively (FalaFWS application), step 0.25 m*.

5DPQ – czas interwałowy fali P obliczony w programie Estymacja, krok 0.25 m / *P-wave slowness calculated in Estymacja program, step 0.25 m*.

5DSQ – czas interwałowy fali S obliczony w programie Estymacja, krok 0.25 m / *S wave slowness calculated in Estymacja program, step 0.25 m*.

5EEQ, 5KKQ, 5NIQ – odpowiednio wartości modułu Younga, ścisłości objętości i współczynnika Poissona (program Estymacja), krok 0.25 m / *Young modulus, bulk modulus and Poisson ratio values, respectively (Estymacja program), step 0.25 m*.

5RHQ – gęstość objętościowa obliczona w programie Estymacja, krok 0.25 m / *bulk density calculated in Estymacja program, step 0.25 m*.

5CAL – średnica otworu z pomiaru / *calliper from measurement*.

5DPM – czas interwałowy fali P z pomiaru / *P-wave slowness from measurement*.

5DSM – czas interwałowy fali S z pomiaru / *S-wave slowness from measurement*.

5GR – intensywność naturalnej promieniotwórczości gamma z pomiaru / *natural gamma ray intensity from measurement*.

5RH – gęstość objętościowa z pomiaru / *bulk density from measurement*.

**Tabela (Table) 7**

Podstawowe statystyki dla parametrów sprężystych wyznaczonych trzema metodami w otworze Winna Góra 1, w interwale głębokości 2055–2237.5 m; wapień muszlowy dolny, wapień, wapień dolomityczne, iłowce margliste, dolomityczne

*Basic statistics of elastic parameters calculated using three methods in Winna Góra 1 well, at depth section 2055–2237.5 m; Muschelkalk, dolomitic limestone, marly-dolomitic claystone*

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch. std.
<i>Variable</i>	<i>N.</i>	<i>Av.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>St. dev.</i>
5DPsr se	730	181	156	225	13
5DSsr se	730	515	315	647	60

**Tabela (Table) 7** cd. / cont.

DTSmin se	730	371	223	591	82
5EE	730	30.07	18.86	70.39	7.94
5KK	730	66.35	29.56	100.25	13.58
5NI	730	0.42	0.26	0.46	0.03
5DPQ	730	171.33	156.58	221.48	9.63
5DSQ	730	327.63	296.33	427.93	18.27
5EEQ	730	65.42	32.13	81.55	7.82
5KKQ	730	57.96	29.27	70.29	7.15
5NIQ	730	0.31	0.30	0.32	0.00
5RHQ	730	2.65	2.23	2.74	0.08
5CAL	730	314	309	326	2
5DPM	730	184	155	241	15
5DSM	725	362	311	436	24
5GR	730	35	16	62	11
5RH	730	2.68	2.33	2.76	0.07

Oznaczenia takie same jak w tabeli 6 / Symbols as in the table 6.

**Tabela (Table) 8**

Podstawowe statystyki dla parametrów sprężystych wyznaczonych trzema metodami w otworze Winna Góra 1, w interwale głębokości 2932–2905 m, IP, ilowce przejściowe

*Basic statistics of elastic parameters calculated using three methods in Winna Góra 1 well, at depth section 2932–2905 m, IP, Transition Claystone*

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch. std.
<i>Variable</i>	<i>N.</i>	<i>Av.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>St. dev.</i>
5DPsr se	108	215	195	245	12
5DSsr se	108	503	408	591	40
DTSmin se	108	369	293	466	46
5EE	108	28.97	21.10	44.31	4.81
5KK	108	41.28	27.57	54.01	7.82
5NI	108	0.38	0.29	0.43	0.03
5DPQ	107	228.31	199.82	260.79	9.60

**Tabela (Table) 8** cd. / cont.

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch. std.
<i>Variable</i>	<i>N.</i>	<i>Av.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>St. dev.</i>
5DSQ	107	463.26	409.45	524.93	18.36
5EEQ	108	33.08	25.32	42.34	3.31
5KKQ	108	34.37	25.75	45.15	3.35
5NIQ	108	0.34	0.34	0.35	0.00
5RHQ	107	2.64	2.21	2.76	0.15
5CAL	108	313	304	322	3
5DPM	108	218	193	250	14
5DSM	108	396	356	466	24
5GR	108	84	25	105	21
5RH	108	2.60	2.19	2.81	0.15

Oznaczenia takie same jak w tabeli 6 / Symbols as in the table 6.

**Tabela (Table) 9**

Podstawowe statystyki dla parametrów sprężystych wyznaczonych trzema metodami w otworze Winna Góra 1, w interwale głębokości 2932–2980 m, Na4, sól najmłodsza  
*Basic statistics of elastic parameters calculated using three methods in Winna Góra 1 well, at depth section 2932–2980 m, Na4, Youngest Salt*

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch. std.
<i>Variable</i>	<i>N.</i>	<i>Av.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>St. dev.</i>
5DPsr se	97	219	205	238	6
5DSsr se	97	421	383	536	42
DTSmin se	97	363	306	407	21
5EE	97	30.87	19.68	39.58	4.56
5KK	97	26.32	14.59	39.41	4.49
5NI	97	0.30	0.16	0.40	0.05
5DPQ	97	221.42	204.24	224.36	3.34
5DSQ	97	460.39	422.69	465.87	7.33



**Tabela (Table) 9** cd. / cont.

5EEQ	97	27.14	26.38	34.85	1.42
5KKQ	97	30.06	29.24	38.14	1.48
5NIQ	97	0.35	0.35	0.35	0.00
5RHQ	97	2.13	2.09	2.31	0.04
5CAL	97	285	241	311	24
5DPM	97	222	201	254	9
5DSM	93	397	385	425	6
5GR	97	12	9	22	2
5RH	97	2.06	1.93	2.30	0.05

Oznaczenia takie same jak w tabeli 6 / *Symbols as in the table 6.*

## PODSUMOWANIE

Interpretację akustycznych obrazów falowych pod względem wyznaczenia czasów interwałowych i dynamicznych parametrów sprężystości wykonano w odniesieniu do wszystkich otworów, z których były dostępne wyniki pomiarów. Obliczenia prędkości fal P i S oraz gęstości objętościowej i dynamicznych modułów sprężystości z wykorzystaniem programu Estymacja wykonano w odniesieniu do otworów, z których były dostępne wyniki kompleksowej interpretacji profilowań geofizyki otworowej.

Podstawowym problemem podczas interpretacji była słaba jakość akustycznych obrazów falowych. Zapisy wykonane czterema rejestratorami nie były powtarzalne i nie można było znaleźć uzasadnienia dla tego faktu w warunkach otworowych. Dlatego uzyskane czasy interwałowe fali S charakteryzowały się dużym rozrzutem. Zmienność  $V_s$  pociągała za sobą dużą zmienność stosunku  $V_p/V_s$  i współczynnika Poissona. We wszystkich odcinkach otworów, z których pomiary AOF były dostępne, wykonano interpretację w aplikacji FalaFWS z krokiem pomiarowym równym 0.1 m, następnie przeprowadzono filtrację wyników przy użyciu średniej kroczącej w interwale 25 punktów. Uznano, że wygładzenie czasów interwałowych w funkcji głębokości nie powoduje straty informacji.

Podczas pracy z programem Estymacja największą trudność sprawiało poprawne dobranie parametrów szkieletowych na podstawie ograniczonej informacji petrologicznej. Wykorzystano dostępne w geologicznych bazach danych opisy typów litologicznych występujących w wydzielonych formacjach stratygraficznych. Na tej podstawie oraz wykorzystując wyniki kompleksowej interpretacji, wykonanej przy uwzględnieniu ograniczonej liczby dostępnych profilowań geofizyki otworowej, przygotowywano dane wejściowe do programu.

Porównanie wyników pozwoliło na sformułowanie następujących wniosków:

- Wyniki uzyskane w programie Estymacja są najbardziej zbliżone do wyników pomiaru.
- Warto wykonać obliczenia parametrów sprężystych na podstawie wszystkich dostępnych metod, gdyż ich wyniki wzajemnie się uzupełniają.
- Należy wykorzystać minimalną wartość czasu interwałowego fali S z aplikacji Fala-FWS do obliczenia dynamicznych parametrów sprężystych.

*Praca została wykonana w ramach realizacji projektu badawczego „Poprawa efektywności badań sejsmicznych w poszukiwaniach i rozpoznawaniu złóż gazu ziemnego w utworach formacji czerwonego spągowca”.*

*Autorki dziękują prof. dr. hab. inż. Wojciechowi Góreckiemu za zaproszenie do współpracy. Dziękują także PGNiG SA, Oddziałowi w Zielonej Górze oraz spółkom Geofizyka Toruń i Geofizyka Kraków za udostępnienie danych pomiarowych.*

## LITERATURA

- Bała M. & Cichy A., 2003. Estymacja prędkości fal podłużnych i poprzecznych przy wykorzystaniu modeli teoretycznych oraz danych geofizyki wiertniczej. *Przegląd Geologiczny*, 51, 12, 1058–1063.
- Bała M. & Cichy A., 2006. *Metody obliczania prędkości fal P i S na podstawie modeli teoretycznych i danych geofizyki otworowej – program Estymacja*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Baudzis S., 2002. Full Wave Sonic – dane techniczne oraz standardowe konfiguracje zestawów akustycznych. *Materiały VIII Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej, Szymbark*, 3, 5–12.
- Górecki W. *et al.*, 2010. *Poprawa efektywności badań sejsmicznych w poszukiwaniach i rozpoznawaniu złóż gazu ziemnego w utworach czerwonego spągowca. Sprawozdanie z projektu. Etap III*. Archiwum KSE, WGGiOŚ AGH, Kraków.
- Jarzyna J. (red.), Bała M., Cichy A., Gądek W., Gąsior I., Karczewski J., Marzencki K., Stadtmüller M., Twaróg W. & Zorski T., 2002. *Przetwarzanie i interpretacja profilowań geofizyki wiertniczej, system Geowin*. Arbor, Kraków.
- Jarzyna J., Bała M., Cichy A., Gądek W., Karczewski J., Marzencki K., Stadtmüller M., Twaróg W., Zorski T., Jarzyna J., Bała M. & Cichy A., 2007. *Przetwarzanie i interpretacja profilowań geofizyki wiertniczej – system GeoWin. Cz. II: Nowe aplikacje i uzupełnienia*. Arbor, Kraków.
- Jarzyna J., Bała M. & Cichy A., 2010. Elastic parameters of rocks from well logging in near surface sediments. *Acta Geophysica*, special issue (ed. J. Jarzyna) 58, 1, 34–48.

## Summary

Acoustic full wavetrains interpretation to determine P-wave and S-wave slowness and dynamic elastic parameters was made in wells, in which measured data were available. Where the results of the comprehensive interpretation of well logs were available P-wave,

S-wave velocity/slowness as well as the bulk density and dynamic elastic parameters were also calculated using Estymacja program. Table 1 presents the names of wells within the study area and the depth sections in which determination of dynamic elastic parameters and bulk density was based on the following: measurements with FWS tool, interpretation using FalaFWS application in GeoWin system, calculation using Estymacja program. Interpretation of the FalaFWS application (GeoWin) results in the Rotliegend section (3603.3–3648.3 m) of Środa Wielkopolska 5 well, with respect to P-wave, S-wave and Stoneley-wave slowness and  $V_p/V_s$  ratio and Poisson ratio are included in figure 1. Basic statistics for the selected elastic parameters, in three depth sections of various lithology from the 5 well are listed in tables 2–4. They enable the comparison of the results with those obtained from different data sources. Similarity in P-wave slowness was observed in all data, but high dispersion of S-wave slowness is distinctly visible. The FalaFWS application provides the possibility to calculate the velocity of S wave in the depth section where there is no information about  $V_s$  from FWS measurement (Tab. 4). Estymacja provides possibility to calculate slowness of P wave and S wave and bulk density based on theoretical formulas using results of the comprehensive interpretation of well logs in the study sections. The results of Estymacja program in the Rotliegend formation within Winna Góra 1 well are presented in figure 2 and in the Piła IG-1 well – in figure 4. Histograms of VPEQ, VSEQ and VPEQ/VSEQ ratio of the Rotliegend formation in the Winna Góra 1 well are included in figure 3. Means, maxima and minima of the selected parameters determined using the Estymacja program in the Obrzycko 1 well are listed in table 5. Results of P wave slowness and S wave slowness comparison from three sources are presented in figures 5–12. Basic statistics of the elastic parameters calculated using three methods in the Winna Góra 1 well, in depth sections of various lithology are listed in tables 6–9.

In all well intervals, in which acoustic full wavetrains measurements were available, interpretation in FalaFWS application was carried out with a sample interval of 0.1 m. Next the results were filtered using moving average with a 25 point interval. S-wave slowness results were characterized by broad values of scattering. S-wave velocity variability resulted in broad variability of  $V_p/V_s$  and Poisson ratio. The results used in curve smoothing does not cause any loss of information from the seismic point of view.

The greatest difficulties working with the Estymacja program were choosing the proper matrix parameters due to limited petrological information. The descriptions of lithological types, occurring in separated stratigraphic formation were sourced from the geological database.

Comparison of the results yielded the following conclusions:

- results obtained in the Estymacja program are the closest to measured results,
- it is worth calculating the elastic parameters using all available methods because they mutually supplement,
- a minimum S wave slowness from FalaFWS application should be used to calculate dynamic elastic parameters.