

Halina Jędrzejowska-Tyczkowska
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Renesans roli akwizycji w metodzie sejsmicznej, w świetle poszukiwań niekonwencjonalnych złóż węglowodorów

Wstęp

Od wielu lat metoda sejsmiczna postrzegana jest jako wiodąca w poszukiwaniu węglowodorów [5, 8] i bez względu na to jaki okres rozwoju tej technologii jest rozważany, zawsze w porównaniu z innymi metodami badań powierzchniowych (np. grawimetria, magnetyzm, metody magnetotelluryczne) podkreślana jest jej wysoka rozdzielczość i dokładność oraz znaczna głębokość możliwej penetracji i rozpoznania geologicznego.

W odniesieniu czasowym (lata 80. i współcześnie), ilościowe wymagania dotyczące wymienionych czynników są coraz wyższe – zgodnie z hasłem „osiągać coraz większe głębokości z coraz wyższą precyzją i trafnością odtworzenia parametrów ośrodka”.

W okresie ogromnego zainteresowania zaniedbywanym dotąd rodzajem formacji geologicznych, stanowiących potwierdzone w skali światowej zbiorniki znacznych zasobów gazu tzw. „łupkowego”, należy wyraźnie powiedzieć, że metoda sejsmiczna stanowi podstawowe narzędzie – nie tylko poszukiwawcze, ale również eksploatacyjne dla tego typu źródła energii. W Polsce lata 2010 i 2011 (a zapewne i dalsze), podobnie jak na całym świecie, to okres niezwykle ożywionego zainteresowania gazem z łupków. W ślad

za tym zainteresowaniem pojawiają się nowe wyzwania i działania. Przegrupowaniu ulega rola oraz waga niektórych problemów i metodyk, a część z zagadnień nabiera nowych aspektów teoretycznych i praktycznych.

W najnowszym wydaniu *European Association of Geoscientists and Engineers – First Break*, maj 2011 r., którego tematem wiodącym jest *Unconventional Resources and the Role of Technology*, Andrew Jennings (Schlumberger) w artykule pt.: *Shale gas developments: enabled by technology* (p. 127) napisał: „Sejsmika jest kluczem do eksploracji gazu z łupków na wielką skalę (*Seismic: the key to large scale shale gas exploration*). I dalej, cyt. „Sejsmika stanowi fundamentalną część procesu dokładnego zrozumienia i rozpoznania złóż niekonwencjonalnych. Sejsmicznie wprowadzone właściwości i parametry złożowe (*seismic derived properties*) są ważne nie tylko dla charakterystyki i oceny złoża, ale nawet, poprzez opracowane mapy naprężeń, stanowią ważną informację dla procesu wiercenia, jak też planowania infrastruktury powierzchniowej. Kolejnym z ważnych dla integracji czynników jest wybór optymalnych schematów akwizycji”. Zagadnieniu powyższemu poświęcona jest niniejsza publikacja.

Wybrane elementy teorii sprężystości, w świetle czytelności sejsmicznego pola falowego

Intrygujące więc jest pytanie o istotę i rodzaj mierzonych w metodzie sejsmicznej wielkości, które dostarczają tak wysoko ocenianych informacji. Korzystając z równań teorii propagacji fal sprężystych oraz z doświadczeń sejsmologii, zajmującej się obserwacją trzęsień ziemi, wiemy,

że mierzonymi w metodzie sejsmicznej wielkościami są amplituda i czas propagujących w ośrodku, różnie nazywanych fal sprężystych: podłużnych (dylatacyjnych, kompresyjnych, nierotacyjnych) oraz poprzecznych (ścinających, rotacyjnych), oznaczonych symbolami *P* (*primary*

– pierwsze) i *S* (*secondo* – drugie), ze względu na pozycję i sukcesję czasową na zapisie trzęsień ziemi.

Ruch falowy drgań sprężystych opisany jest dość skomplikowanymi równaniami różniczkowymi, uzależnionymi od tego, z jaką dokładnością chcemy opisać ośrodek, w którym propagują fale. Poniższe przypomnienie najprostszyc, ale jednocześnie podstawowych związków i definicji ma na celu zwrócenie uwagi na fakt, jak daleka jest droga od pozyskanej, zapisanej informacji, do przestrzennego obrazu wnętrza ziemi, którego dostarcza metoda sejsmiczna, oraz jak duża jest waga danych, które zostają zapisane.

Wygodnym przybliżeniem procesu propagacji jest przybliżenie wyrażone przez prawo Hook’a. Medium poddane naprężeniom (*stress*) o składowych σ_{ij} reaguje poprzez odkształcenia (*strain*) ε_{ij} , według zależności $\partial_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{ij}$, gdzie C_{ijkl} jest tensorem sztywności. W przypadku małych odkształceń można mówić o tym, że te dwie wielkości są proporcjonalne.

Podstawowe zależności w ujęciu trójwymiarowym wyrażone są przez następujące równania, określające składowe u, v, w wektora przemieszczenia w punkcie P o współrzędnych $\{x, y, z\}$:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

dla odkształceń normalnych, a dla odkształceń ścinających:

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \quad \varepsilon_{zx} = \varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

gdzie σ_{ij} oraz ε_{ij} to odpowiednio: składowe tensora naprężeń i odkształceń.

Związek pomiędzy odkształceniem ε_{ik} a przemieszczeniem μ jest następujący:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_i}{\partial_k} + \frac{\mu_k}{\partial_i} \right)$$

przy czym w przypadku izotropowym moduł c_{ijkl} wyraża się jedynie przez stałe Lamego (λ, μ).

Występujące w tym równaniu stałe λ i μ charakteryzują sprężyste właściwości medium izotropowego – stała μ wyraża odporność medium na odkształcenia ścinające (moduł sztywności):

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \lambda = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

stąd
$$\nu = \frac{E}{2\mu} - 1 = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

gdzie E oznacza moduł Younga, a ν – stałą Poissona.

Sprężyste właściwości ośrodka relacjonowane są najczęściej za pomocą następujących stałych sprężystych:

- modułu Younga $E = \sigma_{xx}/\varepsilon_{xx} \rightarrow$ sprężystości podłużnej [$\text{kG/mm}^2 \cdot 10^4$],
- stałej Poissona $\nu = -\varepsilon_{yy}/\varepsilon_{zz} = -\varepsilon_{xx}/\varepsilon_{zz}$,
- modułu objętościowego k (wartość dodatnia), określonego jako stosunek naprężenia normalnego p (lub ciśnienia hydrostatycznego) i dylatacji Δ , gdzie $k = -p/\Delta \rightarrow$ moduł odkształcenia objętości (moduł ściśliwości).

Wykorzystując prawo Hook’a możemy zapisać:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad k = \frac{3\lambda + 2\mu}{3}$$

Łatwo zauważyć, że współczynnik Poissona ν jest funkcją prędkości propagacji fal sprężystych podłużnych i poprzecznych.

Związki te pozwalają wnioskować „nie wprost” o procesie propagacji fali sprężystej w ośrodku, jednak nie stanowią bezpośredniej podstawy do określenia jego budowy wewnętrznej – co stanowi cel prospekcji naftowej, natomiast, poprzez dość złożoną formę zniechęcają do szczegółowych analiz na poziomie projektowania schematu akwizycji. Należy jednak pamiętać, iż treść tych równań w przeważającym stopniu decyduje o tym, jak silny sygnał zostanie zapisany przez ułożoną na powierzchni ziemi aparaturę rejestrującą. Na tym etapie można skorzystać z łatwo akceptowalnego przybliżenia sejsmiki geometrycznej.

Odnośnie efektywności metody sejsmicznej często wymienia się trzy etapy badań, które ją warunkują – są to: rejestracja, przetwarzanie oraz interpretacja. Oceniając wagę każdego z tych etapów, warto przytoczyć powszechnie znaną opinię: „interpretację można powtórzyć i zmienić, przetwarzanie można uzupełnić, ale to, co nie zostało zarejestrowane jest stracone na zawsze” (w sensie kosztów i wysiłku). Celem sejsmika jest proste, czytelne i dynamicznie wyraźne zapisanie amplitudy drgań sejsmicznych. Nie odnosząc się do zagadnień aparaturowych, należy uwzględnić ogólną informację o budowie ośrodka – tak, aby nie „przeoczyć” propagującej fali, czyli aby pojawiła się dostatecznie silna tam, gdzie chcemy ją obserwować.

Mówiąc o efektywności w metodzie sejsmicznej nie sposób ustrzec się od pewnych, prawie filozoficznych refleksji. Metoda ta, jak żadna inna, wymaga od użytkownika choćby podstawowego, lecz całościowego, kompleksowego rozumienia wszystkich trzech ww. etapów badań; co więcej – w kontekście rozwiązywanego zadania geo-

logicznego. Dla potwierdzenia powyższego stwierdzenia można przytoczyć opinię jednego z tzw. „*Distinguished Lecturers*” Society of Exploration Geophysicists: *The ideal interpreter combines Geophysical and geological information and fully understands the processes involved in generation and transmission of seismic waves, the effects of recording equipments and data processing and the physical significance of Geophysical data... The ideal interpreter probably does not exist* [5].

Ta ostatnia sekwencja nie jest może nadmiernie optymistyczna, ale przypomina o zachowaniu roztrzonego dystansu – bardzo potrzebnego w prospekcji ropy i gazu. Świadomie prowadzić interpretację i rozumieć zaobserwowane zjawiska można tylko wtedy, gdy zrozumiałe są zasady zastosowanego uprzednio przetwarzania. Również tylko wówczas można stosownie dobrać sekwencję przetwarzania, gdy uwzględnione zostaną przesłanki wynikające z parametrów i schematu pomiarów połowych.

Cel badań i przyjęta metodyka oceny *à priori* schematu akwizycji

Prezentowana publikacja charakteryzuje wybrane obliczenia i analizy wykonane w Instytucie Nafty i Gazu, w ramach tematu: „Występowanie złóż węglowodorów w utworach górnego paleozoiku (karbon, dewon) na Pomorzu Zachodnim” – pod kierunkiem Grzegorza Leśniaka, których celem było „określenia możliwości sejsmicznego śledzenia horyzontów podcechsztyńskich o dostatecznej ciągłości i dynamice”.

Metoda sejsmiczna dysponuje możliwością śledzenia różnorodnych formacji geologicznych; zarówno pod względem kształtu i głębokości pograżenia, jak też pod względem wielkości określających je parametrów fizycznych. Kluczem do uzyskania dobrych wyników sejsmicznych, w postaci czytelnego pola falowego, jest: przyjęcie dostosowanego do celu geologicznego schematu akwizycji, wyemitowanie w głąb penetrowanego ośrodka wystarczająco dużej energii oraz określenie koniecznej rozdzielczości danych sejsmicznych. Uzyskanie ww. informacji można osiągnąć trzema sposobami:

- 1) metodą prac eksperymentalnych w terenie, poprzez testowanie różnych opcji schematów akwizycji i ich parametrów – co jednak jest czasochłonne i generuje dodatkowe, znaczne koszty,
- 2) dzięki zastosowaniu specjalistycznego oprogramowania do projektowania prac sejsmicznych (szczególnie w opcji 3D). Uwzględniane są tu przede wszystkim parametry geometrii schematu akwizycji. Dynamika

Kierując się powyższym rozumowaniem można powiedzieć, że w metodzie sejsmicznej nie należy oczekiwać sukcesu poszukiwawczego bez precyzyjnego projektu schematu akwizycji. Pamiętając, iż w metodzie sejsmicznej – szczególnie współcześnie, gdy stosuje się technologie 3D – prace polowe stanowią nie mniej niż 70÷80% całkowitego kosztu badań oraz że cel geologiczny często sformułowany jest kompleksowo, przyjęcie określonego schematu akwizycji powinno być poprzedzone pewnym zakresem symulacji obrazu falowego, umożliwiającą wybór optymalnego schematu.

Jak można wnioskować z wielu prac reinterpretacyjnych wykonanych aktualnie na potrzeby poszukiwań ropy, znacznie bezpieczniej i w perspektywie długoterminowej taniej jest projektować schemat akwizycji w pewnym sensie „na wyrost”. Takim właśnie badaniom poświęcono obliczenia i analizy prezentowane w dalszej części artykułu.

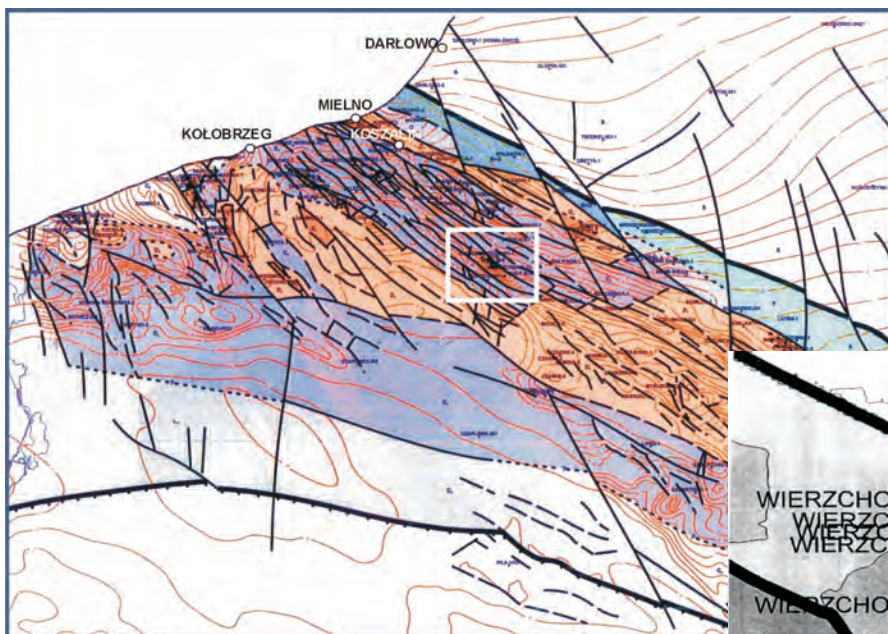
- zapisu oceniana jest poprzez intensywność „oświetlenia” obiektu przez falę sejsmiczną, rozumianą jako ilość energii przypadającej na jednostkę powierzchni. System ten nie bierze pod uwagę m.in. wyników rozwiązania równania Zoeppritza, które rzutują na wybór tzw. „offsetu” (roztawu) – odległości pomiędzy punktami emisji a punktami rejestracji drgań sejsmicznych,
- 3) metodą eksperymentu obliczeniowego, poprzez modelowanie sejsmiczne – przyjmując alternatywne modele geologiczne *à priori*, drogą rozwiązania równań falowych lub uproszczonych rozwiązań tzw. „teorii promieniowej”. Wyniki modelowania informują, jak różnie przyjęte schematy akwizycji – imitując rzeczywiste sytuacje w sensie kinematycznym oraz dynamicznym – różnicują zarejestrowane pola falowe.

Wyniki takiego modelowania pozwalają optymalizować projektowanie systemowe schematu akwizycji, wymienione w punkcie drugim i ten właśnie sposób postępowania przyjęto dla rozwiązania postawionego zadania. Na podstawie informacji geologicznej zbudowano uproszczone modele geologiczne i wykorzystując autorskie oprogramowanie INiG (dr Krystyny Żukowskiej) przedstawiono teoretyczne rekordy pojedyncze oraz pola sumowane, których analiza (zarówno w sensie ciągłości granic odbijających, jak też ich dynamiki) pozwala na przedstawienie propozycji parametrów optymalnego schematu akwizycji.

Prezentacja analizowanego obszaru badań i wykorzystanych materiałów geologicznych oraz geofizycznych

Lokalizację poddanych analizie profili i materiałów otworowych przedstawiono na rysunkach 1a, 1b, 1c oraz 1d. Jest to rejon Pomorza Gdańskiego, gdzie – jak

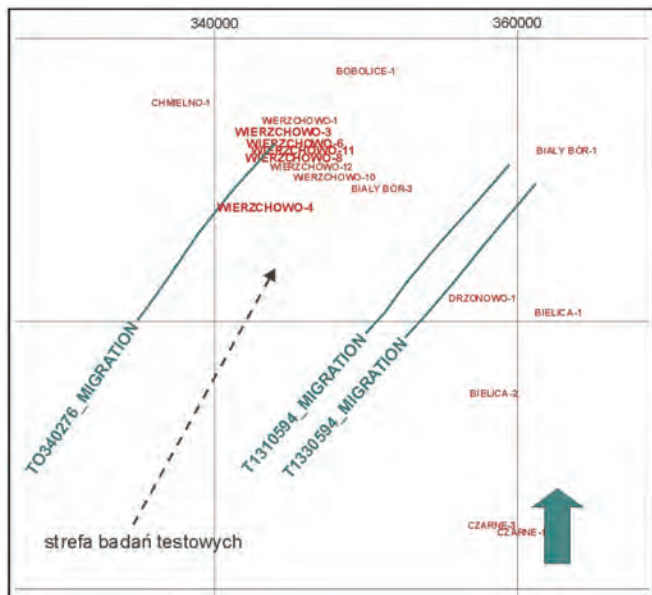
wynika z przytoczonego fragmentu mapy podłoża permu (rysunek 1a) – izobaty horyzontu wynoszą ok. 2800 m i zapadają w kierunku południowym do ponad 3800 m.



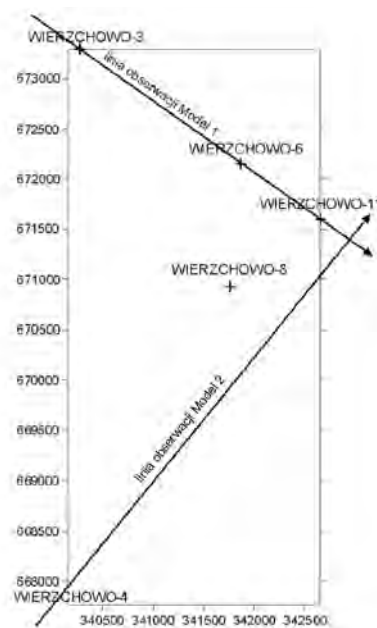
Rys. 1a. Fragment mapy geologiczno-strukturalnej podłoża permu Pomorza Gdańskiego



Rys. 1b. Fragment mapy strukturalnej dewonu, wraz z lokalizacją odwiertów Wierzchowo (skala szarości odzwierciedla głębokość horyzontu dewońskiego)



Rys. 1c. Lokalizacja profili wytypowanych do testowania metodyki odtworzenia sejsmicznej refleksyjności horyzontów podczechsztyńskich na obszarze Pomorza Zachodniego (strefa badań testowych: Drzonowo-Wierzchowo 2D – dane bazowe, bez reprocessingu; Geofizyka Toruń; okres rejestracji połowych: lata 1976-1994)



Rys. 1d. Usytuowanie odwiertów Wierzchowo, wykorzystanych do budowy modeli 1 i 2

Stratygrafię analizowanego obszaru przedstawiono na podstawie otworów Wierzchowo-11 i Wierzchowo-6, usytuowanych w jego centralnej części (tablica 1 i 2).

Na podstawie powyższych informacji stratygraficznych przedstawiono dwa uogólnione modele geologiczne,

zróżnicowane w zakresie geometrii, z zachowaniem stałych prędkości wzdłuż analizowanego kierunku (rysunek 2). Parametry tych modeli przedstawiono w tablicy 3.

Wybrano dwa wzajemnie prostopadłe kierunki obserwacji, określone przez usytuowanie otworów Wierz-

Tablica 1. Stratygrafia w profilu otworu Wierzchowo-11
Longitude 16°36'27"; Latitude 53°53'10"

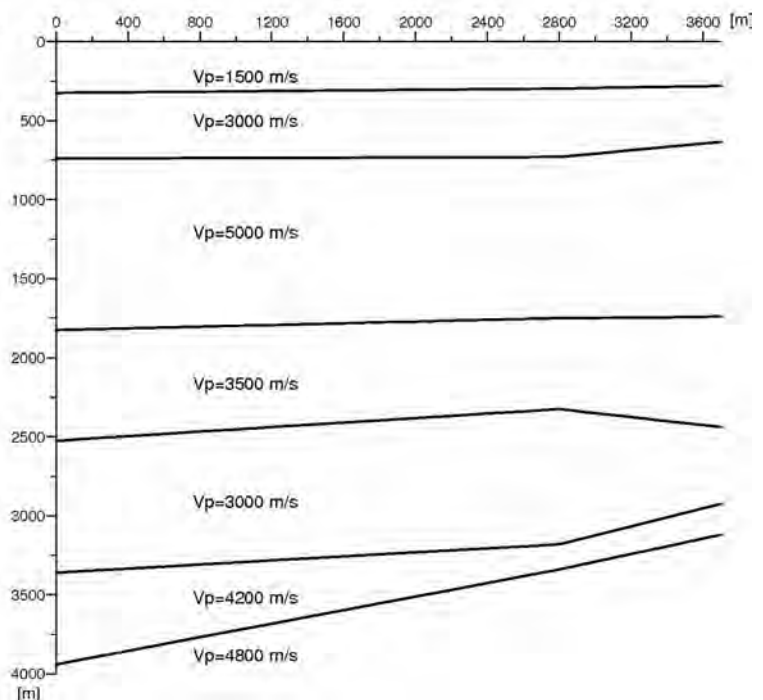
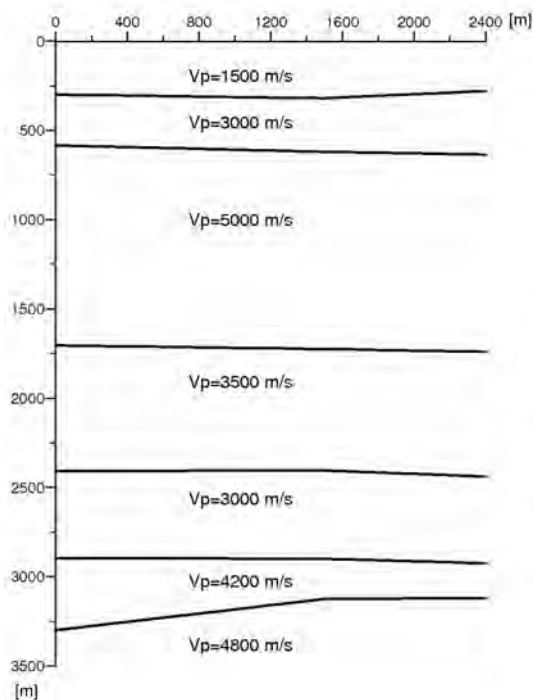
WELL NAME	TOP	BOTTOM	PERIOD	LITHOLOGY
WIERZCHOWO-11	0	165	Q	pi+zw+gl Q
WIERZCHOWO-11	165	288	T	pi+zw+iy w T
WIERZCHOWO-11	288	363,5	mastrycht	ma+wa kreda
WIERZCHOWO-11	363,5	458	turon gorn	ma+wa kreda
WIERZCHOWO-11	458	516	turon dolny	wa kreda
WIERZCHOWO-11	516	561	cenoman	ml kreda
WIERZCHOWO-11	561	636	kreda doln	pc+iy kreda
WIERZCHOWO-11	636	670	bonon	il jura
WIERZCHOWO-11	670	719	kimeryd	il pw ml jura
WIERZCHOWO-11	719	863	oksford	wa wk il jura
WIERZCHOWO-11	863	943	kelowej	il+ml pw w jura
WIERZCHOWO-11	943	1062,5	baton	pc pw il jura
WIERZCHOWO-11	1062,5	1092,5	wezul	il wk pc jura
WIERZCHOWO-11	1092,5	1200,5	lias dzeta	pi pw il jura
WIERZCHOWO-11	1200,5	1286	lias epsilon	il wk pc+Cl jura
WIERZCHOWO-11	1286	1455	lias delta	pc wk Cbr jura
WIERZCHOWO-11	1455	1628	lias gamma	il+pc wk Cl jura
WIERZCHOWO-11	1628	1740	lias beta+a	pc wk Cbr jura
WIERZCHOWO-11	1740	1913,5	retyk	il pw do+ar trias
WIERZCHOWO-11	1913,5	1958	kajper gorr	il wk do+ar trias
WIERZCHOWO-11	1958	2013	kajper gorr	pc+il+do trias
WIERZCHOWO-11	2013	2098	kajper gorr	il pw do trias
WIERZCHOWO-11	2098	2185	kajper doln	il+pc wk dc trias
WIERZCHOWO-11	2185	2311	wapien mu	do pw il trias
WIERZCHOWO-11	2311	2440	ret	pc wk il+m trias
WIERZCHOWO-11	2440	2665	pstry piask ml	wk pc p trias
WIERZCHOWO-11	2665	2810	pstry piask il	pw do wk trias
WIERZCHOWO-11	2810	2837,5	pstry piask pc	wk il+ar trias
WIERZCHOWO-11	2837,5	2930,5	pstry piask il	wk an trias
WIERZCHOWO-11	2930,5	3116	C. Werra-a	an cechsztyln
WIERZCHOWO-11	3116	3121,5	C. Werra-w	wa cechsztyln
WIERZCHOWO-11	3121,5	3123	C. Werra-lu	lu cechsztyln
WIERZCHOWO-11	3123	3218	karbon dol	wa+do pw karbon

Tablica 2. Stratygrafia w profilu otworu Wierzchowo-6
Longitude 16°35'35"; Latitude 53°53'00"

WELL NAME	TOP	BOTTOM	PERIOD	LITHOLOGY	
WIERZCHOWO-6	0	148	Q	zw+gl	Q
WIERZCHOWO-6	148	291	T	Cbr+mk	T
WIERZCHOWO-6	291	408,5	mastrycht	ma+wa	kreda
WIERZCHOWO-6	408,5	461	turon	ml	kreda
WIERZCHOWO-6	461	507	cenoman	ml+wa (sp)	kreda
WIERZCHOWO-6	507	523,5	alb srodko	pc wk il	kreda
WIERZCHOWO-6	523,5	547,5	hoteryw go	il pw pc	kreda
WIERZCHOWO-6	547,5	567,5	hoteryw go	pc pw ml	kreda
WIERZCHOWO-6	567,5	580	hoteryw do	il pw ml+pc	kreda
WIERZCHOWO-6	580	620	bonon	wa wk il; ma+il	jura
WIERZCHOWO-6	620	669	kimeryd	ml wk wa	jura
WIERZCHOWO-6	669	815	oksford	wa+pc+ml	jura
WIERZCHOWO-6	815	895	kelowej	ml+pc+wa	jura
WIERZCHOWO-6	895	972,5	baton	ml+pc+il	jura
WIERZCHOWO-6	972,5	1152,5	lias dzeta	ml pw il+mk+pi	jura
WIERZCHOWO-6	1152,5	1263,5	lias epsilon	il wk pc	jura
WIERZCHOWO-6	1263,5	1411	lias delta	pc	jura
WIERZCHOWO-6	1411	1602	lias gamma	pc pw sy wk Cbr; il	jura
WIERZCHOWO-6	1602	1732	lias beta+a	pc+il	jura
WIERZCHOWO-6	1732	1912,5	retyk	il	trias
WIERZCHOWO-6	1912,5	1977,5	kajper gorr	ml+il wk pc	trias
WIERZCHOWO-6	1977,5	2020	kajper gorr	pc	trias
WIERZCHOWO-6	2020	2092,5	kajper gorr	il wk do+an	trias
WIERZCHOWO-6	2092,5	2194	kajper doln	il+ml wk pc+wa	trias
WIERZCHOWO-6	2194	2310	wapien mu	il+wa	trias
WIERZCHOWO-6	2310	2405	ret	il wk pc; ml wk an	trias
WIERZCHOWO-6	2405	2616	pstry piask pc	wk il	trias
WIERZCHOWO-6	2616	2897	pstry piask il	wk pc+an+wa	trias
WIERZCHOWO-6	2897	3144	C. Werra-a	an	cechsztyln
WIERZCHOWO-6	3144	3221	karbon dol	wa+do+il+pc	karbon

Legenda do tablic

- | | | |
|----------------------|-----------------------|-------------------|
| (sp) – w spagu | iy – iły | pi – piaski |
| (str) – w stropie | kr – kreda piaszcząca | pw – przelawicane |
| an – anhydryt | lu – łupki | sl – sole |
| Cb – węgiel brunatny | ma – margle | sy – syderyt |
| do – dolomity | mk – mulki | to – torfy |
| gi – gipsy | mu ew. ml – mulowce | wa – wapienie |
| gl – gliny | pc – piaskowce | wk – wkładki |
| il – ilowce | | zw – zwiry |



Rys. 2. Uogólnione modele geologiczne – rejon Wierzchowo

Tablica 3. Parametry sejsmo-geologiczne ośrodka (V [m/s], h [m]) przyjęte do modelowania sejsmicznego, dla optymalnego wyboru parametrów akwizycji

MODEL 1

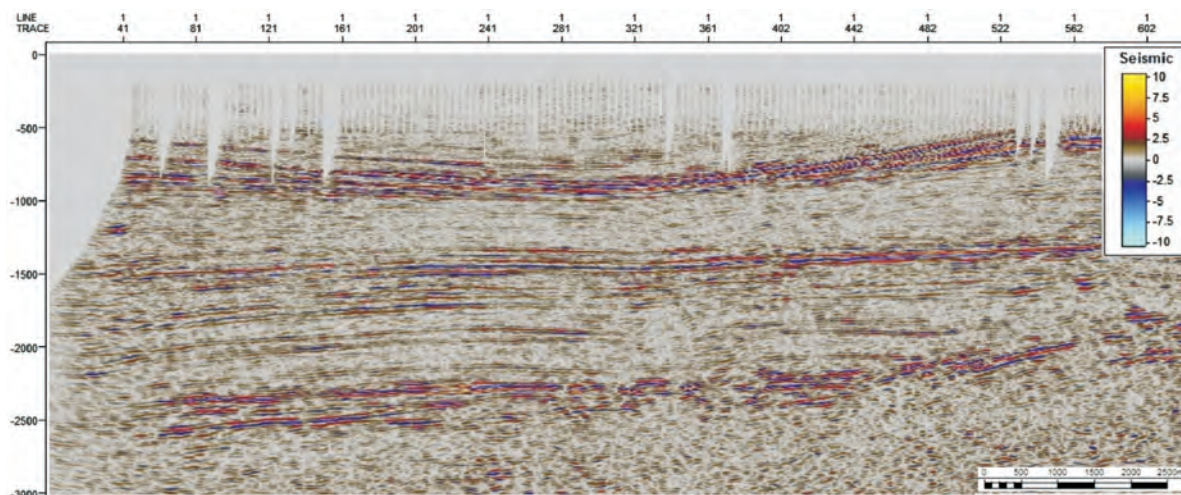
NAZWA ODWIERTU								
Wierzchowo-3			Wierzchowo-6			Wierzchowo-11		
Kolejna warstwa	Prędkość [m/s]	Spąg [m]	Kolejna warstwa	Prędkość [m/s]	Spąg [m]	Kolejna warstwa	Prędkość [m/s]	Spąg [m]
I	1500	300	I	1500	320	I	1500	280
II	3000	585	II	3000	620	II	3000	635
III	5000	1705	III	5000	1725	III	5000	1740
IV	3500	2408	IV	3500	2405	IV	3500	2440
V	3000	2895	V	3000	2900	V	3000	2925
VI	4200	3300	VI	4200	3125	VI	4200	3120

MODEL 2

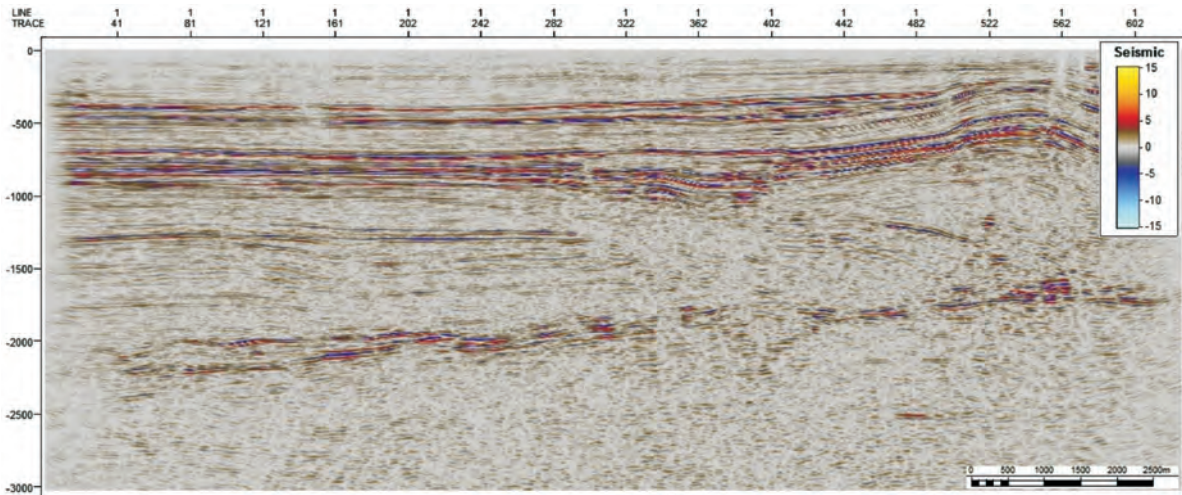
NAZWA ODWIERTU								
Wierzchowo-4			Wierzchowo-8			Wierzchowo-11		
Kolejna warstwa	Prędkość [m/s]	Spąg [m]	Kolejna warstwa	Prędkość [m/s]	Spąg [m]	Kolejna warstwa	Prędkość [m/s]	Spąg [m]
I	1500	325	I	1500	298	I	1500	280
II	3000	740	II	3000	730	II	3000	635
III	5000	1825	III	5000	1750	III	5000	1740
IV	3500	2525	IV	3500	2325	IV	3500	2440
V	3000	3360	V	3000	3180	V	3000	2925
VI	4200	3940	VI	4200	3340	VI	4200	3120

Przyporządkowanie kolejnych warstw obydwu modeli jest następujące:

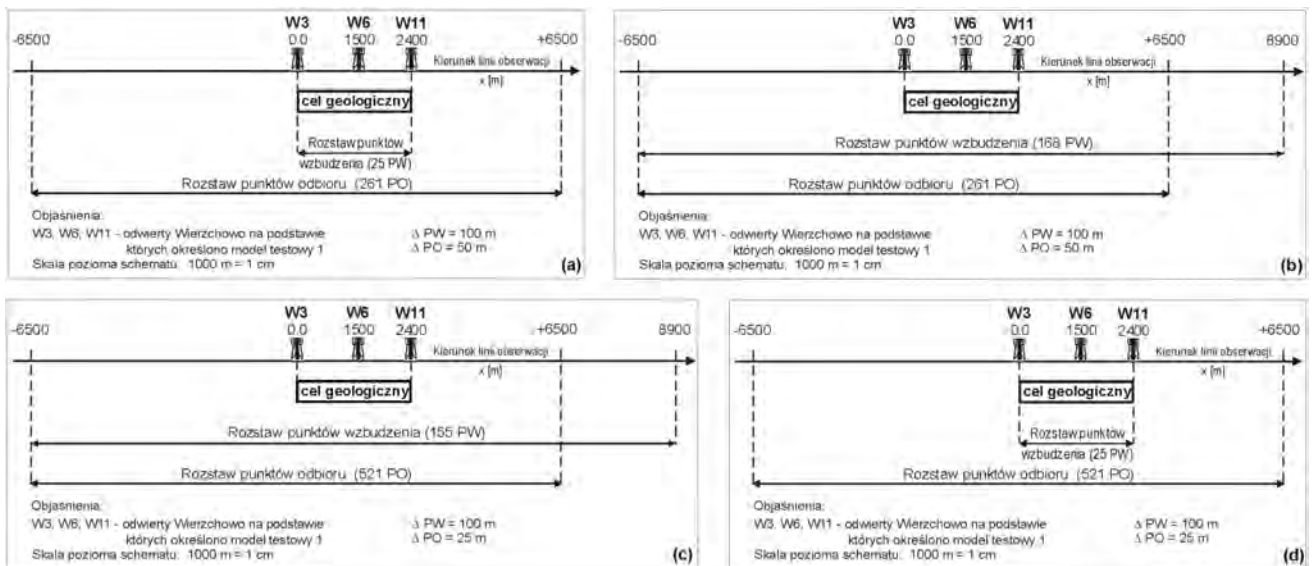
- warstwa I – utwory czwarto- i trzeciorzędu,
- warstwa II – utwory kredy,
- warstwa III – utwory jurajskie,
- warstwa IV – utwory triasu,
- warstwa V – utwory cechsztyńskie,
- warstwa VI – utwory podcechsztyńskie.



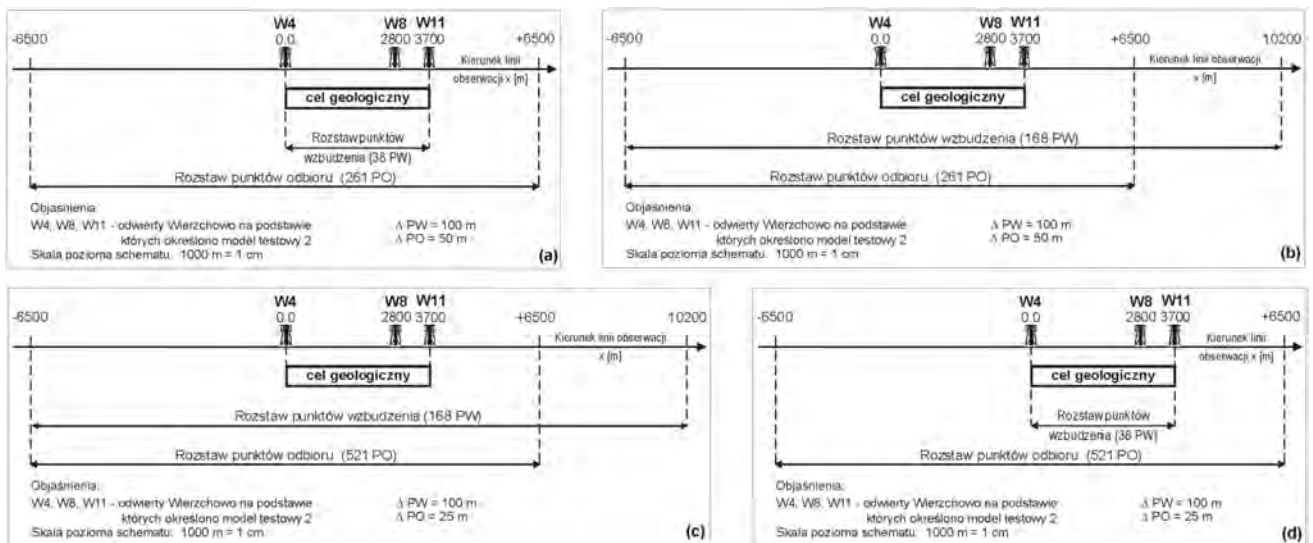
Rys. 3. Profil sejsmiczny T1340276, rejon Drzonowo-Wierzchowo. MIGRATION



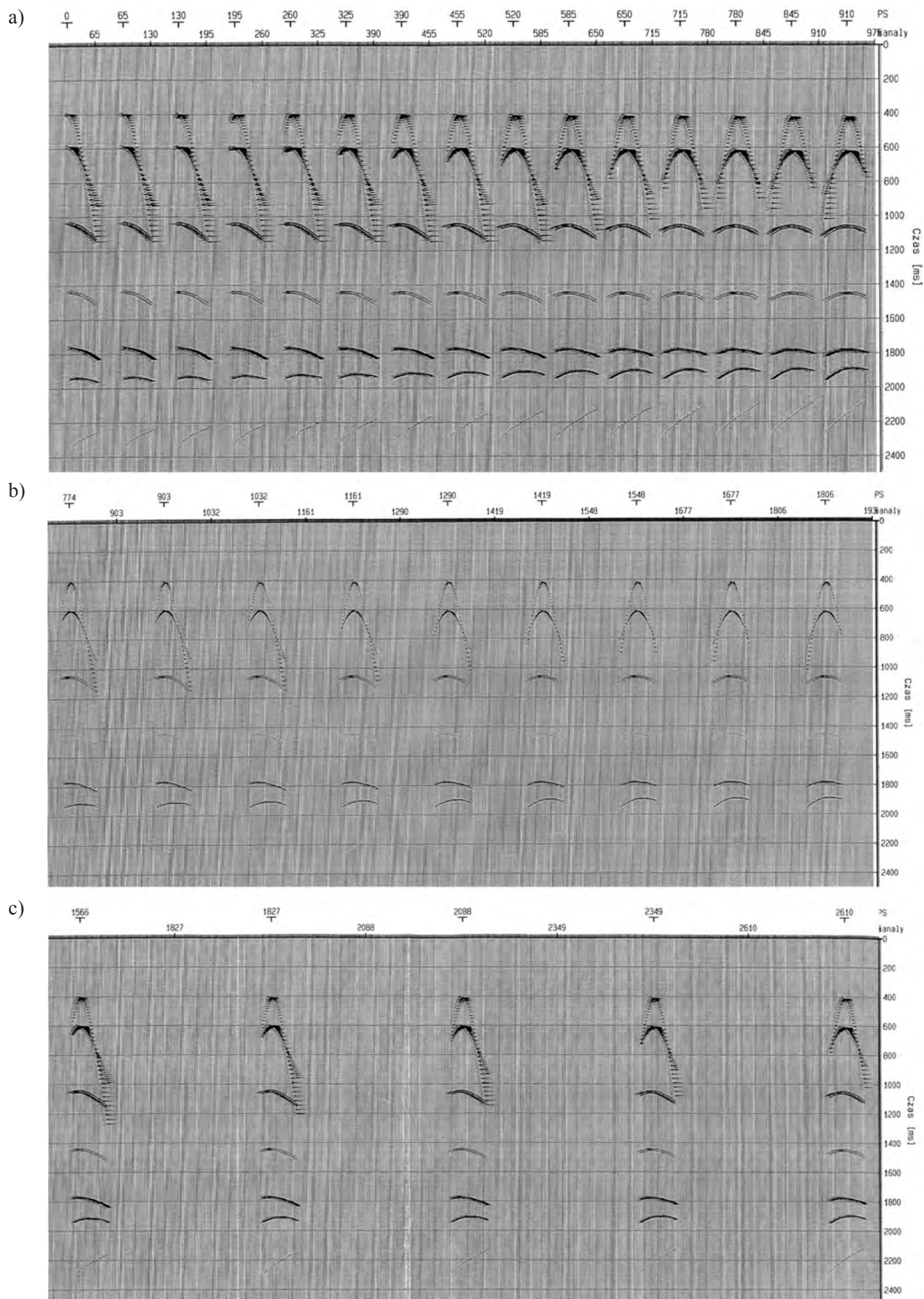
Rys. 4. Profil sejsmiczny T1310594, rejon Drzonowo-Wierzcho. MIGRATION



Rys. 5. Szkic pierwszego (a), drugiego (b), trzeciego (c) i czwartego (d) schematu obserwacji, testowanego drogą modelowania na modelu 1 (rysunek 2)



Rys. 6. Szkic pierwszego (a), drugiego (b), trzeciego (c) i czwartego (d) schematu obserwacji, testowanego drogą modelowania na modelu 2 (rysunek 2)



Rys. 7. Rekordy pojedyncze, teoretyczne, obliczone dla modelu 1 według trzech różnych schematów obserwacji – offseety: a) 1600 m, b) 3200 m, c) 6500 m

chowo-3, Wierzchowo-6 i Wierzchowo-11 (model 1) oraz Wierzchowo-4, Wierzchowo-8 i Wierzchowo-11 (model 2).

Analizowane materiały sejsmiczne (zarejestrowane jeszcze w wersji 2D) przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Są to profile: T0340276 (wersja po migracji czasowej) oraz T0310594 (również po migracji czasowej). Zależnie od usytuowania, z reguły spąg cechsztynu rejestruje się tutaj na czasach rzędu 1700÷2200 ms. Według danych Spółki Geofizyka Toruń, w omawianym okresie najczęściej stosowanym źródłem wzbudzenia był dynamit. Pole falowe rejestrowane było z zastosowaniem rozstawów skrajnych i centralnych, w zakresie offsetów od 200 m (minimalne) do 3200 m (maksymalne).

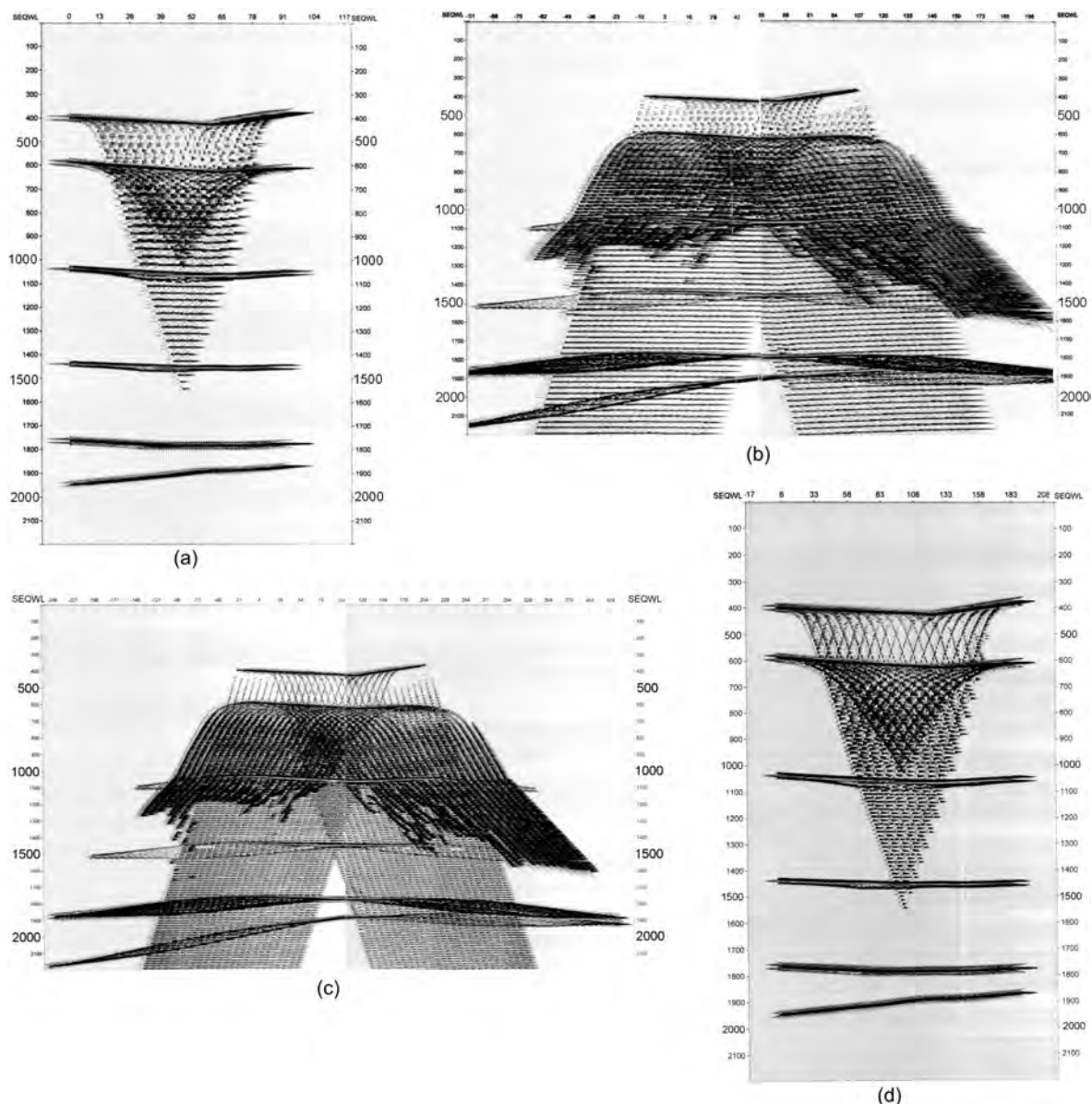
Oceniając jedynie jakościowo parametry modelu, w kontekście parametrów akwizycji, na prezentowanych

sekcjach nie należy oczekiwać rejestracji horyzontów podcechsztyńskich – co potwierdza uzyskany obraz falowy.

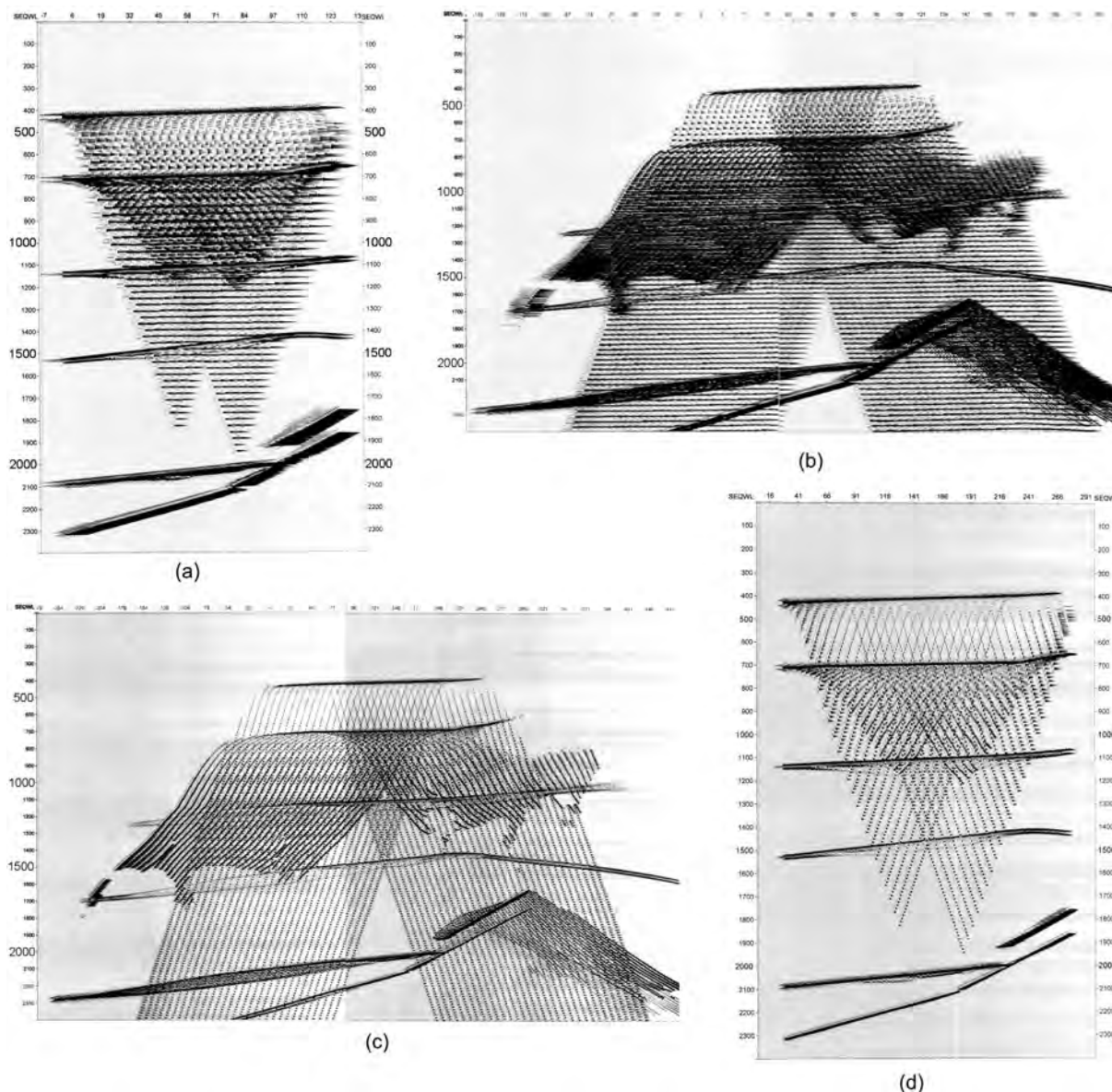
Zdefiniowanie schematów obserwacji, które umożliwiłyby rejestrację granic geologicznych poniżej spągu cechsztynu (a więc dla głębokości rzędu 3000 m i więcej) przeprowadzono wstępnie na prostych obliczeniach podwójnego czasu rejestracji, odniesionego do wielkości celu geologicznego. Dla obydwóch modeli przedstawiono cztery różne schematy obserwacji, przedstawione na rysunkach 5 i 6.

Dla zaprezentowanych modeli i schematów obserwacji wymodelowano ciągi rekordów pojedynczych, których fragmenty przedstawiono na rysunku 7.

Rekordy pojedyncze, podobnie jak jest to wykonywane podczas realnych prac polowych, zostały poddane sumowaniu. Wyniki tej operacji przedstawiono na rysunkach 8a, 8b, 8c, 8d oraz 9a, 9b, 9c, 9d.



Rys. 8. Sekcje modelowane. Model 1 – rozstaw 1 (a), rozstaw 2 (b), rozstaw 3 (c) i rozstaw 4 (d)



Rys. 9. Sekcje modelowane. Model 2 – rozstaw 1 (a), rozstaw 2 (b), rozstaw 3 (c) i rozstaw 4 (d)

Weryfikacja zaproponowanej metodyki określenia schematu akwizycji

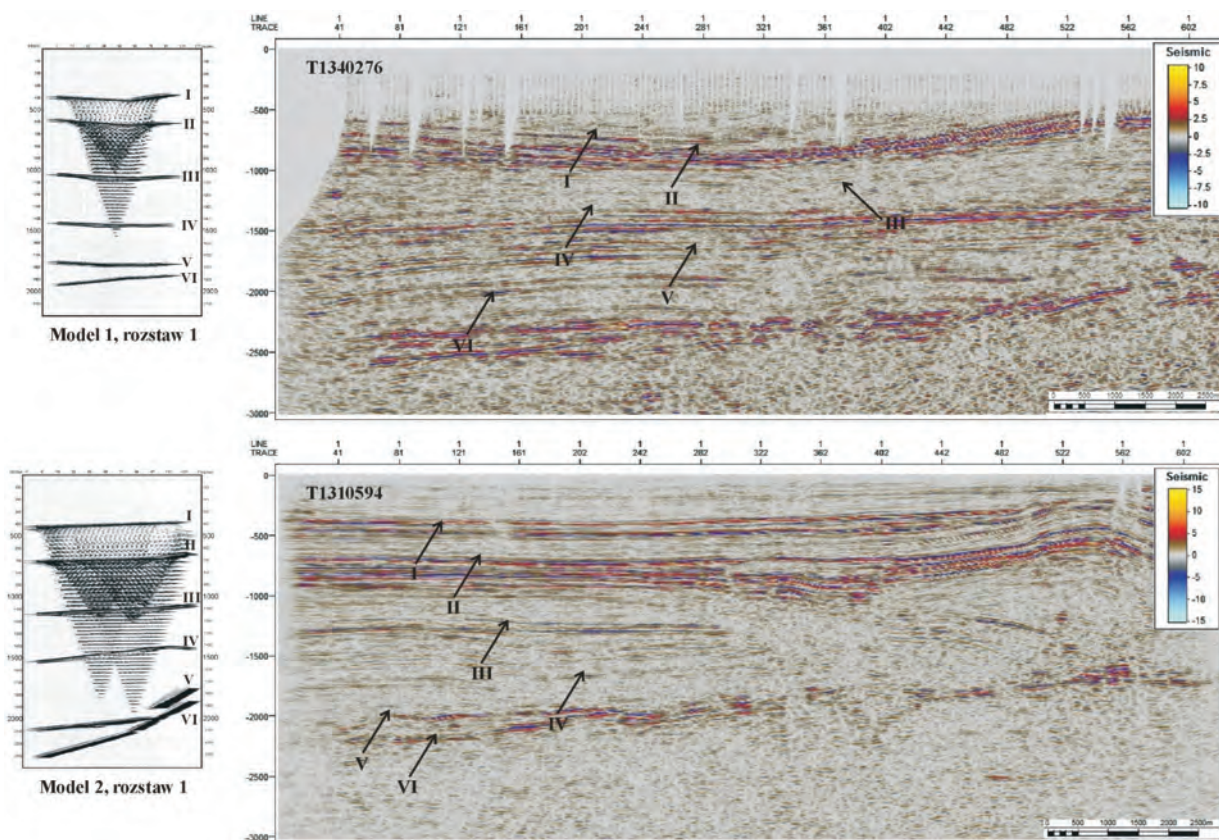
Podstawowym elementem weryfikacji metodyki jest dostateczna zgodność rzeczywistego obrazu falowego (zarejestrowanego już wcześniej na obszarze badań) z obrazem falowym teoretycznym. Stanowi to potwierdzenie wstępnej znajomości występujących zagadnień geologicznych – co jest istotne, bowiem schemat akwizycji musi być dostosowany do celu geologicznego.

Dokonane na podstawie informacji o stratygrafii w otworach Wierzchowo (tablica 3) przyporządkowanie kolejnych warstw obydwu modeli jest następujące:

- warstwa I – utwory czwarto- i trzeciorzędu,
- warstwa II – utwory kredy,
- warstwa III – utwory jurajskie,
- warstwa IV – utwory triasu,
- warstwa V – utwory cechsztyńskie,
- warstwa VI – utwory podcechsztyńskie.

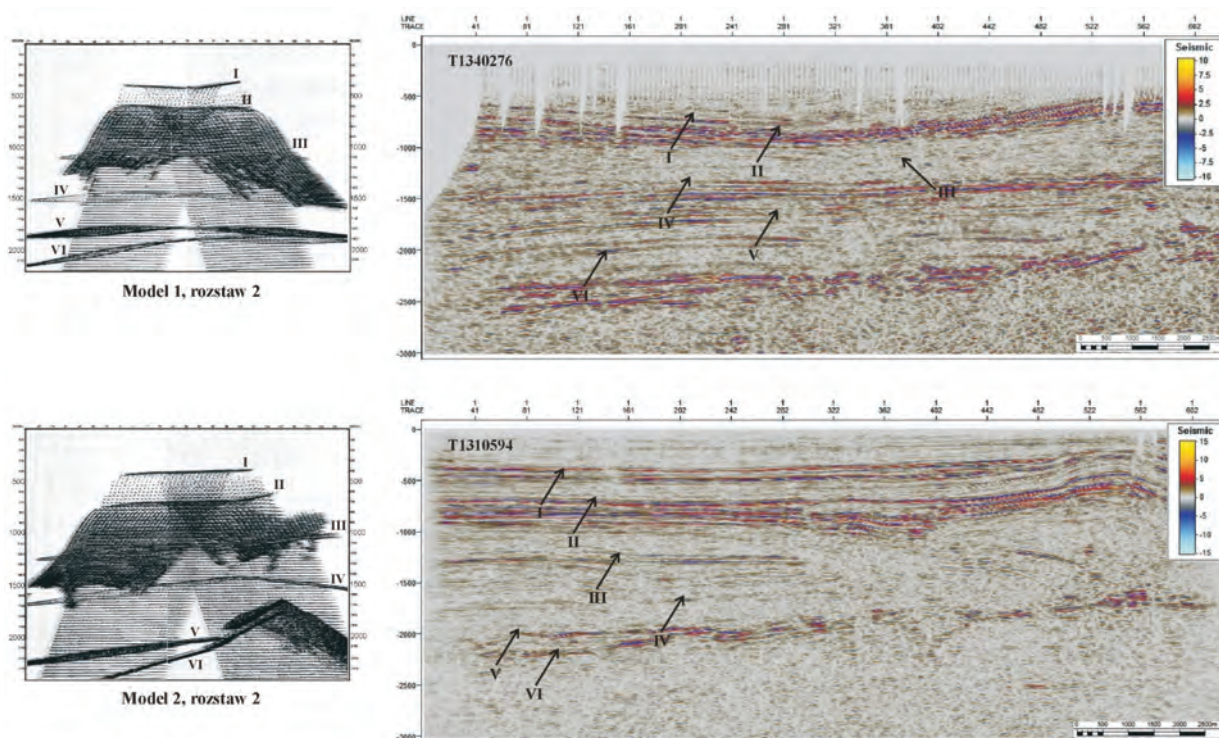
Podstawowe granice, przedstawione w tablicy 3, a także na modelach 1 i 2 (rysunek 2), na sekcjach teoretycznych pojawiają się na czasach rzędu około: 500, 700, 1100, 1500, 1850 oraz 2000 milisekund (dość podobnie dla obydwóch modeli) i występują też na zbliżonych czasach na sekcjach rzeczywistych T1340276 oraz T1310594 (rysunek 3 i 4). Jak wynika z przytoczonych porównań (rysunki 22 i 23), parametry modeli (V , h – prędkość oraz głębokość spągu danej warstwy) zostały określone na tyle trafnie, że pozwalają na poprawny dobór schematu akwizycji.

Należy przypomnieć, iż przedstawione analizy prowadzono pod kątem określenia schematu akwizycji dla



Rys. 10. Porównanie teoretycznego pola falowego z sekcją rzeczywistą – profile T1340276 i T1310594, Model 1 (W-3, W-6, W-11) oraz Model 2 (W-4, W-8, W-11) – rozstaw 1

I-VI → numeracja przyjętych do modelowania warstw geologicznych, odpowiadających charakterystyce stratygraficznej obszaru badań



Rys. 11. Porównanie teoretycznego pola falowego z sekcją rzeczywistą – profile T1340276 i T1310594, Model 1 (W-3, W-6, W-11) oraz Model 2 (W-4, W-8, W-11) – rozstaw 2

I-VI → numeracja przyjętych do modelowania warstw geologicznych, odpowiadających charakterystyce stratygraficznej obszaru badań

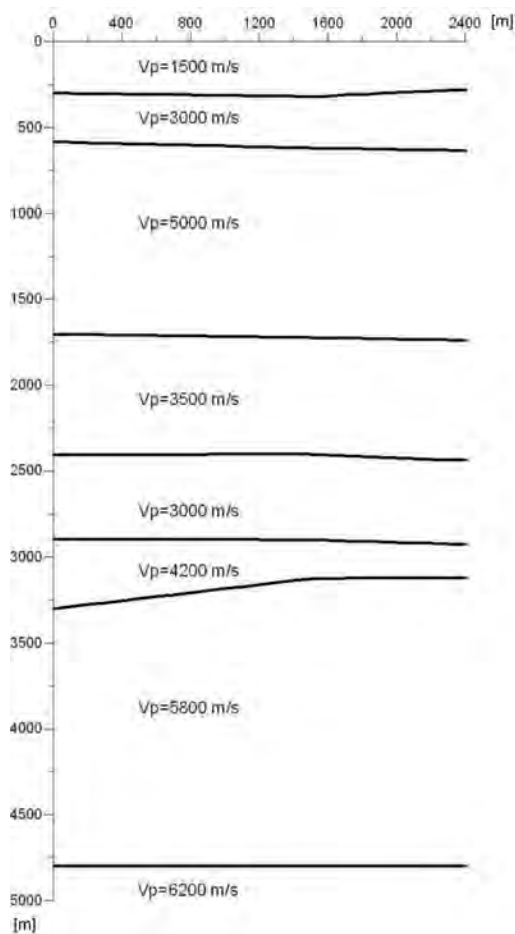
granic podcechsztyńskich (karbon, dewon), zalegających w rejonie badań na głębokościach poniżej 3000 m. Analizując równocześnie geometrię schematu obserwacji oraz obraz pola falowego w wersji sumowanej – po aplikacji korekcji NMO, łatwo zauważyć, jak silnie uzależnione jest „oświetlenie” horyzontów (a więc pośrednio jego dynamika) – nawet bez uwzględnienia relacji współczynnika odbicia i kąta padania – od wzajemnego usytuowania badanego obiektu oraz rozstawu punktów wzbudzenia. Krótka linia punktów wzbudzenia skutkuje pogarszającą się (wraz z głębokością) iluminacją horyzontów (schemat 1 i 4). Efekt ten jest dobrze widoczny na obydwu modelach (rysunki 8a, 8d i 9a, 9d).

W świetle powyższych danych należałoby negatywnie ocenić powszechne zaniedbywanie faktów, wynikające z niepoprawnie przyjętych parametrów schematu akwizycji – szczególnie podczas prowadzenia prac interpretacyjnych. I choć sejsmicy (a często również i geolodzy) są świadomi przyczyn oraz zjawisk wpływających na obraz falowy, wynikających ze schematu obserwacji, niezmiernie rzadko przyczyny te są rozważane jako wyniki błędnej interpre-

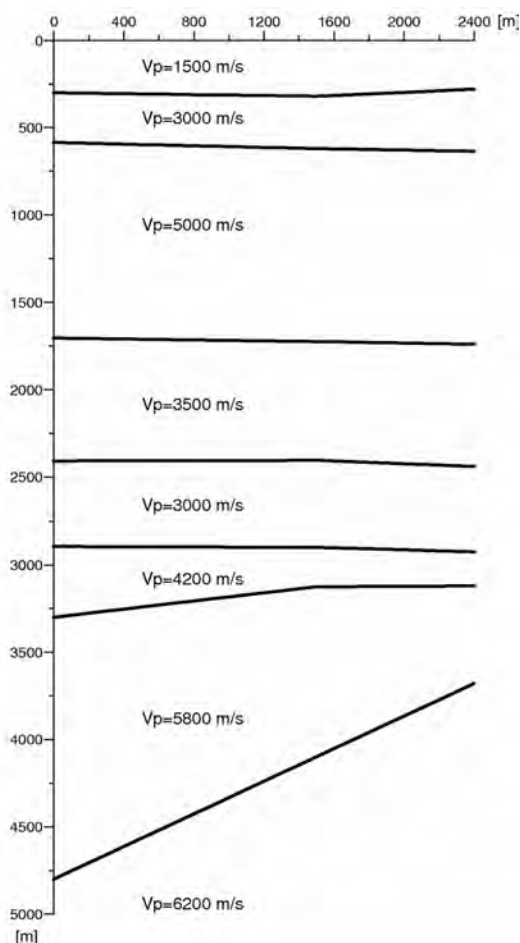
tacji sekcji sejsmicznych, w efekcie skutkując błędnymi wnioskami geologicznymi.

Warto zwrócić uwagę, jak dużo pozornie oczywistych faktów kształtuje obraz sumy i jak bardzo niejednorodna może być interpretacja, jeżeli w określonym projekcie mamy różne typy źródeł wzbudzenia, a więc różną zawartość częstotliwości. Zdarza się, że zanikanie śledzenia horyzontów jest interpretowane jako zmiana właściwości fizycznych ośrodka (np. zmienność litofacjalna), podczas gdy w rzeczywistości jest to wynik rozdzielczości poziomej obrazu falowego, wywołany np. schematem obserwacji lub zmianą odległości pomiędzy punktami odbioru (np. modelowe odwzorowanie ciągłego horyzontu czwartego na czasie ~1450 ms, uzyskane w rejestracji według schematu drugiego i trzeciego – rysunki 8b, 8c i 9b, 9c).

Mając na uwadze głównie ukazanie skutków procedury sumowania dla krótkich rozstawów – zbyt krótkich w odniesieniu do głębokości pograżenia celu geologicznego – przedstawione wcześniej modele 1 i 2 (rysunek 2) rozbudowano, dodając kolejną, głęboko zalegającą, siódmą granicę, w wersji poziomej i nachylonej (rysunki 12 i 13).



Rys. 12. Model testowy 2, uzupełniony poziomą, głęboko zalegającą granicą ($h = 4600$ m)

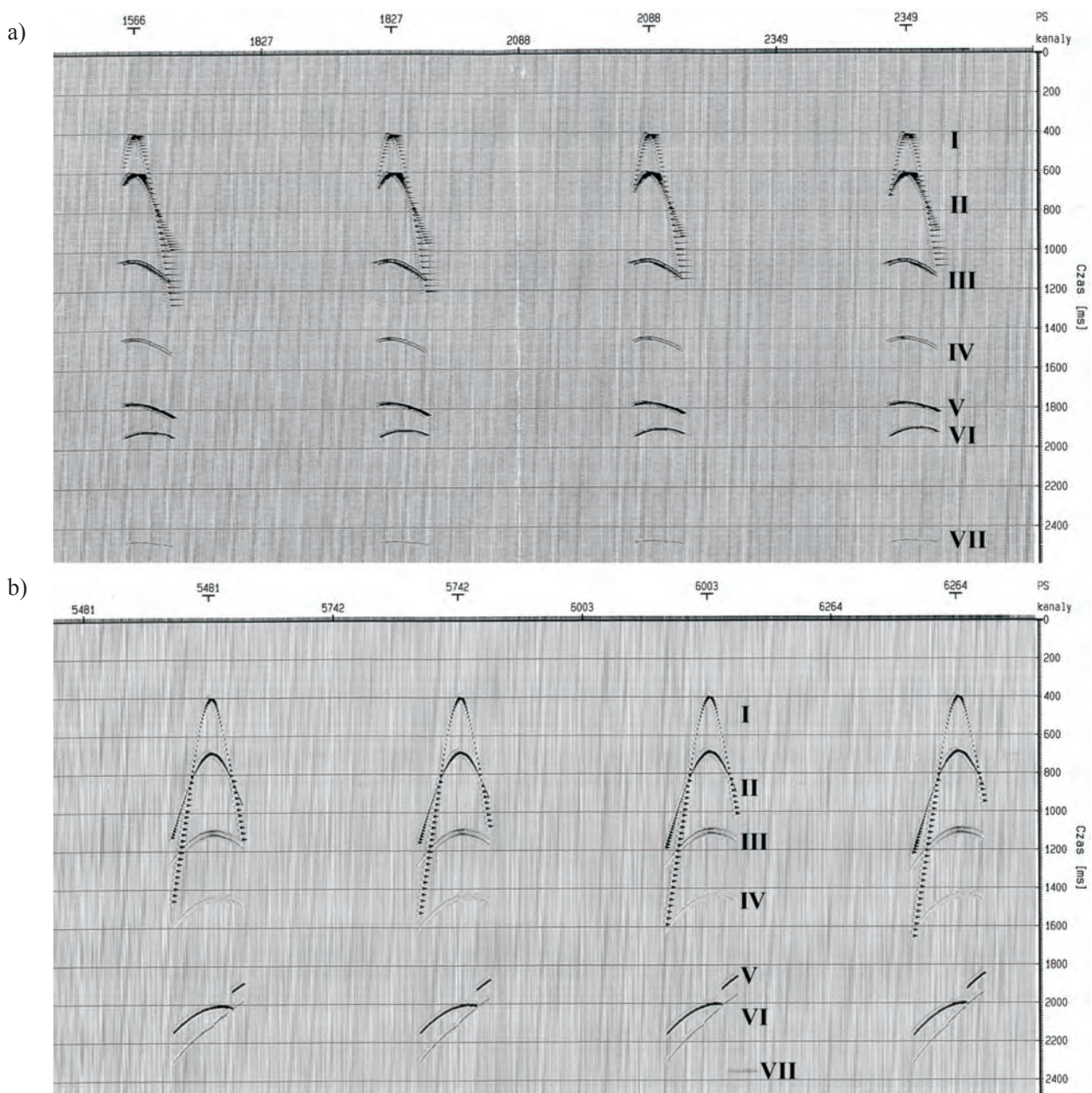


Rys. 13. Model testowy 2, uzupełniony nachyloną ($\varphi = 25^\circ$), głęboko zalegającą granicą

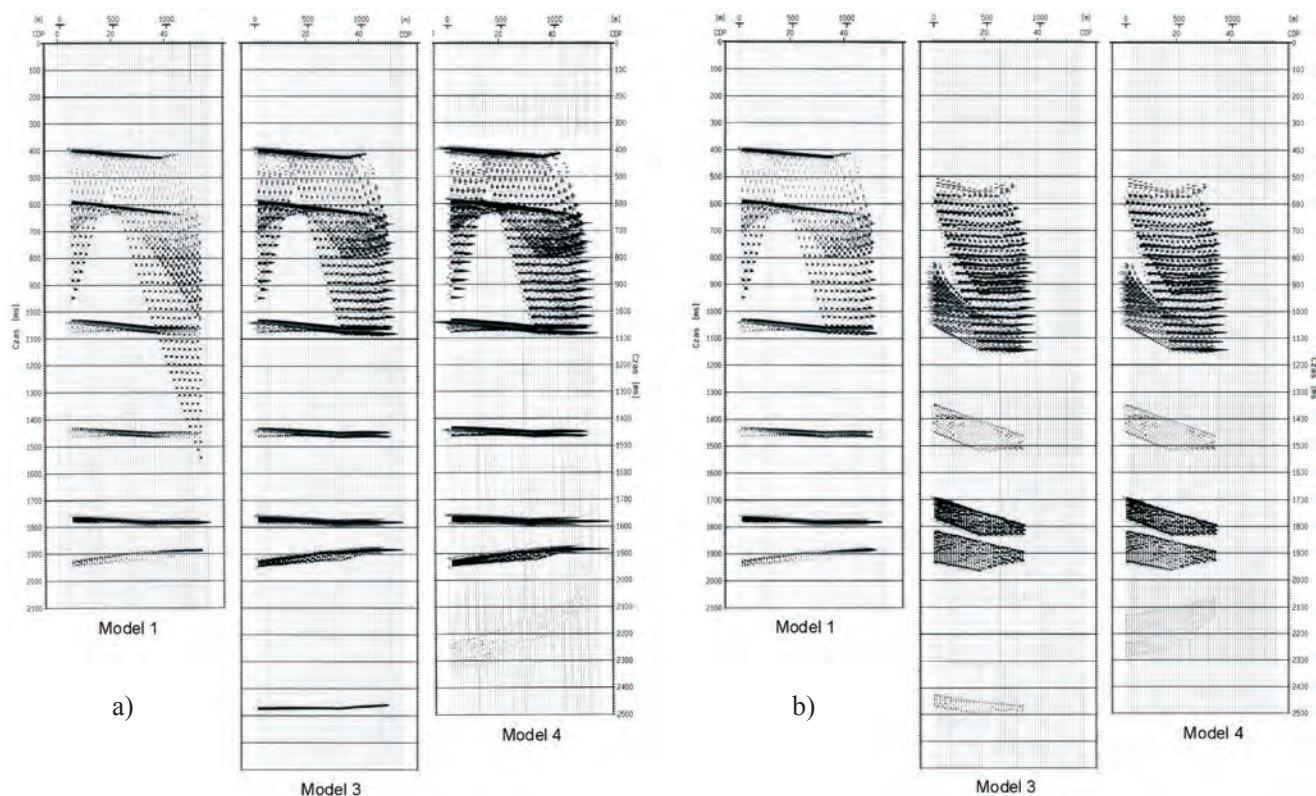
Wyniki obliczeń dla tych modeli przedstawiono na rysunkach 14a oraz 14b, w postaci rekordów pojedynczych dla modelu 4, dla wybranego, stałego schematu (6500 m). Analiza hodografów pojedynczych (rysunki 7 i 14) może być przydatna dla użytkownika, który chce opracować schemat obserwacji połowych. Kształt gałęzi hodografów, uzależniony od położenia punktów wzbudzenia i odbiorników na linii obserwacji, decyduje o skuteczności wprowadzenia korekcji dynamicznej oraz poprawności sekcji sejsmicznej sumowanej.

Najwłaściwszym podsumowaniem obliczeń modelowych są zestawienia przedstawione na rysunkach 15-18. Na ry-

sunkach 15a i 15b obserwujemy zróżnicowanie możliwości zarejestrowania granic w zależności od geometrii i głębokości zalegania modelu, dla sytuacji, gdy zachowujemy stały schemat i parametry akwizycji (offset 3200 m i 1600 m). Możemy sobie wyobrazić, że sytuację odzwierciedlaną przez modele 1, 3 i 4 spotykamy w terenie. Brak wyników obserwowany dla granicy nachylonej nie oznacza, że jej nie ma; po prostu określony schemat sumowania nie umożliwia sumowania koherentnego. Jeszcze dobitniej zjawisko to manifestuje się dla krótkich (a właściwie zbyt krótkich) offsetów – rysunek 15b – tu wyraźna granica rozdziela się na obraz wielofazowy, co jest efektem pozornym.

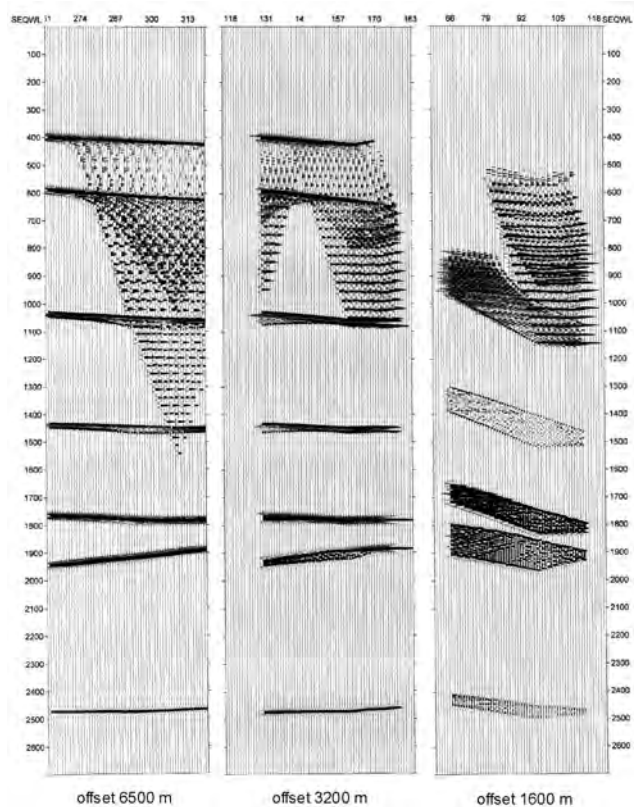


Rys. 14. Przykład rekordów pojedynczych, teoretycznych, obliczonych dla dwóch różnych modeli ośrodka Model 3 (a) i model 4 (b) według stałego schematu obserwacji (offset 6500 m)



Rys. 15. Analiza możliwości odtworzenia zmiennego ośrodka geologicznego z zastosowaniem identycznego schematu obserwacji

1 schemat obserwacji: a) offset 3200 m, b) offset 1600 m



Rys. 16. Porównanie wyników odtworzenia granic modelu 1 (1 schemat obserwacji, offsety: 1600 m oraz 3200 m)

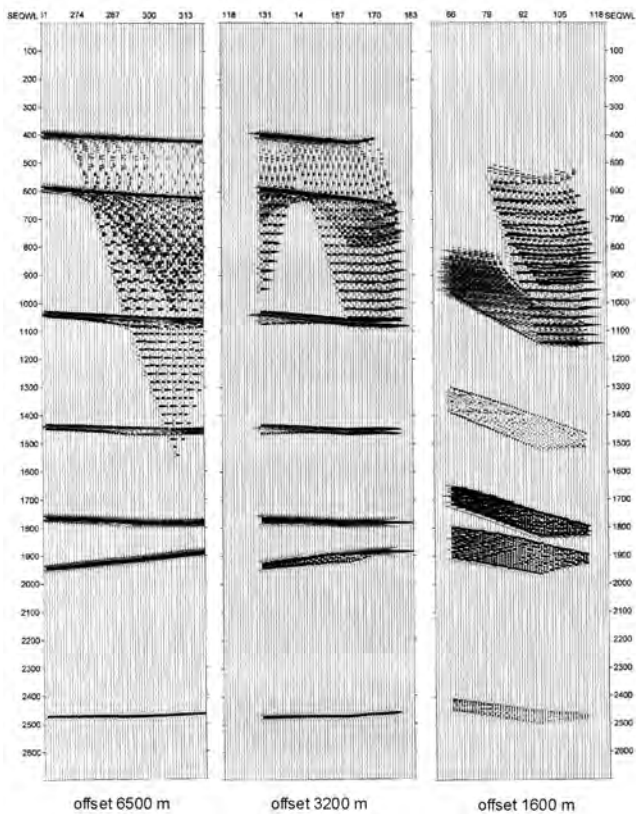
Głębokość ostatniej granicy: 3200 m

Na rysunkach 16, 17 i 18 analizujemy efekt zmiany offsetu (a więc jednego z parametrów akwizycji) na możliwość odtworzenia danego modelu. Dla modelu 1 (rysunek 16) nawet zastosowanie offsetu bardzo krótkiego zasadniczo nie ogranicza możliwości zarejestrowania odbić do stropu cechsztynu. Włączenie do modelu granic głębokich (rysunki 17 i 18) wyraźnie degraduje pole falowe zarejestrowane krótkimi offsetami (szczególnie dla granic nachylonych).

W przypadku krótkiego offsetu zwraca uwagę brak koherencji sumowania, co może sugerować obecność pakietu warstw cienkich.

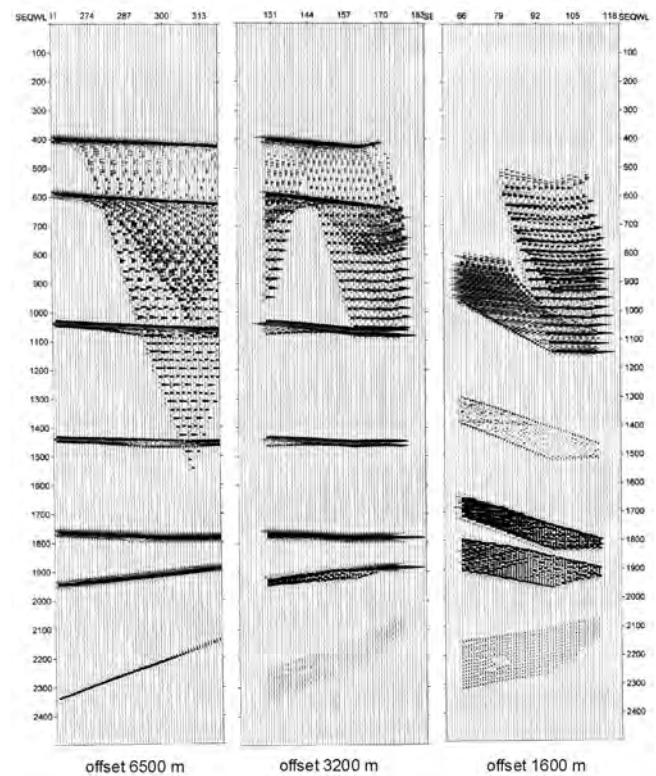
Przeanalizowanie geometrii sekcji sumowanych i porównanie ich z rekordami pojedynczymi, w aspekcie zastosowanego offsetu maksymalnego, potwierdza kluczową rolę doboru parametrów akwizycji (również odnośnie koncepcji pokryć wielokrotnych), wyrażoną poprzez specyfikę procedury sumowania – szczególnie w przypadku krótkich offsetów.

Jakkolwiek przedstawione zagadnienia znane są już od dawna, z praktyki przemysłowej wynika, że są one zdecydowanie zbyt słabo doceniane. Wydaje się, iż podejmowanie prac projektowych dla sejsmiki 2D oraz 3D – szczególnie w przypadku ośrodka o skomplikowanej budowie geologicznej – zdecydowanie należy poprzedzić



Rys. 17. Porównanie wyników odtworzenia granic modelu 3 (1 schemat obserwacji, offsety: 6500 m, 3200 m oraz 1600 m)
Głębokość ostatniej granicy: 4600 m

modelowaniem sejsmicznym. Zdarza się bowiem, że refleks dynamicznie wyraźny na rekordzie połowym zanika na sumie – stąd wniosek, że nie jest to efekt tłumienia energii wraz z głębokością lecz wynik destrukcyjnej interferencji



Rys. 18. Porównanie wyników odtworzenia granic modelu 4 (1 schemat obserwacji, offsety: 6500 m, 3200 m oraz 1600 m)
Głębokość ostatniej granicy: 4600 m, kąt upadu 25°, wynurzenie w kierunku linii obserwacji

podczas sumowania. Np. na rysunku 13 szczególnie silnie obserwuje się taki efekt dla granicy nachylonej, gdzie prawa optyki geometrycznej „wybijają” refleks poza strefę śledzenia (stąd rola offsetu).

Zakończenie

Przedstawiona problematyka nabiera jeszcze większej wagi, gdy celem geologicznym prospekcji są formacje „trudne” – o małej miąższości, słabo zróżnicowanych parametrach fizycznych oraz zmiennej litologii i budowie facjalnej, gdzie szczegółowość rozpoznania obrazu

falowego może mieć (poprzez interpretację geologiczną) decydujące znaczenie dla strategii eksploatacji ważnych obiektów złożowych.

W epoce boomu gazu z łupków warto o tym przypomnieć.

Artykuł nadesłano do Redakcji 2.06.2011 r. Przyjęto do druku 6.09.2011 r.

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Autorka dziękuje pani Krystynie Żukowskiej za wykonanie obliczeń modelowych oraz pani Irenie Irlík za staranną prezentację graficzną.

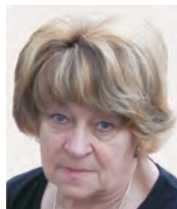
Literatura

- [1] Bacon M., Simm R., Redshaw T.: *3-D Seismic Interpretation*. Cambridge University Press, 2003.
- [2] Doyen P.M.: *Seismic Reservoir Characterization. An Earth Modelling Perspective*. EAGE Publications, 2007.
- [3] Hilterman F.J.: *Seismic Amplitude Interpretation*. SEG and EAGE, Distinguished Instructor Series, No 4, 2001.
- [4] Jędrzejowska-Tyczkowska H.: *Możliwość występowania złóż (węglowodorów) w utworach górnego paleozoiku (karbon,*

dewon) na Pomorzu Zachodnim. Zadanie 1 pt.: Weryfikacja metodyki pomiaru i przetwarzania danych sejsmicznych oraz reinterpretacja dotychczas istniejących materiałów w celu określenia możliwości śledzenia horyzontów podcechsztyńskich o dostatecznej ciągłości i dynamicznej wyrazistości. Dokumentacja archiwalna INiG, 2010.

- [5] Lines L.R., Newrick R.T.: *Fundamentals is Geophysical Interpretation*. Society of Exploration Geophysicists (SEG). Geophysical Monograph Series, No 13, 2004.
- [6] Meunier J.: *Seismic acquisition from yesterday to tomorrow*. 73rd EAGE Conference & Exhibition, Vienna, DISC, 2011.
- [7] Sen M.K.: *Seismic Inversion*. Society of Petroleum Engineers Publications, 2006.

- [8] Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A.: *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 1976.



Prof. dr hab. inż. Halina JĘDRZEJOWSKA-TYCZKOWSKA – w latach 1971-1976 stypendysta UNESCO oraz British Council (Wielka Brytania, Uniwersytet Cambridge). Profesor w Instytucie Nauk o Ziemi Uniwersytetu U. Boumediena w Algierze (1984-1992). Kierownik Zakładu Geofizyki i Sejsmiki INiG (1995-2007). Od 2009 r. profesor w Zakładzie Geologii INiG.

ZAKŁAD GEOLOGII I GEOCHEMII

- analiza systemów naftowych (badania skał macierzystych, modelowanie generacji, ekspulsji i migracji węglowodorów, analiza dróg migracji, analiza parametrów zbiornikowych pułapek złożowych);
- badania prospekcyjne (trendy przestrzennego rozwoju parametrów zbiornikowych i filtracyjnych, analiza macierzystości, ranking stref zbiornikowych);
- konstrukcja statycznych modeli geologiczno-złożowych 3D;
- analiza procesów diagenetycznych i ich wpływu na parametry zbiornikowe skał;
- genetyczna korelacja płynów złożowych ze skałami macierzystymi;
- obliczanie zasobów złóż węglowodorów z analizą niepewności;
- modele przepływu płynów złożowych w skałach zbiornikowych;
- badania ekshalacji gazu;
- badania złóż typu *tight/shale gas*;
- specjalistyczne analizy: przestrzeni porowej, petrograficzne, geochemiczne RSO, płynów złożowych, analizy biomarkerów, analizy chromatograficzne, analiza GC/MS oraz GC/MS/MS;
- interpretacja danych geofizyki wiertniczej.

Kierownik: dr inż. Grzegorz Leśniak
Adres: ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków
Telefon: 12 421-00-33 w. 262
Faks: 12 430-38-85
E-mail: grzegorz.lesniak@inig.pl

