

Jadwiga Jarzyna, Maria Bała, Paulina Krakowska, Edyta Puskarczyk, Kamila Wawrzyniak-Guz
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

Skalowanie profilowań geofizyki otworowej dla utworzenia sejsmicznych modeli prędkościowych

Wprowadzenie

Prace prowadzone przez zespół w ramach projektu badawczego „Poprawa efektywności badań sejsmicznych w poszukiwaniach i rozpoznawaniu złóż gazu ziemnego w utworach formacji czerwonego spągowca” [8] obejmowały wyznaczenie parametrów sprężystych formacji skalnych w otworach znajdujących się wzdłuż regionalnego profilu sejsmicznego, ze szczególnym uwzględnieniem prędkości sprężystych fal podłużnych i poprzecznych. Wyniki były przygotowane w celu utworzenia modeli prędkościowych. Źródłem danych do obliczenia prędkości były profilowania otworowe oraz wyniki kompleksowej interpretacji geofizyki otworowej.

Prędkości fal sprężystych, podłużnych – V_p i poprzecznych – V_s , wyznaczono na podstawie obrazów falowych pomierzonych sondą akustyczną Full Wave Sonic, firmy Halliburton [7], i wyników przetwarzania akustycznych obrazów falowych w aplikacji FalaFWS w systemie GeoWin [10, 11]. Aplikację FalaFWS wykorzystano do automatycznego wyznaczenia prędkości V_p i V_s oraz dynamicznych parametrów sprężystych we wszystkich odcinkach otworów, w których pomiar sondą FWS dostarczył poprawnych zapisów akustycznych obrazów falowych. We wszystkich otworach, w których dysponowano wynikami kompleksowej interpretacji profilowań geofizyki otworowej [5, 6], wykonano również obliczenia z wykorzystaniem programu Estymacja. Aplikacja Estymacja systemu GeoWin pozwala na obliczanie parametrów sprężystych i gęstości objętościowej skał, w sposób ciągły z głębokością, przy użyciu modeli teoretycznych, opracowanych dla ośrodków porowatych [2, 3, 11]. W wyniku obliczeń otrzymano prędkości fali podłużnej (VPEQ) i poprzecznej (VSEQ), współczynnik Poissona (NIEQ) oraz

gęstość objętościową (RHOBEQ). Miały one szczególne znaczenie w tych otworach, w których nie były wykonane profilowania akustyczne z pełnym obrazem falowym.

Prace interpretacyjne wykonano w otworach przedstawionych w tablicy 1, w zaznaczonych interwałach głębokościowych. Dokładne wyniki i szczegółowy opis interpretacji zostały załączone w sprawozdaniach etapowych z projektu oraz opublikowane [12, 13]. Symbole zastosowane w tablicy 1 oznaczają kolejno: AOF – akustyczne obrazy falowe; V_p i V_s (FWS) – prędkości, będące wynikiem pomiaru i przetwarzania danych z sondy FWS; PHI, SW, V_i – porowatość, współczynnik nasycenia wodą i objętości składników mineralnych, takich jak: iltu, piaskowca, wapienia, dolomitu, anhydrytu i innych minerałów wprowadzonych do modeli interpretacyjnych, będących wynikami kompleksowej interpretacji profilowań geofizyki otworowej.

Wyznaczone parametry sprężyste ośrodka skalnego, w szczególności prędkości fal sprężystych, przeznaczone były do zbudowania modeli prędkościowych ośrodka wzdłuż profilu sejsmicznego. Istotnym elementem jest dopasowanie skali geofizyki otworowej do skali sejsmicznej. Profilowania geofizyki otworowej charakteryzują się dużo wyższą rozdzielczością od danych sejsmicznych. Przygotowanie przeskalowanych profilowań polega na wygładzeniu danych w taki sposób, aby wyeliminować nieistotne z punktu widzenia sejsmiki lokalne anomalie, lecz pozostawić główny trend zmian danego parametru z głębokością. Wyniki uśredniania zależą od długości okna oraz od charakteru zmian danego parametru. Gdy lokalne zmiany parametru danego profilowania są niewielkie, to wyniki uśredniania są zbliżone do siebie, bez względu na dłu-

Tablica 1. Nazwy otworów oraz interwały głębokościowe, w których wyznaczono prędkości fal sprężystych i dynamiczne moduły sprężystości na obszarze badań

Otwór	Interwał głębokości [m]	Dostępne wyniki pomiarów i interpretacji	Parametry sprężyste wyznaczone na podstawie interpretacji
WG-1	116–3652 (pomiar) 116–2956	AOF, V_p i V_s (FWS), PHI, SW, V_i	sonda FWS, program FalaFWS, program Estymacja
ŚW-4	150–3701	AOF, V_p i V_s (FWS), PHI, SW, V_i	sonda FWS, program FalaFWS, program Estymacja
ŚW-5	145–3652	AOF, V_p i V_s (FWS)	sonda FWS, program FalaFWS
G-1	300–4144	PHI, SW, V_i	program Estymacja
O-1	40–4380	PHI, SW, V_i	program Estymacja
P-IG1	5–5380	PHI, SW, V_i	program Estymacja
Sz-IG1	5–5118	PHI, SW, V_i	program Estymacja-TP

gość okna uśredniania. W przypadku uśredniania lokalnie zróżnicowanego parametru, obserwuje się większe różnice dla okien o różnej długości uśredniania.

W pracy przedstawiono wyniki uśredniania profilowań prędkości fal P i S oraz gęstości objętościowej metodą średniej kroczącej w otworze Sz-IG1. Uśrednione wartości po-

równano z wynikami uśredniania metodą Backusa, polegającą na uśrednianiu elementów macierzy sztywności (modułów sprężystości) i obliczeniu na tej podstawie uśrednionych prędkości fal P i S. Jako przykład przedstawiono wyniki przetwarzania danych z interwału wapienia muszlowego środkowego i dolnego oraz czerwonego spągowca.

Obliczanie prędkości fal sprężystych, gęstości objętościowej oraz dynamicznych parametrów sprężystych w programie Estymacja na podstawie wyników interpretacji danych geofizyki otworowej w otworze Sz-IG1

W otworze Sz-IG1 nie wykonano pomiaru akustycznego z pełnym obrazem falowym, dlatego prędkości fal sprężystych, dynamiczne parametry sprężystości oraz gęstość objętościowa zostały obliczone przy użyciu programu Estymacja-TP [12]. Do określenia tych parametrów wykorzystano następujące dane: profilowanie akustyczne czasu interwałowego DT oraz syntetyczną gęstość objętościową – z uwzględnieniem nasycenia węglowodorami, a także syntetyczną gęstość objętościową, wszystkie z krokiem

próbki 0,25 m. Syntetyczne profilowania gęstości zostały sporządzone w oparciu o rozwiązanie litologiczne [5, 6], ponieważ w otworze Sz-IG1 nie wykonano profilowania gęstości objętościowej RHOB. Ponadto, wykorzystano objętościowe zawartości składników mineralnych: ilów (VSH), piaskowca (VSAN), wapienia (VLIM), dolomitu (VDOL), anhydrytu (VANH), halitu (VHAL), sylwiny (VSYL) oraz porowatości (PHI) i nasycenia wodą (SW).

Przed wykonaniem obliczeń w programie Estymacja

Tablica 2. Interwały głębokościowe i składniki litologiczne stosowane przy obliczaniu parametrów sprężystych przy użyciu programu Estymacja dla otworu Sz-IG1

Interwał obliczeń [m]	Składniki litologiczne	Stratygrafia Uwagi
593,25–612,5	VSH, VSAN	Tre, trias grn., retyk
612,75–641,0	VSH, VDOL	Tm2, wapień muszlowy śrd.
641,0–750,0	VSH, VLIM	Tm1, wapień muszlowy dln.
750,25–929,0	VSH, VLIM, w spągowej części pojawia się VSAN	Tp3, pstry piaskowiec grn., ret.
929,25–1717,0	VSH, VSAN, lokalnie VLIM	Tp2, pstry piaskowiec śrd.
1717,25–2149,5	VSH, VSAN	Tp1, pstry piaskowiec dln.
2149,75–3063,5	VSH, VHAL, VSYL	P3, cechsztyń (Na3G, Kz3, Na3D)
3063,5–3392,25	VSH, VSAN, VANH	P3, cechsztyń (A3, I3, Na2G, Kz2, Na2D, Na1G, A2)
3392,5–4318,25	VSH, VDOL, VLIM, VANH, VHAL, VSYL	P3, cechsztyń (Ca2, A1G, Na1, A1D, Ca1, I1)
4318,5–5125,0	VSH, VSAN	Ps, czerwony spągowiec, sakson

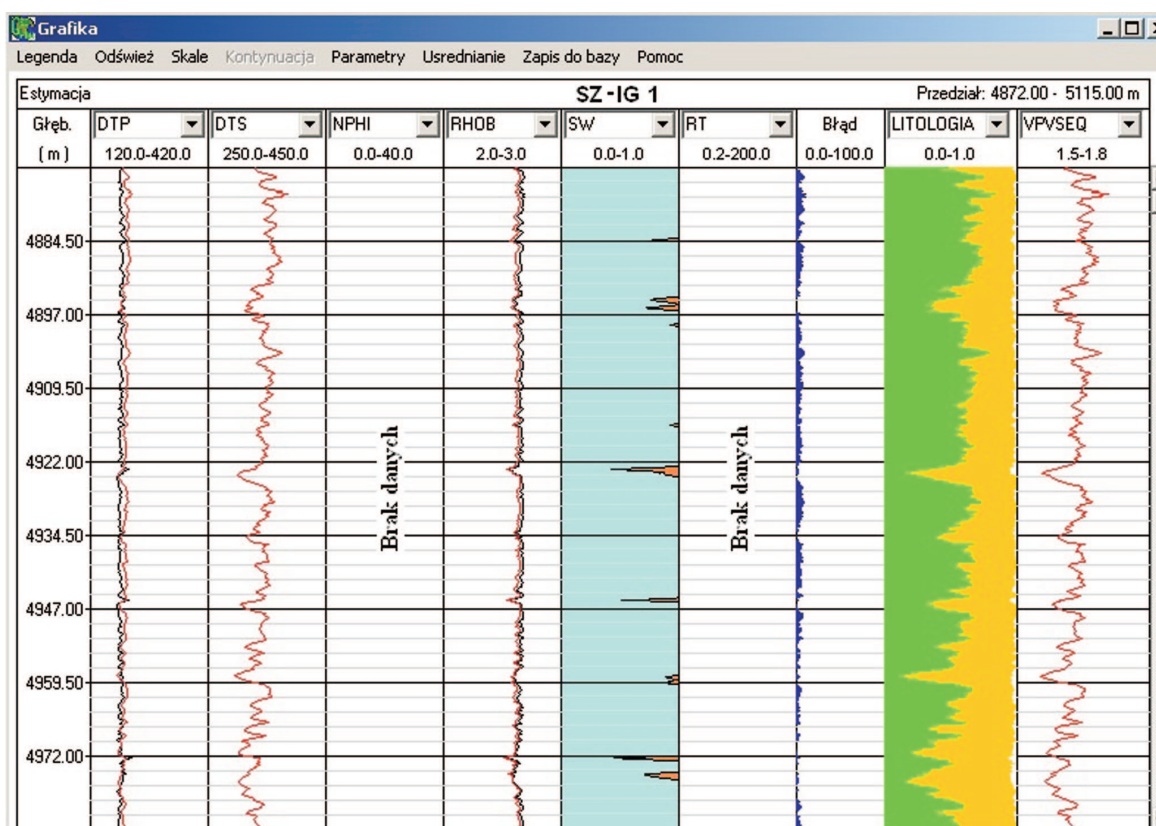
cały interpretowany interwał podzielono na przedziały odpowiadające utworom o określonej litologii i wieku (stratygrafii) (tablica 2). Dla każdego interwału przyjęto odpowiednie składniki mineralne szkieletu skalnego, zgodne ze składem litologicznym.

Dokładna metodyka wykonywania obliczeń estymowanych wielkości oraz dobór parametrów szkieletowych, koniecznych przy interpretacji i obliczeniach, zostały opisane w pracy [13].

Na rysunku 1 zaprezentowano fragment obliczonych w programie Estymacja (czerwone) i pomierzonych (czarne) profilowań w saksońskich utworach piaskowcowo-ilastych czerwonego spągowca w interwale głębokościowym od 4872–5115 m. Profilowania przedsta-

wiono w następującej kolejności: czasy interwałowe fal podłużnych (DTP) i poprzecznych (DTS) w $\mu\text{s}/\text{m}$, gęstości objętościowe w g/cm^3 (RHOB), nasycenia wodą w ułamku (SW), błąd estymacji w %, skład litologiczny i porowatość (w ułamkach), na ostatniej ścieżce zamieszczono stosunek VPEQ/VSEQ. Poniżej nagłówka każdej krzywej zaznaczono zakres jej zmienności. Należy wspomnieć, że wszystkie krzywe uzyskane na podstawie obliczeń przy użyciu programu Estymacja mają nazwy z końcówką EQ.

Na rysunku 1 można zauważyć niewielkie zmiany czasów interwałowych fali P (DTP) oraz znaczne wahania stosunku VPEQ/VSEQ, których obniżenia dobrze korelują z nasyceniem gazem.



Rys. 1. Obliczone parametry sprężyste i gęstości objętościowe w interwale odpowiadającym utworom piaskowcowo- ilastym czerwonego spągowca. Zaznaczono niewielkie nasycenie gazem na tle warstw wodonośnych

Skalowanie profilowań prędkości fal sprężystych oraz profilowania gęstości objętościowej

W literaturze anglojęzycznej funkcjonuje termin *upscaling* [19], który najczęściej oznacza przewidywanie prędkości fal sprężystych dla niższych częstotliwości (odpowiadających częstotliwościom sejsmicznym) na podstawie prędkości fal pomierzonych przy wyższych częstotliwościach (z profilowań akustycznych). W szerszym znaczeniu *upscaling* oznacza zastąpienie niejednorodnego ośrodka

przez ośrodek jednorodny, ale mający równoważne własności. Poprawne metody przeskalowania danych będą przewidywać własności w zgrubnej skali z uwzględnieniem wpływu struktur o małej skali, ponieważ w znaczący sposób wpływają one na własności ośrodka uśrednionego.

Z punktu widzenia budowy modeli prędkościowych ważne jest dopasowanie skali profilowań geofizyki otwo-

rowej do skali sejsmiki. Można tego dokonać poprzez uśrednianie wartości profilowań z krokiem odpowiadającym pionowej rozdzielczości metody sejsmicznej. Źródłowe dane, pochodzące z profilowań geofizyki otworowej w otworach zlokalizowanych na obszarze badań (tablica 1), były rejestrowane z krokiem głębokościowym 0,1 m. Wyniki kompleksowej interpretacji miały ten sam krok głębokościowy albo w procesie przetwarzania były przeliczone z krokiem 0,25 m. Obliczenia dynamicznych parametrów sprężystych wykonane w programie Estymacja także miały krok głębokościowy 0,1 m lub 0,25 m. Podobnie, wyniki przetwarzania i interpretacji w aplikacji FalaFWS miały krok taki, jak dane wejściowe, czyli zgodny z krokiem głębokościowym rejestracji akustycznych obrazów falowych (AOF). Dysponowano zatem dużą ilością bardzo szczegółowych danych.

Dla wszystkich wykorzystanych profilowań uzgodnio-

no wspólny krok głębokościowy równy 0,25 m. Do tego wykorzystano aplikację Funmat w systemie GeoWin, używając interpolacji liniowej, prowadzącej do zmiany kroku próbkowania profilowań. Interpolacja w aplikacji Funmat prowadzi do redukcji liczby danych, lecz nie zmienia kształtu anomalii, co było ważnym aspektem przy operowaniu bardzo dużymi zbiorami.

W aplikacjach FalaFWS oraz Estymacja istnieje możliwość wygładzenia (uśredniania) profilowań z dowolnie wybraną liczbą punktów głębokościowych za pomocą średniej kroczącej. Dzięki temu uzyskuje się bardziej generalny obraz zmienności własności ośrodka skalnego, a szczegóły, które nie są już dostępne, nie powodują istotnej utraty informacji z punktu widzenia sejsmiki. Uśrednianie średnią krocząca prowadzi do wygładzenia krzywych zmian parametrów z głębokością, ale bez obniżenia liczby punktów głębokościowych.

Wyniki skalowania profilowań w otworze Sz-IG1 z wykorzystaniem średniej kroczącej

W tablicy 3 zgromadzono wybrane wyniki procesu uśredniania parametrów średnią krocząca (prędkości fali P – VPEQ, prędkości fali S – VSEQ, współczynnika Poissona – NIEQ oraz gęstości objętościowej – RHOBEQ) będących wynikiem obliczeń w programie Estymacja oraz wyników kompleksowej interpretacji profilowań geofizyki otworowej [6].

Proces uśredniania wykonano dla wszystkich parametrów i wszystkich jednostek litostratygraficznych, ale w artykule zaprezentowano tylko wybrane wyniki dla węglanowych utworów środkowego i dolnego wapienia muszlowego oraz piaskowcowo-ilastych utworów saksonu (czerwony spągowiec). W tablicy 3 znajduje się niezbędna informacja stratygraficzna i litologiczna, miąższość interwałów litostratygraficznych, ilość danych, które podlegały przetworzeniu w procesach uśredniania oraz wyniki w postaci średniej wartości parametru, wartości minimalnej, maksymalnej oraz odchylenia standardowego. Dane te pozwalają ocenić zmienność badanej wielkości w interwale litostratygraficznym oraz statystyczną istotność wyniku (dzięki dużej ilości danych). W prawej części tablicy 3 zgromadzono wyniki procedur uśredniania parametrów sprężystych i gęstości objętościowej w zadanych interwałach (oknach uśredniania) 30, 20, 12, 10, 8 i 2,5 m. W interwałach tych obliczono średnie krocząca, prowadzące do wygładzenia anomalii, przez zniwelowanie wpływu wartości ekstremalnych. Wartości parametrów VPEQ, VSEQ, RHOBEQ oraz NIEQ, występujące w prawej części tablicy 3, są średnimi arytmetycznymi liczb reprezentujących

wartości parametrów po obliczeniu średnich kroczących. W ostatniej kolumnie wpisano jeszcze raz niektóre wartości, które nie zmieniały się w procesie uśredniania. Takie zachowanie niektórych parametrów wskazuje na ich małą zmienność, związaną z fizyczną cechą, np. gęstością objętościową, lub wynikającą z małych zmian omawianej wielkości, np. współczynnika Poissona.

Na rysunkach 2 i 3 zamieszczono wykresy zmian prędkości fali podłużnej i poprzecznej oraz gęstości objętościowej w funkcji głębokości dla jednostek litostratygraficznych ujętych w tablicy 2, dla interwału wapienia muszlowego (612,75–750 m) oraz fragmentu saksonu (4765–4935 m). Utwory wapienia muszlowego są reprezentowane przede wszystkim przez utwory węglanowe: wapień muszłowy środkowy głównie przez dolomit, wapień muszłowy dolny przez wapień. Na rysunku 2 zauważyć można na głębokości 641 m granicę między wapieniem muszłowym środkowym (Tm2) i dolnym (Tm1), związaną ze wzrostem wartości V_p i nieznacznym wzrostem V_s . Zmienność litologii jest widoczna w postaci anomalii prędkości. Interwał głębokościowy obejmujący utwory saksonu jest znacznie większy niż wapienia muszlowego, jednak na rysunku 3 zdecydowano się przedstawić jedynie fragment obliczeń wykonanych w utworach czerwonego spągowca w interwale głębokościowym porównywalnym z miąższością wapienia muszlowego. W tym interwale czerwonego spągowca zmiany prędkości fal sprężystych oraz gęstości objętościowej okazały się bardziej dynamiczne niż w poziomie wapienia muszlowego. Obok podstawowych

Tablica 3. Wartości podstawowych statystyk wybranych parametrów oraz wartości prędkości, gęstości objętościowej i współczynnika Poissona po wykonaniu uśrednienia w wybranych interwałach litostratygraficznych, otwór Sz-IG1

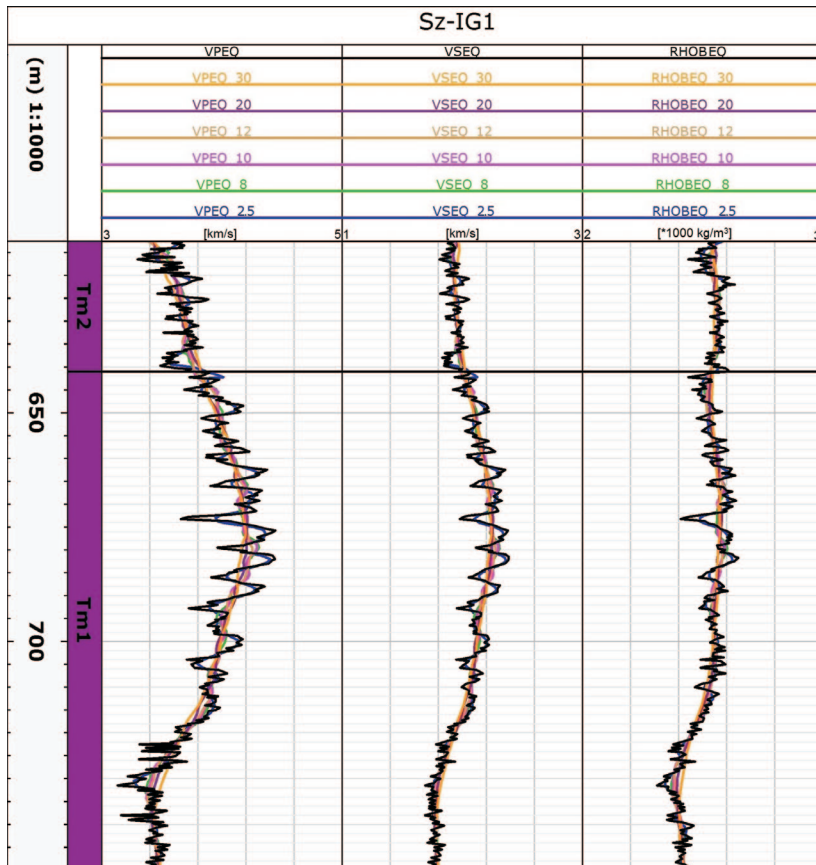
Jednostka stratygraficzna/głębokość Profilowanie, N – ilość danych	Wyniki z programu Estymacja				Wyniki przetwarzania						
	śred.	min.	max.	odch. stand.	wynik uśrednienia w interwale o miąższości podanej w metrach						
					30	20	12	10	8	2,5	średnia
Trias, (Tm2), wapień muszlowy śrd., (612,75–641 m), N = 116	iłowce, dolomity										
PHI	0,14	0,08	0,19	0,02							
VSH	0,28	0,12	0,42	0,07							
VDOL	0,58	0,47	0,70	0,05							
VPEQ [km/s]	3,64	3,30	3,89	0,12	3,83	3,77	3,72	3,71	3,69	3,66	
VSEQ [km/s]	1,94	1,81	2,05	0,06	2,03	2,00	1,97	1,97	1,96	1,95	
RHOBEQ*1000 [kg/m ³]	2,55	2,44	2,63	0,04	2,54	2,54	2,55	2,55	2,55	2,55	
NIEQ	0,30	0,28	0,31	0,01	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Trias (Tm1), wapień muszlowy dln., (641–750 m), N = 436	iłowce, wapienie										
PHI	0,11	0,02	0,22	0,05							
VSH	0,26	0,10	0,51	0,07							
VLIM	0,63	0,00	0,83	0,08							
VDOL	0,00	0,00	0,57	0,03							
VPEQ [km/s]	3,88	3,13	5,18	0,32	3,82	3,84	3,86	3,86	3,86	3,87	
VSEQ [km/s]	2,05	1,69	2,80	0,19	2,01	2,03	2,04	2,04	2,04	2,05	
RHOBEQ*1000 [kg/m ³]	2,51	2,31	2,65	0,08	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,51	
NIEQ	0,31	0,29	0,33	0,01	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Perm dolny, czerwony spągowiec, sakson (4318,5–5125 m), N = 3187	piaskowce, iłowce										
PHI	0,02	0,00	0,07	0,01							
VSH	0,42	0,07	0,85	0,12							
VSAN	0,57	0,15	0,90	0,12							
VPEQ [km/s]	4,79	4,04	5,33	0,18	4,78	4,78	4,78	4,78	4,78	4,79	
VSEQ [km/s]	3,00	2,43	3,43	0,14	2,99	2,99	2,99	3,00	3,00	3,00	
RHOBEQ*1000 [kg/m ³]	2,62	2,51	2,65	0,02	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
NIEQ	0,18	0,14	0,24	0,01	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18

składników litologicznych inne parametry, takie jak: za-
ilenie, porowatość czy gęstość objętościowa, mają także
wpływ na prędkości fal sprężystych.

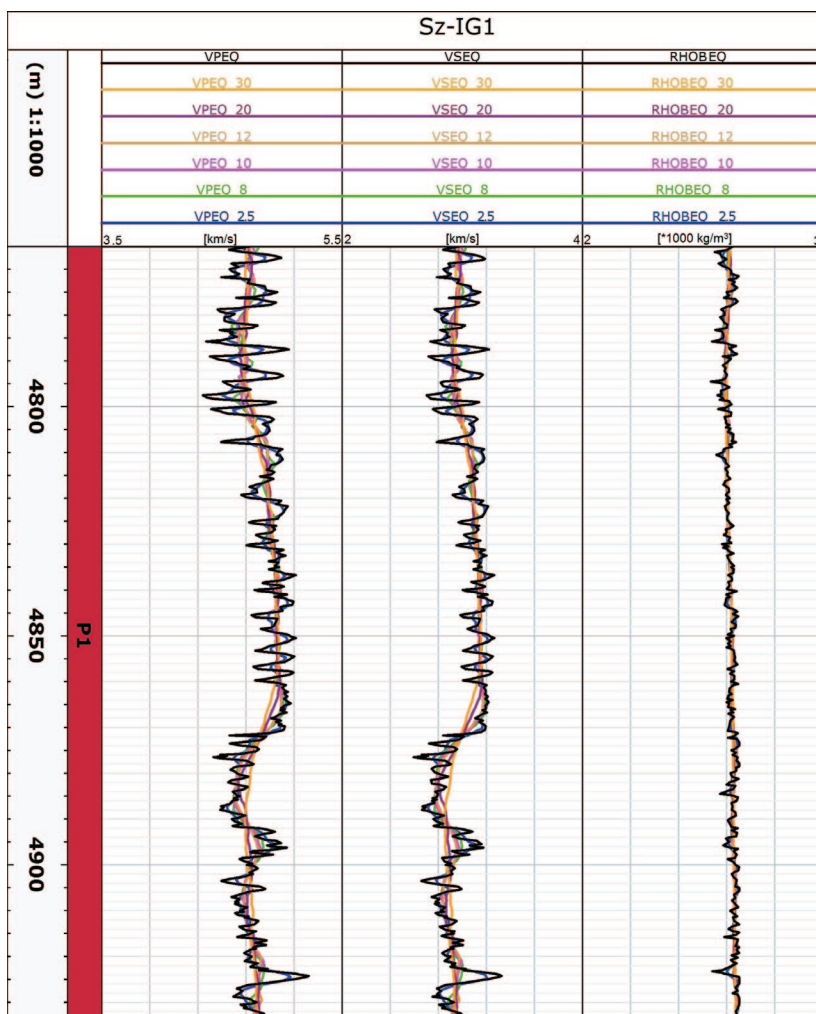
Wykresy zmian prędkości fal P i S oraz gęstości dla róż-
nych okien uśrednienia w funkcji głębokości są ilustracją
procesu skalowania. Wszystkie anomalie, widoczne na pro-
filowaniach geofizyki otworowej, z punktu widzenia sejsmi-
ki niepotrzebnie komplikują obraz. Anomalie odpowia-
dające uśrednieniu w warstwach 30., 20., i 12. metrowych są
pozbawione znacznej ilości szczegółów w porównaniu do
danych wejściowych. W wyniku uśrednienia profilowania
są wygładzone, ale główny trend zmian danego parametru

fizycznego jest zachowany. Należy zwrócić uwagę, że proce-
dura uśredniania powoduje jednak pewną utratę informacji.

W przypadku, gdy anomalie na profilowaniach są
niewielkie, tak jak dla profilowania gęstości RHOBEQ
w utworach saksonu, wyniki uśredniania są zbliżone do
siebie, bez względu na długość okna. Im wartości uśred-
nianego parametru są bardziej zróżnicowane, tym obser-
wuje się większe różnice dla okien o różnej długości uśred-
niania. Wpływ długości okna uśredniania wyraźnie widać
na przykładzie profilowań prędkości, np. w utworach wa-
pienia muszlowego na głębokości 722 m czy w utworach
saksonu na głębokościach 4870 m i 4892 m.



Rys. 2. Wynik uśredniania profilowań prędkości (VPEQ, VSEQ) i gęstości (RHOBEQ) średnią kroczącą w poziomie wapienia muszlowego z krokiem 2,5, 8, 10, 12, 20 i 30 m



Rys. 3. Wynik uśredniania profilowań prędkości (VPEQ, VSEQ) i gęstości (RHOBEQ) średnią kroczącą w sakońskich utworach czerwonego spągowca z krokiem 2,5, 8, 10, 12, 20 i 30 m

Opracowanie średnich wartości parametrów sprężystych

Interwał pomiarowy w otworze Sz-IG1 został podzielony na odcinki o jednakowej lub zbliżonej litologii (np. na utwory piaszczysto-ilaste, sole, anhydryty i dolomity), z uwzględnieniem wydzieleni litostragaficznych [4]. W tych odcinkach obliczono średnią arytmetyczną dla porowatości (PHI), procentowego udziału poszczególnych składników mineralnych (VSH, VSAN, VLIM, VDOL, VANH, VHAL, VSYL), gęstości (RHOBEQ) oraz parametrów sprężystych (VPEQ, VSEQ, NIEQ – współczynnik Poissona). Wykorzystano dane wejściowe oraz

dane po uśrednieniu średnią kroczącą z krokiem 12 m (tablica 4).

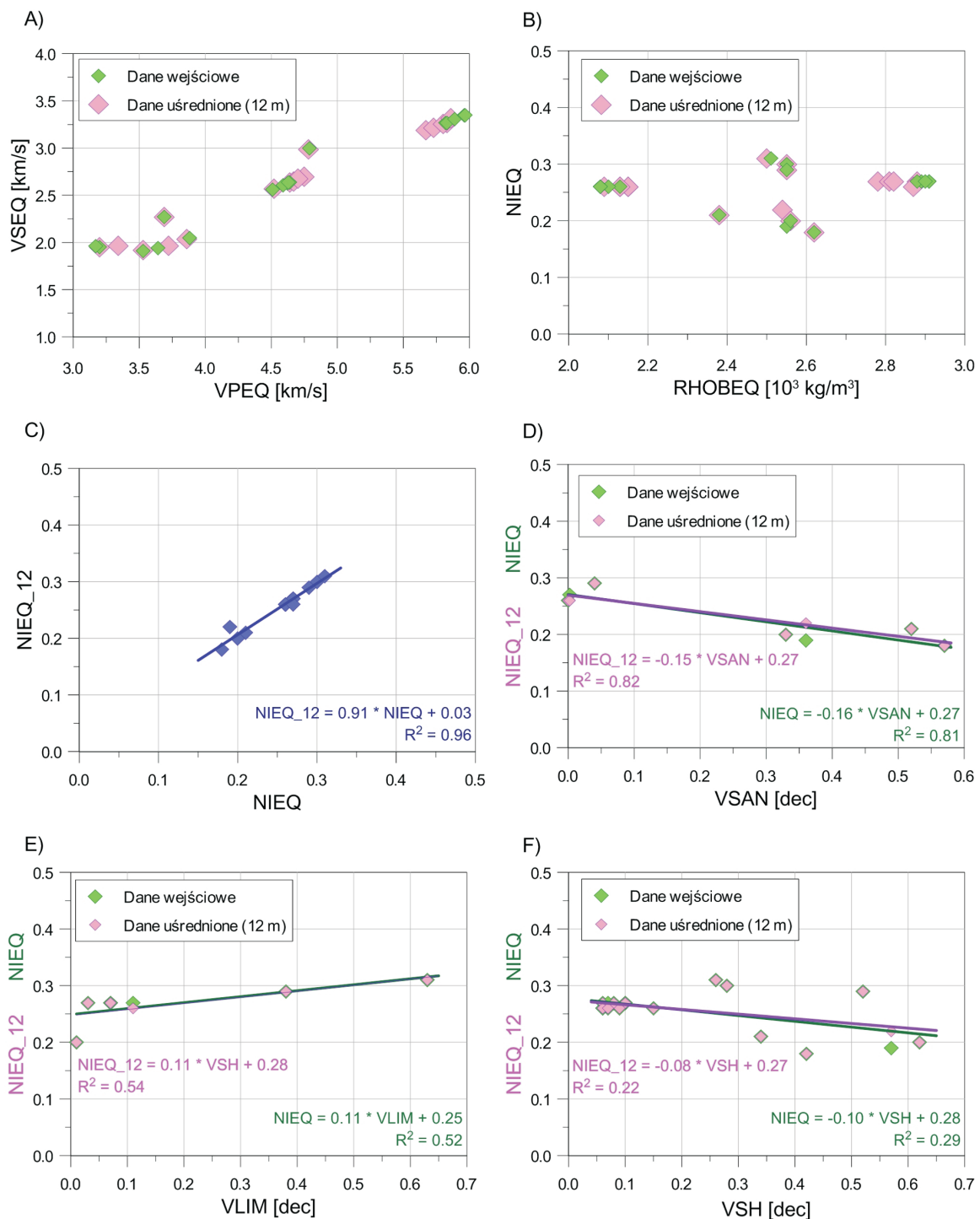
W celu porównania profilowań geofizyki otworowej przed i po procedurze uśredniania sporządzono wykresy korelacyjne wybranych parametrów petrofizycznych. Wykorzystano dane wejściowe oraz dane po uśrednieniu średnią kroczącą z krokiem 12 m. Na podstawie wartości z tablicy 4 sporządzono wykresy krzyżowe w celu sprawdzenia korelacji między wartościami uśrednionymi i danymi wejściowymi. Zależność między prędkościami VPEQ

Tablica 4. Wartości średnie parametrów w obrębie interwałów o jednakowym typie litologicznym

H	Stratygrafia	PHI	VSH	VSAN	VLIM	VDOL	VANH	VHAL	VSYL	VPEQ	VSEQ	RHOBEQ	NIEQ	VPEQ_12	VSEQ_12	RHOBEQ_12	NIEQ_12
[m]										[km/s]		[g/cm ³]		[km/s]		[g/cm ³]	
593–612	Tre	0,04	0,57	0,3600	-	0,020	-	-	-	3,17	1,96	2,55	0,19	3,34	1,97	2,54	0,22
612–641	Tm2	0,14	0,28	-	-	0,580	-	-	-	3,64	1,94	2,55	0,30	3,72	1,97	2,55	0,30
641–750	Tm1	0,11	0,26		0,63	0,001				3,88	2,05	2,51	0,31	3,86	2,04	2,50	0,31
750–929	Tp3	0,06	0,52	0,0400	0,38					3,53	1,91	2,55	0,29	3,53	1,92	2,55	0,29
929–2149,5	Tp2 + Tp1	0,04	0,62	0,3300	0,01					3,69	2,27	2,56	0,20	3,69	2,27	2,56	0,20
2149,5–3360	P3	0,01	0,15	0,0002				0,820	0,02	4,51	2,56	2,13	0,26	4,52	2,57	2,13	0,26
3360–3396,5		0,01	0,10			0,04	0,820	0,030		5,82	3,27	2,89	0,27	5,67	3,19	2,78	0,27
3396,5–3802,5		0,01	0,07				0,001	0,91	0,02	4,62	2,63	2,08	0,26	4,64	2,64	2,09	0,26
3802,5–3846		0,01	0,10		0,07		0,800	0,020		5,83	3,27	2,88	0,27	5,73	3,22	2,81	0,27
3846–3932,5		0,01	0,09				0,010	0,900		4,59	2,61	2,10	0,26	4,67	2,65	2,15	0,26
3932,5–4059		0,01	0,08		0,03		0,880	0,002		5,89	3,31	2,91	0,27	5,83	3,27	2,88	0,27
4059–4116,5		0,01	0,06				0,004	0,930		4,64	2,64	2,08	0,26	4,75	2,70	2,15	0,26
4116,5–4162,5		0,01	0,06		0,07		0,860	0,005		5,96	3,35	2,91	0,27	5,80	3,26	2,82	0,27
4162,5–4260		0,01	0,06				0,002	0,930		4,63	2,64	2,08	0,26	4,70	2,68	2,13	0,26
4260–4318,5		0,01	0,07	0,0020	0,11		0,810	0,004		5,97	3,35	2,90	0,27	5,86	3,32	2,87	0,26
4318,5–5125		Ps	0,02	0,42	0,5700						4,79	3,00	2,62	0,18	4,78	2,99	2,62

i VSEQ nie zmienia się wyraźnie przy porównaniu danych wejściowych i danych po uśrednieniu 12 m (rysunek 4A). Relacja między dynamiczną wartością współczynnika Poissona a gęstością objętościową również nie wykazuje zmian dla danych wejściowych i danych po uśrednieniu 12 m (rysunek 4B). Porównanie wartości współczynnika Poissona, jako danych wejściowych i po uśrednieniu

12 m, wykazuje bardzo dobrą korelację, występuje brak rozrzutu punktów (rysunek 4C). Współczynnik Poissona jest czuły na zmiany porowatości, litologii, a także obecność szczelin [17]. Dla danych z otworu Sz-IG1 określono relację między współczynnikiem Poissona a litologią. Ilustrację graficzną relacji między współczynnikiem Poissona a zawartością piaskowca przedstawiono na rysun-



Rys. 4. Relacje między parametrami bez uśredniania (dane wejściowe) oraz uśrednionymi w oknie o długości 12 metrów; VPEQ, VSEQ, RHOBEQ – prędkości fal sprężystych oraz gęstość objętościowa z programu Estymacja; NIEQ, NIEQ_12 – współczynnik Poissona z programu Estymacja; VSAN, VLIM, VSH – objętość piaskowca, wapienia i iłów

ku 4D, natomiast relację między współczynnikiem Poissona a zawartością wapienia przedstawiono na rysunku 4E. Dla obydwu składników litologicznych zaobserwowano podobne zależności: współczynniki w równaniach regresji dla danych wejściowych i po uśrednieniu 12 m są podobne, linie regresji są równoległe, nieco wyższy współ-

czynnik determinacji odpowiada zależności obliczonej dla uśrednionej wartości NIEQ_12 m. Natomiast relacja między współczynnikiem Poissona a zaileniem okazała się dla analizowanych danych bardzo słaba, współczynniki determinacji dla danych wejściowych i uśrednionych są zbliżone, ale bardzo niskie (rysunek 4F).

Uśrednianie prędkości fal sprężystych metodą Backusa

Jednym z podejść do przeskalowania danych geofizyki otworowej jest założenie, że ośrodek jest warstwowy. Backus [1] otrzymał dokładne rozwiązanie zagadnienia obliczenia własności uśrednionych dla ośrodka warstwowanego, przy założeniu, że wszystkie składniki ośrodka są liniowo sprężyste i izotropowe oraz że nie ma źródła rozproszenia energii wywołanego tarcieniem lub lepkością. Metoda Backusa polega na znalezieniu „uśrednionego” tensora sztywności powiązanego za pomocą prawa Hooke’a z polem naprężeń i odkształceń, uśrednionych dla reprezentatywnej objętości ośrodka. Ma ona zastosowanie wtedy, gdy długość fali sejsmicznej rozchodzącej się w ośrodku jest dużo większa niż miąższość pojedynczych warstwek. Wartości prędkości fal sprężystych oraz gęstości z profilowań geofizyki otworowej można powiązać z pojedynczymi cienkimi warstewkami i przyjąć, że ich miąższość jest równa krokowi próbkowania profilowań (np. 0,1 m, 0,1524 m lub 0,25 m). W takim przypadku warstewki są bardzo cienkie w porównaniu do długości fali sejsmicznej.

Ośrodek cienkowarstwowy może wykazywać anizotropię typu VTI (*Vertical Transverse Isotropy*) z pionową osią symetrii. W przypadku stosowania zwężonego zapisu macierzowego zgodnie z notacją Voighta zamiast zapisu tensorowego, związek między naprężeniem σ_α a odkształceniem ε_β w ośrodkach sprężystych określa prawo Hooke’a $\sigma_\alpha = c_{\alpha\beta} \cdot \varepsilon_\beta$, gdzie $c_{\alpha\beta}$ jest macierzą sztywności. W ośrodkach o symetrii heksagonalnej – takiej, jaką wykazują ośrodki typu VTI – występuje pięć niezależnych składowych macierzy sztywności spośród 12 niezerowych: c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{33} , c_{44} [16]. Ośrodek VTI może być jednoznacznie opisany przez składowe macierzy sztywności i gęstość objętościową (c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{33} , c_{44} , ρ_b) lub przez alternatywny zestaw parametrów (V_{P0} , V_{S0} , ε , δ , γ , ρ_b) [15]. V_{P0} to pionowa prędkość fali P; V_{S0} to prędkość fali S spolaryzowanej pionowo; ε , δ , γ , to bezwymiarowe parametry Thomsena [18] wskazujące anizotropię. Metoda Backusa polega na uśrednieniu wartości c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{33} , c_{44} w taki sposób, aby otrzymać nowy zestaw współczynników macierzy sztywności C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{33} , C_{44} opisujących własności ośrodka uśrednionego

(jednorodnego). Uśrednianie współczynników macierzy sztywności odbywa się w pewnym zakresie głębokości, odpowiadającym długości fali sejsmicznej. Długość okna uśredniania L zależy od prędkości fali S spolaryzowanej pionowo oraz dominującej częstotliwości fali sejsmicznej. Relację tę określa wzór [14]:

$$L \leq \frac{\lambda_{dom}}{N} = \frac{V_{SVmin}}{N \cdot f_{dom}} \quad (1)$$

gdzie:

L – długość okna uśredniania,

λ_{dom} – dominująca długość fali sejsmicznej,

V_{SVmin} – minimalna prędkość fali S spolaryzowanej pionowo w ośrodku o anizotropii VTI (minimalna prędkość fali S z profilowań akustycznych),

N – jest liczbą dodatnią, która ustala długość okna uśredniania jako ułamek długości fali sejsmicznej,

f_{dom} – częstotliwość dominująca fali sejsmicznej.

Wartość parametru N zależy od zastosowania uśrednionych prędkości. Dla utworzenia wiarygodnego modelu prędkościowego sugerowana wartość N wynosi 3 [9, 15]. Teoria Backusa pozwala na zastąpienie szybkozmiennego, cienkowarstwowanego ośrodka ośrodkiem bardziej jednorodnym, będącym odpowiednikiem „długofalowym” dla oryginalnego.

Zakładając, że każda z warstwek jest izotropowa, składowe macierzy sztywności redukują się do postaci: $c_{11} = c_{33} = \lambda + 2\mu$; $c_{13} = \lambda$; $c_{44} = c_{66} = \mu$, gdzie $c_{66} = 0,5(c_{11} - c_{12})$, a prędkości fal sprężystych wyrażone są znanymi wzorami:

$$V_P = \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho_b}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_b}} \quad (2)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{c_{44}}{\rho_b}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_b}} \quad (3)$$

gdzie:

λ – stała Lamé’go,

μ – moduł sztywności,

ρ_b – gęstość objętościowa.

Mając prędkości fal P i S oraz gęstość z pomiarów geofizyki otworowej i zakładając, że krok próbkowania profilowań określa miąższość pojedynczych warstwek, można dla każdej z nich wyznaczyć elementy: c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{33} , c_{44} . Następnie, zgodnie z metodą Backusa, oblicza się uśrednione w pewnym interwale głębokościowym współczynniki: C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{33} , C_{44} . Na ich podstawie określa się prędkości fal dla ekwiwalentnego ośrodka „długofalowego”:

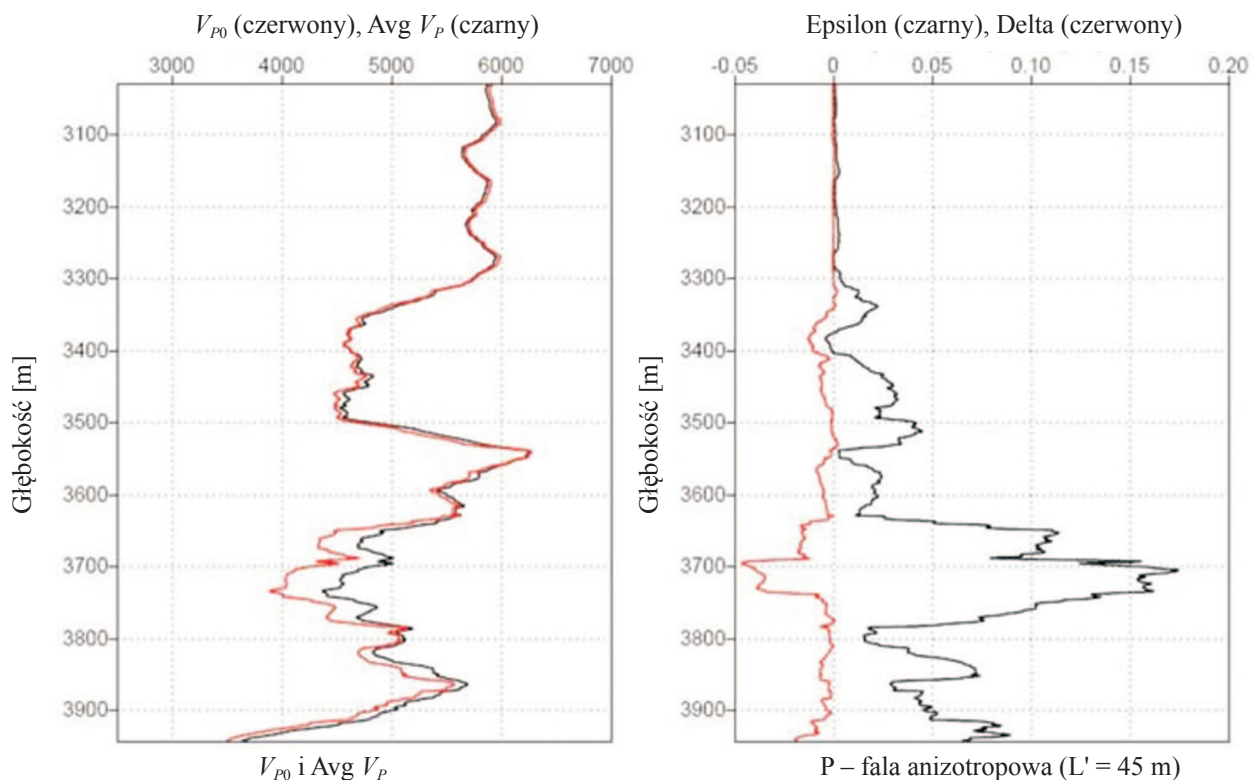
$$V_P = \sqrt{\frac{C_{33}}{\langle \rho_b \rangle}} \quad (4)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{C_{44}}{\langle \rho_b \rangle}} \quad (5)$$

gdzie $\langle \rho_b \rangle$ oznacza średnią gęstość objętościową obliczoną w tym samym interwale co współczynniki macierzy

szywności. W literaturze [14, 15, 19] podana jest szczegółowa metodyka oraz wzory pozwalające na otrzymanie uśrednionych metodą Backusa współczynników macierzy szywności i prędkości fali sprężystych.

Standardowe dane geofizyki otworowej (V_P , V_S , ρ_b) nie dają szansy na wzięcie pod uwagę anizotropii dla pojedynczych warstwek i w metodzie Backusa skały traktowane są jako izotropowe. Pomiar sondami dipolowymi mogą wskazywać na anizotropię ośrodka, jeśli obserwuje się różnicę między V_{SH} i V_{SV} . Pomimo założenia o izotropowości warstwek, cały ośrodek cienkowarstwowy może wykazywać anizotropię VTI z pionową osią symetrii. Według Linera i Fei [15], dla ośrodków, które wykazują anizotropię VTI, można zaobserwować różnicę między prędkościami uśrednionymi metodą Backusa (V_{P0}) a zwykłą średnią kroczącą (V_{Psr}), co przedstawia rysunek 5.



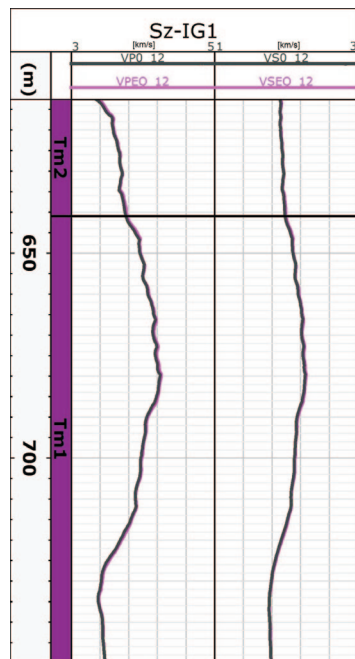
Rys. 5. Porównanie prędkości fali P uśrednionej metodą Backusa (V_{P0} – krzywa czerwona) oraz metodą średniej kroczącej ($Avg V_P$ – krzywa czarna) – lewa strona rysunku. Z prawej strony rysunku przedstawione są parametry Thomsena: ϵ (krzywa czarna) oraz δ (krzywa czerwona). Wartości różne od zera wskazują na ośrodek anizotropowy [15]

Porównanie wyników uśredniania prędkości fal sprężystych metodą średniej kroczącej i metodą Backusa

Korzystając z metodyki przedstawionej w literaturze [14, 15, 19], obliczono uśrednione prędkości fali P (V_{P0}) i fali S (V_{S0}). Aby można było porównać wyniki uśredniania Backusa i średnią kroczącą obliczenia wykonano dla takich samych długości okien, tj. 2,5, 8, 10, 12, 20 i 30 m.

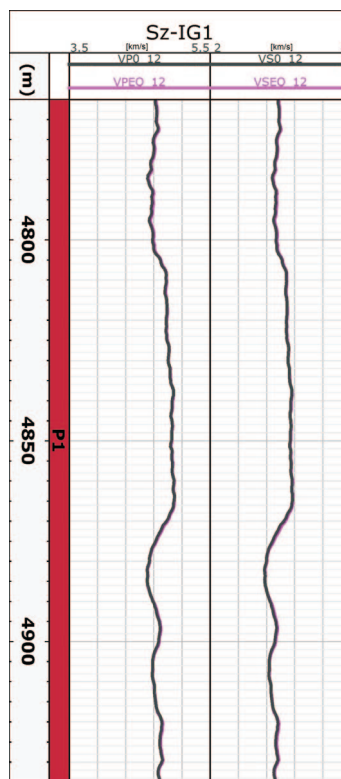
Zgodnie ze wzorem na długość okna uśredniania odpowiada to następującym częstotliwościom dominującym fali sejsmicznej: 187,5, 58, 47, 39, 23,5 i 15,6 Hz dla minimalnej prędkości fali S wynoszącej dla danych z otworu Sz-IG1 $V_{smin} = 1407$ m/s i dla $N = 3$. Na rysunkach 6 i 7 przedsta-

wiono wyniki uśredniania Backusa dla okna o długości 12 m dla fali P (VP0_12) i S (VS0_12) na tle uśredniania średnią kroczącą (VPEQ_12 i VSEQ_12) w utworach wapienia muszlowego oraz czerwonego spągowca. Otrzymane wyniki w obu litologiach wykazują bardzo dużą zgodność. Istnieje dowód na prawidłową metodykę uśredniania Bac-



Rys. 6. Porównanie wyników uśredniania prędkości fal P i S średnią kroczącą (VPEQ_12, VSEQ_12) oraz metodą Backusa (VP0_12, VS0_12) w oknie uśredniania 12 m, w interwale wapienia muszlowego środkowego i dolnego

kusa. Z drugiej strony, taka duża zgodność potwierdza sens obliczania średniej kroczącej, w szczególności w utworach, które nie wykazują własności anizotropowych.



Rys. 7. Porównanie wyników uśredniania prędkości fal P i S średnią kroczącą (VPEQ_12, VSEQ_12) oraz metodą Backusa (VP0_12, VS0_12) w oknie uśredniania 12 m, w interwale czerwonego spągowca, sakson

Wnioski

Istnieje potrzeba dopasowania skali profilowań geofizyki otworowej do skali sejsmiki, w celu budowy wiarygodnych modeli prędkościowych. Zaprezentowane metody uśredniania, średnią kroczącą i Backusa, pozwalają na wygładzenie profilowań geofizyki otworowej. Metody uśredniania nie powodują utraty głównego trendu zmian danego parametru, natomiast niwelują jego zmiany (anomalie) lokalne, które z punktu widzenia sejsmiki niepotrzebnie komplikują obraz.

Ważnym parametrem uśredniania w każdej z metod jest długość okna uśredniania. W przypadku profilowań geofizyki otworowej uśrednionych w oknach o długości 30, 20 i 12 m widoczne jest pozbycie się znacznej ilości szczegółów w porównaniu do profilowań wejściowych. Profilowania geofizyki otworowej uśrednione w oknach o długości 10, 8 i 2,5 m charakteryzują się znacznie większą dokładnością. Procedura uśredniania powoduje pewną utratę informacji, jednakże dla potrzeb budowania modeli prędkościowych nie jest ona znacząca.

Należy podkreślić, że oprócz długości okna na wynik uśredniania mają wpływ zmiany lokalne parametrów. W przypadku, gdy anomalie na profilowaniach są niewielkie, wyniki uśredniania są zbliżone do siebie, bez wzglę-

du na długość okna. Im wartości uśrednianego parametru są bardziej zróżnicowane, tym obserwuje się większe różnice dla okien o różnej długości.

Zależności pomiędzy prędkościami V_p i V_s , a także między dynamiczną wartością współczynnika Poissona a gęstością objętościową nie zmieniają się wyraźnie przy porównaniu danych wejściowych i danych po uśrednieniu 12 m. Główny trend zmian parametrów po wykonaniu procedury uśredniania został zachowany. Porównanie wartości współczynnika Poissona – jako danych wejściowych, i po uśrednieniu 12 m wykazuje bardzo dobrą korelację. Współczynnik Poissona został skonfrontowany ze składnikami litologicznymi w odpowiednich interwałach litostratygraficznych i potwierdzono jego zależność od litologii. Dla obydwu składników litologicznych: zawartości piaskowca i zawartości wapienia zaobserwowano podobne zależności – współczynniki w równaniach regresji dla danych wejściowych i po uśrednieniu 12 m są podobne. Współczynnik Poissona maleje ze wzrostem zawartości piaskowca, natomiast rośnie ze wzrostem zawartości wapienia. Relacja między współczynnikiem Poissona a zaileniem okazała się bardzo słaba.

Uśrednianie metodą średniej kroczącej i Backusa dało

praktycznie identyczne wyniki, pomimo zupełnie innych podstaw teoretycznych obu metod i procedury uśredniania. Dowodzi to poprawności zastosowanej metodyki oraz

potwierdza słuszność wykonywania obliczeń średnią kroczącą, w szczególności w ośrodkach, w których nie obserwuje się anizotropii.

Autorki dziękują prof. dr hab. inż. Wojciechowi Góreckiemu za możliwość udziału w projekcie badawczym pt.: „Poprawa efektywności badań sejsmicznych w poszukiwaniach i rozpoznawaniu złóż gazu ziemnego w utworach formacji czerwonego spągowca”.

Literatura

- [1] Backus G. E.: *Long- wave elastic anisotropy produced by horizontal layering*. „Journal of Geo-physical Research” 1962, No. 67, vol. 11, s. 4427–4440.
- [2] Bała M., Cichy A.: *Badanie zależności prędkości fal, modułów sprężystości, współczynnika Poissona oraz gęstości od ciśnienia i temperatury*. Raport z projektu badawczego nr NN525 363537 pt.: *Modelowania teoretyczne i empiryczne wpływu zmiennego ciśnienia i nasycenia gazem na parametry sprężyste, gęstość i oporność skał dla oceny przepuszczalności z danych geofizyki otworowej*, 2012.
- [3] Bała M., Cichy A.: *Metody obliczania prędkości fal P i S na podstawie modeli teoretycznych i danych geofizyki otworowej – program Estymacja*. AGH. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne. Kraków 2006.
- [4] Centralna Baza Danych Geologicznych, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, <http://geoportal.pgi.gov.pl/cbdg/dane/otworowy>
- [5] Czopek B., Nowak J.: *Interpretacja ilościowa profilowań geofizyki otworowej w przypadku niskiej jakości profilowań i ograniczonego zakresu metodycznego pomiarów*. „Geologia” 2011, 37/4, s. 503–516.
- [6] Czopek B., Nowak J.: *Sprawozdanie z realizacji części projektu w r. 2012*, 2012.
- [7] Dokumentacje otworów udostępnione do realizacji projektu badawczego [1] przez spółki Grupy PGNiG – Geofizyka Toruń Sp. z o.o. i Geofizyka Kraków Sp. z o.o.
- [8] Górecki W.: *Projekt badawczy „Poprawa efektywności badań sejsmicznych w poszukiwaniach i rozpoznawaniu złóż gazu ziemnego w utworach formacji czerwonego spągowca*, 2009–2012, POIG 01.01.02-00-122/09, AGH 72.72.140.8425.
- [9] Helbig K.: *Anisotropy and dispersion in periodically layered media*. „Geophysics” 1984, vol. 49, issue 4, s. 364–373.
- [10] Jarzyna J. i in.: *Przetwarzanie i interpretacja profilowań geofizyki wiertniczej, system Geowin*. Arbor. Kraków 2002.
- [11] Jarzyna J. i in.: *Przetwarzanie i interpretacja profilowań geofizyki wiertniczej, system Geowin, cz. II: Nowe aplikacje i uzupełnienia*. Arbor. Kraków 2007.
- [12] Jarzyna J. i in.: *Wybrane aspekty skalowania profilowań geofizyki otworowej na potrzeby sejsmiki*. „Geologia” 2011, 37/3, s. 401–445.
- [13] Jarzyna J., Bała M., Krakowska P.: *Modele prędkościowe na potrzeby sejsmiki na podstawie geofizyki otworowej*. „Geologia” 2011, 37/3, s. 447–473.
- [14] Liner C. L., Fei T. W.: *Layer – induced seismic anisotropy from full-wave sonic logs: Theory, application and validation*. „Geophysics” 2006, vol. 71, issue 6, s. D183–D190.
- [15] Liner C., Fei T. W.: *The Backus number*. „The Leading Edge” 2007, vol. 26, issue 4, s. 420–426.
- [16] Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J.: *Rock Physics Handbook. Tools for Seismic Analysis of Porous Media*. Cambridge University Press, 2009.
- [17] Pinińska J. i in.: *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał*. Zakład Geomechaniki, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski. Warszawa 1996.
- [18] Thomsen L.: *Weak elastic anisotropy*. „Geophysics” 1986, vol. 51, issue 10, s. 1954–1966.
- [19] Tiwary D. K. et al.: *Comparison of seismic upscaling methods: From sonic to seismic*. „Geophysics” 2009, vol. 74, issue 2, s. WA3–WA14.



Prof. dr hab. inż. Jadwiga JARZYNA – ukończyła studia w specjalności geofizyka stosowana na Wydziale Geologiczno-Poszukiwawczym Akademii Górniczo-Hutniczej. Zajmuje się wyznaczaniem własności fizycznych skał zbiornikowych i sprężystych, na podstawie pomiarów geofizyki otworowej i badań laboratoryjnych. Doskonali metody kompleksowej interpretacji profilowań geofizyki otworowej.



Prof. dr hab. inż. Maria BAŁA – pracownik w Katedrze Geofizyki, Wydziału Geofizyki, Geologii i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej. Jest specjalistą w dziedzinie modelowań teoretycznych parametrów sprężystych w ośrodkach porowatych oraz interpretacji danych geofizyki otworowej. Współautorka programów do przetwarzania i interpretacji profilowań geofizyki otworowej.



Dr inż. Edyta PUSKARCZYK – adiunkt w Katedrze Geofizyki WGGiOŚ Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Zajmuje się kompleksową interpretacją profilowań geofizyki otworowej oraz zagadnieniami z zakresu petrofizyki, szczególnie dotyczącymi pomiarów i interpretacji sygnałów magnetycznego rezonansu jądrowego. Wykorzystuje narzędzia statystyczne do oceny własności skał.



Mgr inż. Paulina KRAKOWSKA – w roku 2009 ukończyła studia na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Obecnie jest studentką Stacjonarnych Studiów Doktoranckich na kierunku Geofizyka WGGiOŚ AGH. Interesuje się interpretacją skał węglanowych na podstawie pomiarów geofizyki otworowej oraz badań laboratoryjnych.



Dr inż. Kamila WAWRZYŃIAK-GUZ – adiunkt w Katedrze Geofizyki na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie. Zajmuje się zagadnieniami prowadzącymi do powiązania profilowań geofizyki otworowej z danymi sejsmicznymi wykorzystując profilowania akustyczne z pełnym obrazem falowym i atrybuty sejsmiczne.