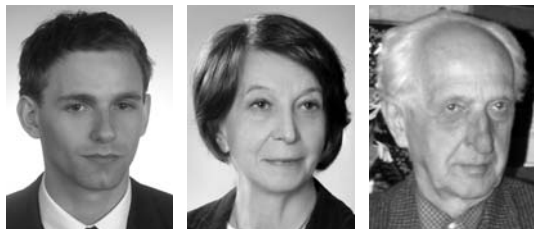


# Estymacja wybranych parametrów petrofizycznych na podstawie atrybutów sejsmicznych oraz danych geofizyki otworowej, przedgórze Karpat

Marcin Kobylarski<sup>1</sup>, Kaja Pietsch<sup>1</sup>, Jerzy Kowalczyk<sup>1</sup>



M. Kobylarski

K. Pietsch

J. Kowalczyk

**Estimation of chosen petrophysical parameters on the basis of seismic attributes and well data, the Carpathian Foreland.** *Prz. Geol.*, 56: 561–570.

**A b s t r a c t.** The article presents an attempt of determination of petrophysical parameters distribution within the Cenomanian complex localized in the central part of the Carpathian Foreland. Well-logging data, P and PS wavefields were used in the research. On the basis of the detailed analyses (i.e., seismic modeling, seismic inversion, AVO analysis) distribution of acoustic and elastic impedances, S-wave impedance, P and S-wave velocities and AVO product were calculated. Application of a geostatistical method with a use of obtained attributes and log data enabled estimation of porosity, clay content distributions and gas saturation along the profile.

**Keywords:** multi-component seismic, petrophysical parameters estimation, Carpathian Foreland, Cenomanian complex

Możliwość estymacji przestrzennego rozkładu parametrów zbiornikowych i złożowych na podstawie danych sejsmicznych oraz danych geofizyki otworowej stanowi kluczowy element zaawansowanej interpretacji danych geofizycznych. Wyniki publikowane w literaturze (Gaiser 2000; Hampson i in., 2001; Duffour i in., 2002; Avseth i in., 2005) pokazują takie możliwości oraz metodykę wykorzystania informacji uzyskanych z danych sejsmicznych (atrybutów obliczonych na podstawie profili fal podłużnych — impedancji akustycznej, wyników analiz AVO, *Amplitude Variation with Offset*; atrybutów obliczonych na podstawie pól fal przemiennych — impedancji fali S) i danych geofizyki otworowej (np. parametrów zbiornikowych).

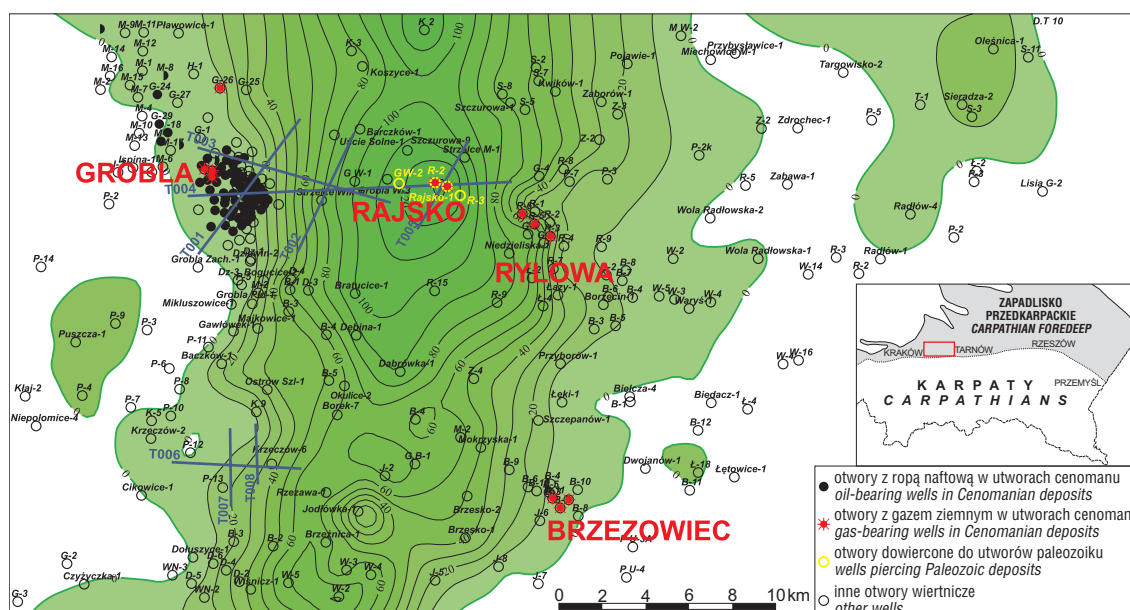
W artykule przedstawiono próbę określenia rozkładów nasycenia gazem, porowatości oraz zailenia opartą na danych otworowych oraz atrybutach obliczonych na podstawie profili sejsmicznych fal podłużnych oraz przemiennych.

Analizy wykonano w strefie złożowej zlokalizowanej w piaskowcach cenomańskich obejmującej złożę Rajsko.

Prace interpretacyjne, analizy i obliczenia dotyczące zarówno danych geofizyki otworowej, jak i danych sejsmicznych wykonano w systemie *Hampson-Russell Software*. Modelowe krzywe prędkości fali poprzecznej obliczono z wykorzystaniem modułu *Estymacja* programu *GeoWin* (opracowanego w Katedrze Geofizyki Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH).

## Charakterystyka geologiczna obszaru badań

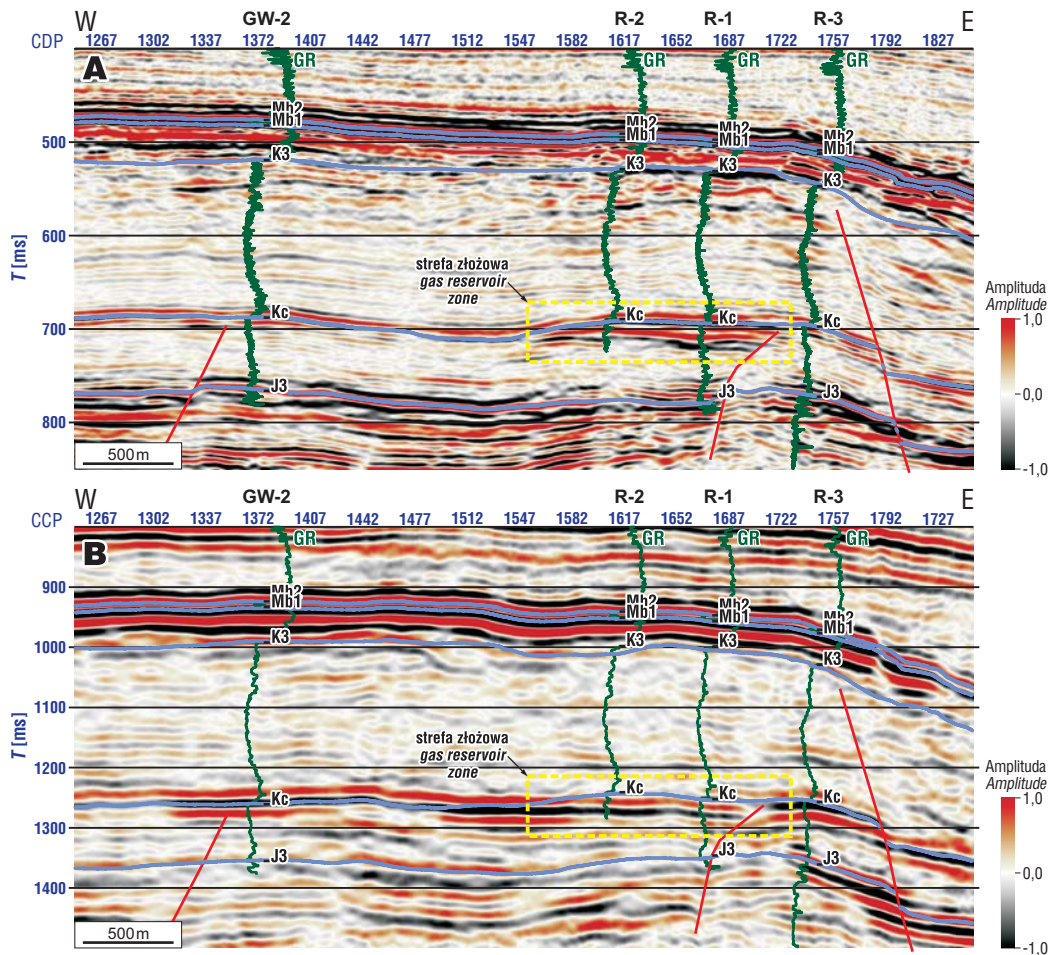
Strefa badań znajduje się w centralnej części zapadliśka przedkarpacciego (ryc. 1). W rejonie badań, w otworze Rajsko-1 stwierdzono: utwory czwartorzędu (gliny, piaski, żwiry), sarmatu oraz badenu górnego (iłowce, mułowce, piaskowce), badenu środkowego (anhidyry, łupki), bade-



Ryc. 1. Lokalizacja otworów i profili sejsmicznych na tle mapy miąższości cenomanu (wg Baran i in., 1999)

Fig. 1. Location of seismic profiles and wells versus thickness map of the Cenomanian complex (after Baran et al., 1999)

<sup>1</sup>Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; kobylarski@geol.agh.edu.pl, pietsch@agh.edu.pl, kajot@geol.agh.edu.pl



**Ryc. 2.** Część profilu T004 z zaznaczoną strefą złożową; A — składowa pionowa, B — składowa pozioma (w czasie rejestracji fal PS); GR — profilowanie naturalnego promieniowania gamma, Mb2 — strop badenu środkowego, Mb1 — strop badenu dolnego, K3 — strop kredy górnej, Kc — strop cenomanu, J3 — strop jury górnej; CDP — wspólny punkt głębokościowy; CCP — wspólny punkt konwersji

**Fig. 2.** Part of the T004 profile with indicated gas reservoir zone; A — vertical component, B — horizontal component (in PS time domain); GR — natural gamma ray, Mb2 — Middle Badenian top, Mb1 — Lower Badenian top, K3 — Upper Cretaceous top, Kc — Cenomanian top, J3 — Upper Jurassic top; CDP — common depth point; CCP — common conversion point

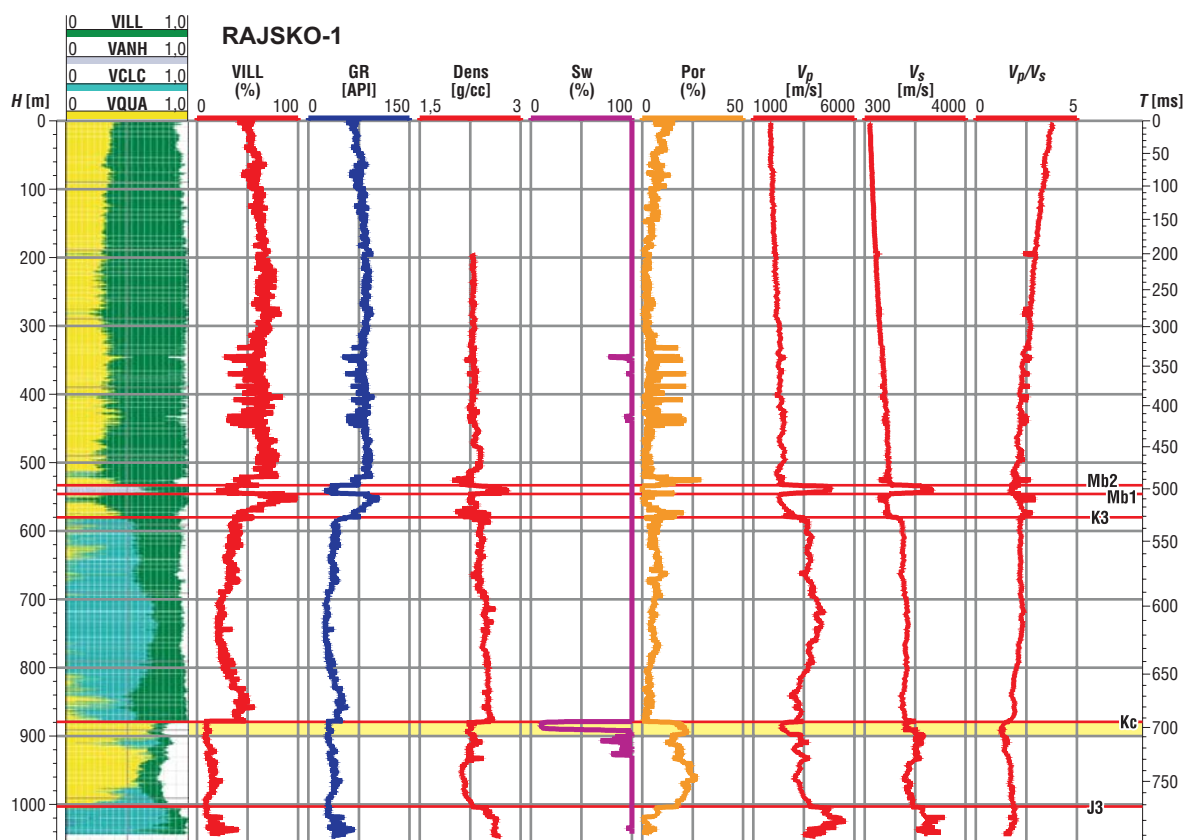
nu dolnego (iłowce, mułowce), jak również utwory kredy górnej (wapień, margle), cenomanu (piaskowce) oraz jury górnej (wapień, margle).

Złoża ropy naftowej i gazu ziemnego odkryte w utworach mezozoicznych badanego rejonu mają charakter warstwowo-masywowy. Akumulacje górnokredowe są zlokalizowane w kolektorach porowych, a górnourajskie w kolektorach porowo-szczelinowych (Florek i in., 2006a). Analizowana w artykule strefa obejmuje złożę gazu Rajska znajdujące się w piaskowcach cenomanu, które charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami zbiornikowymi (Florek i in., 2006b).

W badaniach wykorzystano profile sejsmiczne fal podłużnych (ryc. 2A) i przemiennych (ryc. 2B) pochodzące ze zdjęcia 2D-3C Krzeczów-Rajska wykonanego przez Geofizykę Toruń Sp. z o.o. (Grzywa i in., 2005) oraz dane geofizyczne z otworów Grobla Wschód-2, Rajska-1, Rajska-2 i Rajska-3. Na przekrojach sejsmicznych zaznaczono wyinterpretowane podstawowe wydzielenia stratygraficzne (Mb2, Mb1 — strop i spąg warstw anhydrytowych, K3 — strop utworów kredy, Kc — strop warstw cenomańskich, J3 — strop wapiennych utworów jury) oraz krzywą GR otworów Grobla Wschód-2, Rajska-1, 2 i 3.

W obrazie sejsmicznym składowej pionowej (ryc. 2A) dobrze widoczne są odbicia o znacznych amplitudach od granic podstawowych kompleksów: dodatni refleks pochodzący od stropu anhydrytu, ujemne odbicie — od stropu warstw cenomańskich oraz dodatni refleks — od stropu jury. Strefa złożowa, zlokalizowana w stropowej części piaskowców cenomanu w okolicy otworów Rajska-1 oraz Rajska-2 ma zapis anomalny. Identyfikują ją bezpośrednie wskaźniki węglowodorowości, tj. *bright spot* — podwyższona amplituda (ujemna) refleksu pochodzącego od stropu horyzontu nasyconego oraz *flat spot* — odbicie od kontaktu woda-gaz.

Pod strefą nasyconą obserwuje się także obniżenia częstotliwości spowodowane tłumieniem oraz niewielkie obniżenia amplitudy. W obrazie sejsmicznym fal przemiennych w podobny sposób zaznaczają się podstawowe kompleksy stratygraficzne (ryc. 2B). Natomiast obraz sejsmiczny strefy złożowej jest zdecydowanie różny. W obrębie złoża nie obserwuje się podwyższonych amplitud, ujemny refleks pochodzący od stropu piaskowców cenomanu w obrębie złoża kontynuuje się w spągu warstw nasyconych, wyinterpretowany strop cenomanu przecina w zachodniej części złoża fazę dodatnią.



**Ryc. 3.** Krzywe geofizyki wiertniczej otworu Rajsko-1 z zaznaczoną strefą złożową; GR — profilowanie naturalnego promieniowania gamma; Dens — gęstość; Sw — nasycenie wodą; Por — porowatość;  $V_p$ ,  $V_s$  — prędkość fal P oraz S; objętościowe zawartości frakcji ilastej (VILL), anhydrytu (VANH), wapienia (VCLC), kwarcu (VQUA); Mb2 — strop badenu środkowego; Mb1 — strop badenu dolnego; K3 — strop kredy górnej; Kc — strop cenomanu; J3 — strop jury górnej

**Fig. 3.** Rajsko-1 well data with indicated gas saturated zone; GR — natural gamma ray; Dens — density; Por — porosity;  $V_p$ ,  $V_s$  — P and S-wave velocities; volumetric curves for clay content (VILL), anhydrite (VANH), calcite (VCLC), quartz (VQUA); Mb2 — Middle Badenian top; Mb1 — Lower Badenian top; K3 — Upper Cretaceous top; Kc — Cenomanian top; J3 — Upper Jurassic top

### Analiza danych otworowych

Pierwszym etapem badań było określenie zależności pomiędzy wybranymi parametrami zbiornikowymi oraz zaileniem a prędkością fali podłużnej ( $V_p$ ), a także stosunkiem prędkości fali podłużnej do prędkości fali poprzecznej ( $V_p/V_s$ ). W badaniach wykorzystano dane geofizyki wiertniczej pochodzące z otworów Rajsko-1, 2, i 3 oraz Grobla Wschód-2. W żadnym z tych otworów nie dysponowano krzywymi prędkości fal S. Dostępność krzywych dotyczących objętościowych zawartości poszczególnych składników szkieletu skalnego oraz krzywych prędkości fali P, porowatości i nasycenia pozwoliła na obliczenie syntetycznych krzywych prędkości fali S, z wykorzystaniem relacji Biota-Gassmanna (Krief i in., 1989; Bała, 2008).

Podstawowym narzędziem korelacji danych otworowych z danymi sejsmicznymi są sejsmogramy syntetyczne. W wypadku fal podłużnych korelacja została wykonana za pomocą sejsmogramów, obliczonych jako splot rozkładu współczynników odbicia z sygnałem elementarnym. Dla pól fal przemiennych korelacja odbywała się z użyciem tras syntetycznych obliczonych na podstawie równań Zoeppritza, z założonymi różnymi odległościami punktu wzbudzenia od punkt odbioru (offsetami), oraz sygnału elementarnego. Niezbędna w procesie dopasowania danych sejsmicznych i otworowych aplikacja poprawek prędkościowych doprowadziła do otrzymania

poprawionych krzywych prędkości  $V_p$ ,  $V_s$ , a zatem i  $V_p/V_s$ , które były niezbędne do dalszych analiz, tj. określania zależności pomiędzy prędkością  $V_p$  i  $V_s$  a innymi parametrami petrofizycznymi. Korelację danych otworowych z polem odbitych fal P wykonano w domenie czasu rejestracji fal P, natomiast w wypadku fal przemiennych PS w domenie czasu rejestracji fal PS. Wykonana korelacja pozwoliła także na powiązanie odpowiadających sobie refleksów na profilach fal P i PS.

Poprawione krzywe prędkościowe oraz inne krzywe geofizyki otworowej otworu Rajsko-1 zostały przedstawione na rycinie 3.

Zależności pomiędzy wybranymi parametrami (porowatością, zaileniem oraz nasyceniem wodą złożową) a prędkością  $V_p$ ,  $V_s$  były podstawą do wnioskowania o zmienności wybranych parametrów petrofizycznych. Te zależności wyznaczono na podstawie opracowanych wykresów krzyżowych (ryc. 4, 5 i 6).

**Wpływ porowatości na prędkość propagacji fal sprężystych.** Wykresy krzyżowe, przedstawiające zależności pomiędzy prędkością propagacji fali podłużnej (ryc. 4A) oraz  $V_p/V_s$  (ryc. 4B) a porowatością całkowitą (Por) w kompleksie cenomańskim, zostały obliczone na podstawie danych z otworu Rajsko-1. Jeśli przeanalizuje się rysunek, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem porowatości prędkość propagacji fali podłużnej maleje. Oprócz wpływu porowatości widoczny jest również wpływ nasycenia,

powodujący znaczne zmniejszenie  $V_p$ . W danych pochodzących z kompleksu cenomańskiego wzrost  $V_p/V_s$  wraz ze wzrostem porowatości (zarówno w wypadku nasycenia przestrzeni porowych gazem, jak i wodą złożową) zaznacza się w sposób ewidentny.

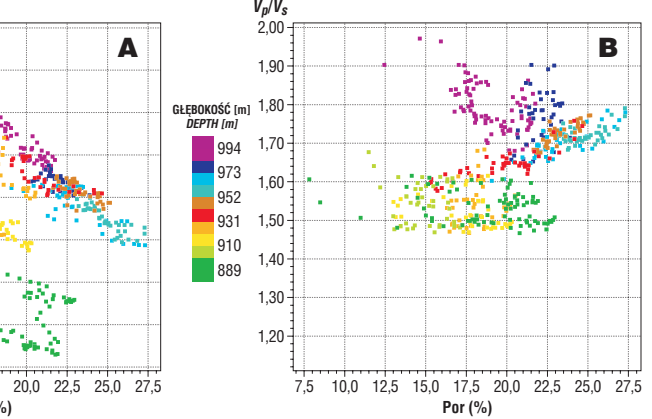
**Wpływ zailenia na prędkość propagacji fal sprężystych.** Wzrost zailenia powoduje spadek prędkości tak fali podłużnej, jak i poprzecznej. W związku z tym, że zailenie wpływa w większym stopniu na prędkość fali S (Minear, 1982; Tosaya & Nur, 1982), jest obserwowany wzrost wartości  $V_p/V_s$  wraz ze wzrostem zailenia. Na rycinie 5 widać zależność pomiędzy prędkością fali P (A) oraz  $V_p/V_s$  (B) a zaileniem, przedstawionym w postaci objętościowej zawartości frakcji ilastej szkieletu skalnego (VILL). Analiza rysunku pozwala stwierdzić spadek prędkości propagacji fali podłużnej ze wzrostem zailenia. Zaniżone wartości  $V_p$ , charakterystyczne dla grupy punktów (w przedziale prędkości 2250–3000 m/s), są związane z warstwami nasycenymi gazem. Widoczny jest także wzrost  $V_p/V_s$  przy zwiększonym zaileniu. Ponieważ jednak zailenie nie jest znaczne oraz występuje zmniejszenie  $V_p/V_s$  związane z nasyceniem gazem, trudno jednoznacznie określić jego wpływ na  $V_p/V_s$ .

**Wpływ nasycenia na prędkość propagacji fal sprężystych.** Nasycenie gazem powoduje znaczne zmniejszenie prędkości fal podłużnych oraz wartości  $V_p/V_s$ , natomiast prędkość fal poprzecznych wraz ze wzrostem nasycenia prawie się nie zmienia. Rycina 6 przedstawia zależność pomiędzy prędkością fali podłużnej (A) oraz  $V_p/V_s$  (B) a nasyceniem wodą złożową ( $S_w$ ). Na wykresach krzyżowych jest widoczny skokowy spadek prędkości fal podłużnych oraz  $V_p/V_s$  w warstwach nasyconych w stosunku do nienasyconych piaskowców cenomańskich.

Podsumowując wyniki uzyskane z wykresów krzyżowych, można stwierdzić, że:

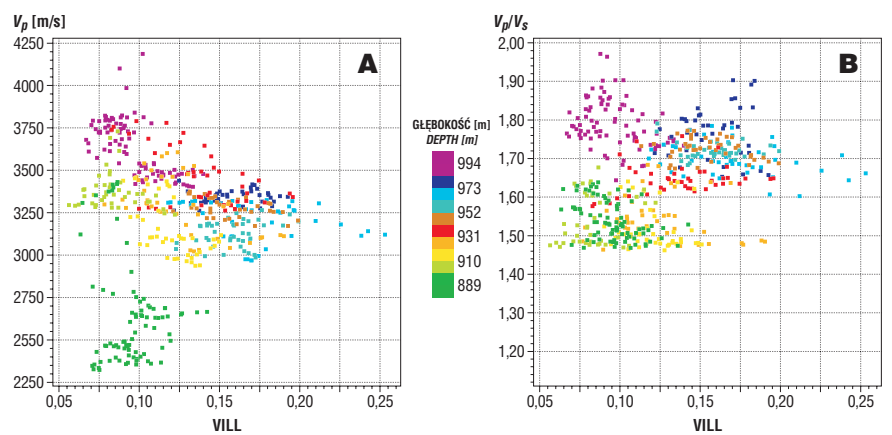
□ zależność pomiędzy  $V_p$  oraz  $V_p/V_s$  a porowatością zaznacza się w dobry sposób, a więc estymacja porowatości na podstawie rozkładu prędkości (lub impedancji) powinna przynieść dobre rezultaty. Dodatkowa informacja o prędkości propagacji fali poprzecznej w znaczący sposób może zwiększyć wiarygodność estymacji,

□ wyraźnie widoczna zależność pomiędzy  $V_p$  a zaileniem może być podstawą przewidywania zailenia opartego na rozkładzie prędkości (lub impedancji). Pomocna może



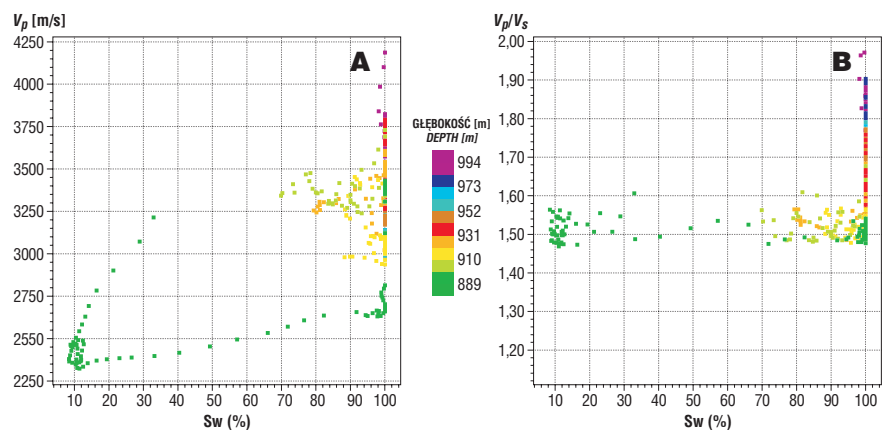
Ryc. 4. Wykresy krzyżowe pomiędzy  $V_p$  (A) oraz  $V_p/V_s$  (B) i porowatością (Por) dla kompleksu cenomańskiego w otworze Rajsko-1

Fig. 4. Crossplots between  $V_p$  (A),  $V_p/V_s$  (B) and porosity (Por) for the Cenomanian complex of the well Rajsko-1



Ryc. 5. Wykresy krzyżowe pomiędzy  $V_p$  (A) oraz  $V_p/V_s$  (B) i zaileniem (VILL) dla kompleksu cenomańskiego w otworze Rajsko-1

Fig. 5. Crossplots between  $V_p$  (A),  $V_p/V_s$  (B) and clay content (VILL) for the Cenomanian complex of the well Rajsko-1



Ryc. 6. Wykresy krzyżowe pomiędzy  $V_p$  (A) oraz  $V_p/V_s$  (B) i nasyceniem wodą ( $S_w$ ) dla kompleksu cenomańskiego w otworze Rajsko-1

Fig. 6. Crossplots between  $V_p$  (A),  $V_p/V_s$  (B) and water saturation ( $S_w$ ) for the Cenomanian complex of the well Rajsko-1

być także informacja o  $V_s$ , jednak ze względu na niewielkie zmiany zailenia oraz słabsze zależności pomiędzy parametrami wynik może być obarczony znacznym błędem,

□ w wypadku nasycenia wodą złożową istnieje możliwość przewidywania nasycenia gazem jedynie w sposób jakościowy, ze względu na skokowy spadek  $V_p$  oraz  $V_p/V_s$  z nasyceniem.

Wykonano takie same analizy danych z otworu Rajsko-3. Otrzymane wyniki są podobne do przedstawionych w poprzednich rozdziałach, jednak ze względu na brak nasycenia gazem nie występują związane z nim spadki prędkości fali P oraz  $V_p/V_s$  (Kobyłarski, 2008).

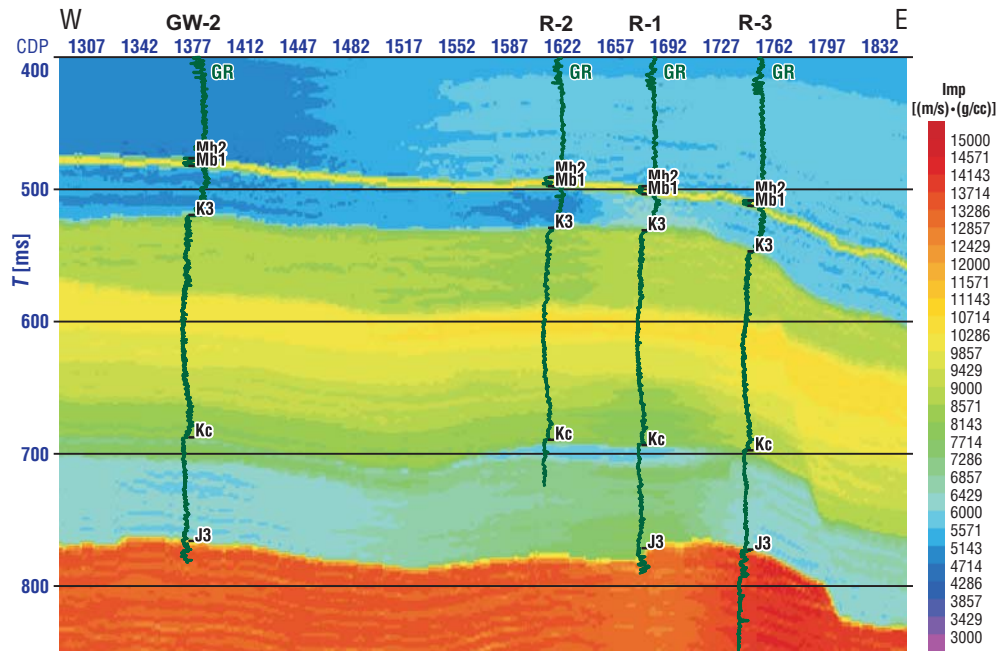
### Atrybuty sejsmiczne

Przewidywanie rozkładu wybranych parametrów zbiornikowych oraz zailenia wzdłuż przekroju sejsmicznego T004 (ryc. 1 i 2) wymagało obliczenia inwersji sejsmicznej fali P i S oraz impedancji elastycznej, jak również przeprowadzenia analizy zmiany amplitudy fali odbitej z offsetem (AVO). Uzyskano atrybuty będące podstawą przewidywania.

### Inwersja sejsmiczna

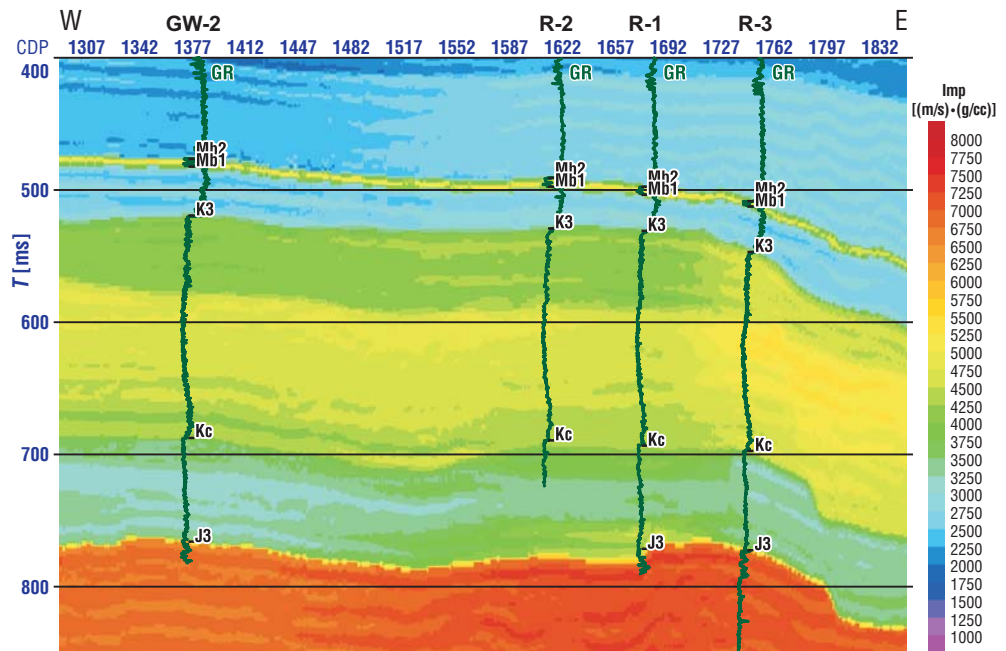
to proces odwzorowania fizycznej struktury i właściwości ośrodka geologicznego na podstawie powierzchniowych pomiarów sejsmicznych. Głównym celem wykonanej inwersji było uzyskanie rozkładów impedancji akustycznej (iloczyn prędkości fali P i gęstości objętościowej) i prędkości na podstawie zarejestrowanych tras sejsmicznych. Ze względu na dobre rozpoznanie budowy głębokiej ośrodka (opracowane i sprawdzone modele sejsmogeologiczne — Kobyłarski, 2008; Kobyłarski i in., 2008) zastosowano inwersję z wykorzystaniem modelu geologicznego.

W wyniku wykonanej inwersji zarejestrowanego pola fal podłużnych otrzymano impedancję akustyczną (ryc. 7) oraz rozkład prędkości fali P. Rozkład wartości impedancji w dobry sposób odzwierciedla budowę geologiczną ośrodka. Duże wartości impedancji charakteryzują warstwę anhydritów oraz strop węglanowych utworów jury, mniejsze wartości w stosunku do otoczenia charakteryzują zaś piaskowce cenomańskie. Obniżenie w obrębie strefy złożowej w dobry sposób odzwierciedla nasycenie gazem.



Ryc. 7. Impedancja akustyczna; GR — profilowanie naturalnego promieniowania gamma, Mb2 — strop badenu środkowego, Mb1 — strop badenu dolnego, K3 — strop kredy górnej, Kc — strop cenomanu, J3 — strop jury górnej; CDP — wspólny punkt głębokościowy

Fig. 7. Acoustic impedance; GR — natural gamma ray, Mb2 — Middle Badenian top, Mb1 — Lower Badenian top, K3 — Upper Cretaceous top, Kc — Cenomanian top, J3 — Upper Jurassic top; CDP — common depth point



Ryc. 8. Impedancja fali S; GR — profilowanie naturalnego promieniowania gamma, Mb2 — strop badenu środkowego, Mb1 — strop badenu dolnego, K3 — strop kredy górnej, Kc — strop cenomanu, J3 — strop jury górnej; CDP — wspólny punkt głębokościowy

Fig. 8. S-wave impedance; GR — natural gamma ray, Mb2 — Middle Badenian top, Mb1 — Lower Badenian top, K3 — Upper Cretaceous top, Kc — Cenomanian top, J3 — Upper Jurassic top; CDP — common depth point

Opierając się na fakcie, że refleksyjność pól fal przemiennych może być pod pewnymi warunkami liniowo zależna od refleksyjności pól fal poprzecznych (Hirsh K., 2005 — pomoc elektroniczna systemu *Hampson-Russell Software*; Varga i in., 2007), wykonano inwersję pola fal przemiennych z wykorzystaniem modelu impedancji fali poprzecznej, opracowanego w skali czasowej fal P. W jej wyniku otrzymano rozkład impedancji fali poprzecznej (ryc. 8) oraz rozkład prędkości fal S.

Podobnie jak w wypadku pola impedancji akustycznej (ryc. 7) rozkład impedancji fali S (ryc. 8) w dobry sposób charakteryzuje poszczególne kompleksy geologiczne. Natomiast w obrębie strefy nasyconej gazem nie występują znaczne zmiany wartości. Nasylenie gazem nie powoduje bowiem wyraźnej zmiany prędkości fali S.

Rozkład  $V_p/V_s$  otrzymany na podstawie prędkości inwersyjnych został przedstawiony na rycinie 9. Jeśli przeanalizuje się rysunek, można stwierdzić, iż w obrębie strefy nasyconej gazem obserwujemy zmniejszenie  $V_p/V_s$  do wartości ok. 1,45.

**Impedancja elastyczna (EI)** jest uogólnieniem oraz rozszerzeniem impedancji akustycznej. Niezbędne do jej wyznaczenia dane to prędkość propagacji fali podłużnej, poprzecznej, gęstość oraz kąt padania promienia na granicy sejsmiczną (Connolly, 1999). Impedancję elastyczną można obliczyć na podstawie sum kątowych, traktowa-

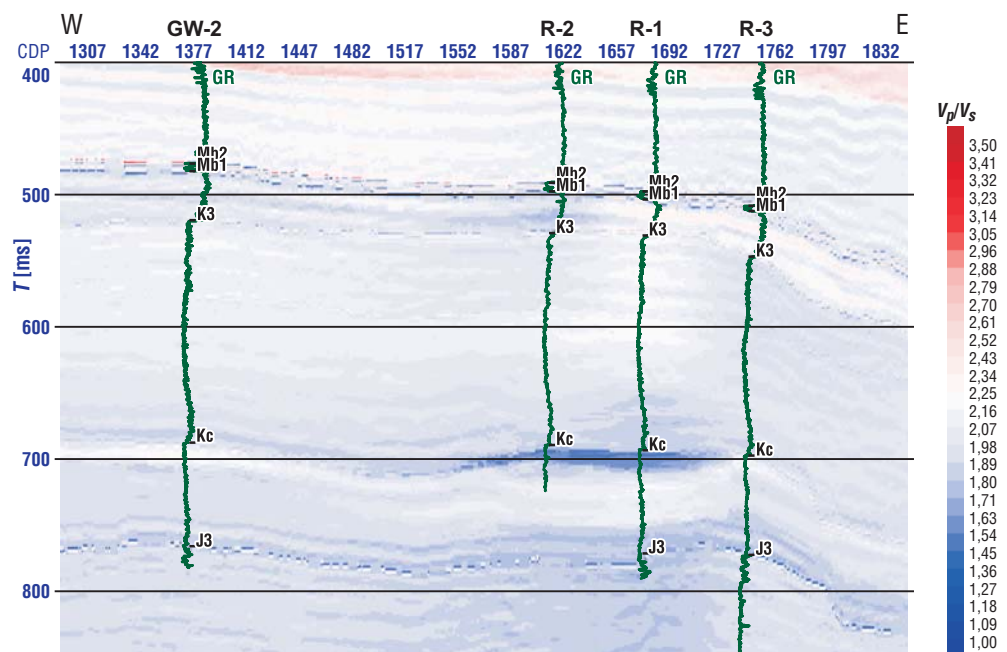
nych jako splot impedancji elastycznej z sygnałem elementarnym danej sumy kątowej.

Po analizie sum kątowych z różnych przedziałów kątów wykorzystano sumy odpowiadające kątom ok. 7° oraz ok. 30°. Obliczone impedancje niewielkich oraz dużych kątów wykazują spadki wartości w obrębie stref nasyconych gazem (Kobyłarski, 2008). Stosunek impedancji elastycznej kąta ok. 7° oraz kąta ok. 30° —  $EI(7)/EI(30)$  — jest przedstawiony na rycinie 10. Analizując rysunek, można stwierdzić wyraźne różnice w wartościach charakteryzujących poszczególne kompleksy geologiczne oraz brak znacznych zmian w obrębie złoża gazu.

**Analiza AVO.** Analiza zmian amplitudy z offsetem stanowi ważny etap interpretacji danych sejsmicznych. W AVO analizowane są zmiany amplitudy konkretnego refleksu sejsmicznego w funkcji odległości źródło-odbiornik (a zarazem i w funkcji kąta padania promienia sejs-

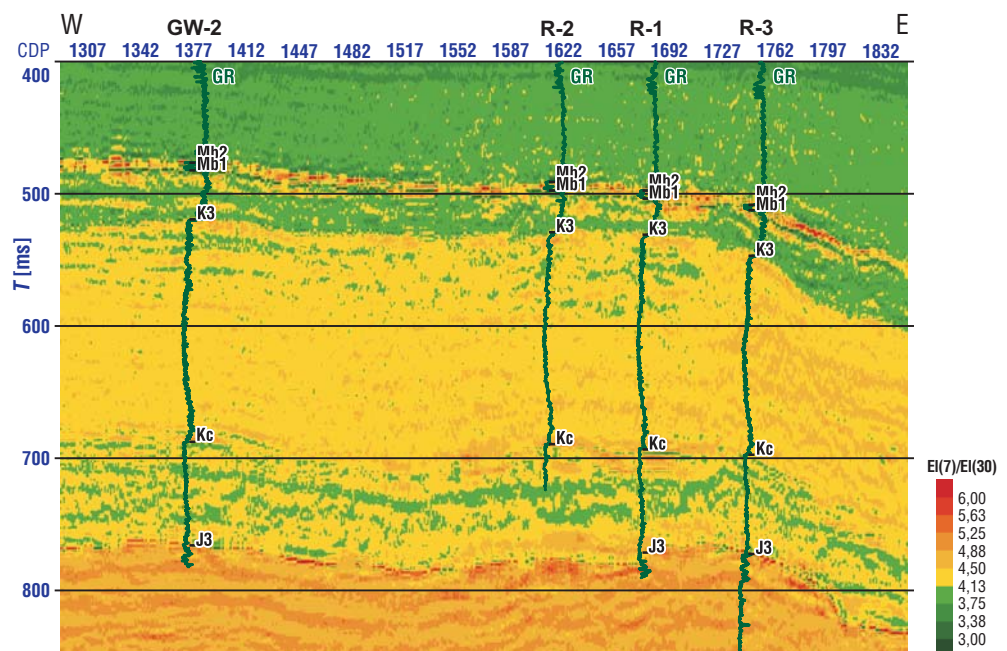
**Ryc. 9.** Rozkład  $V_p/V_s$  obliczony na podstawie danych pochodzących z inwersji; GR — profilowanie naturalnego promieniowania gamma, Mb2 — strop badenu środkowego, Mb1 — strop badenu dolnego, K3 — strop kredy górnej, Kc — strop cenomanu, J3 — strop jury górnej; CDP — wspólny punkt głębokościowy

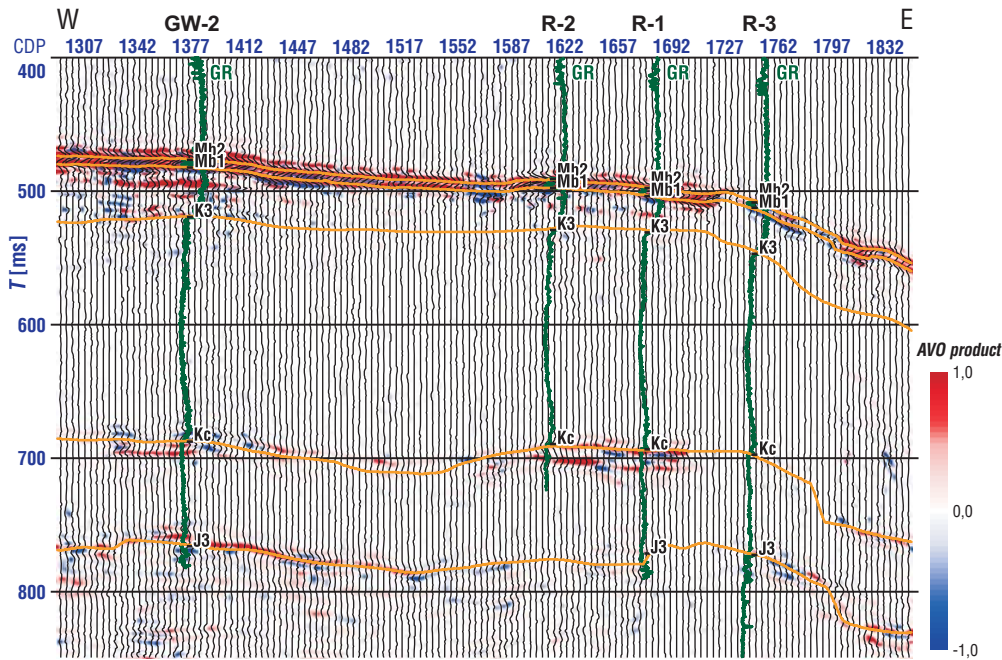
**Fig. 9.**  $V_p/V_s$  distribution calculated on the basis of inversion results; GR — natural gamma ray, Mb2 — Middle Badenian top, Mb1 — Lower Badenian top, K3 — Upper Cretaceous top, Kc — Cenomanian top, J3 — Upper Jurassic top; CDP — common depth point



**Ryc. 10.** Iloraz impedancji elastycznych  $EI(7)/EI(30)$ ; GR — profilowanie naturalnego promieniowania gamma, Mb2 — strop badenu środkowego, Mb1 — strop badenu dolnego, K3 — strop kredy górnej, Kc — strop cenomanu, J3 — strop jury górnej; CDP — wspólny punkt głębokościowy

**Fig. 10.** Elastic impedances ratio  $EI(7)/EI(30)$ ; GR — natural gamma ray, Mb2 — Middle Badenian top, Mb1 — Lower Badenian top, K3 — Upper Cretaceous top, Kc — Cenomanian top, J3 — Upper Jurassic top; CDP — common depth point





**Ryc. 11.** Wynik analiz zmian amplitudy z offsetem (*AVO product*); trasy — *intercept*, GR — profilowanie naturalnego promieniowania gamma, Mb2 — strop badenu środkowego, Mb1 — strop badenu dolnego, K3 — strop kredy górnej, Kc — strop cenomanu, J3 — strop jury górnej; CDP — wspólny punkt głębokościowy

**Fig. 11.** Results of amplitude versus offset analysis (*AVO product*); wiggles — *intercept*, GR — natural gamma ray, Mb2 — Middle Badenian top, Mb1 — Lower Badenian top, K3 — Upper Cretaceous top, Kc — Cenomanian top, J3 — Upper Jurassic top; CDP — common depth point

smiczego). Zmiana amplitudy z offsetem zależy od relacji prędkości fali podłużnej, poprzecznej oraz gęstości na granicy ośrodków geologicznych, a zatem i od współczynnika Poissona. Gdy wstępują utwory piaskowcowe nasycone gazem oraz nadległe utwory uszczelniające, które charakteryzuje większa prędkość, następuje wzrost bezwzględnych wartości amplitud dla większych wartości offsetów (Ostrander, 1984).

Na profilu T004 wynik analizy AVO w strefie złoża gazu przedstawiono na rycinie 11 za pomocą atrybutów AVO. Trasy sejsmiczne odpowiadają wartościom *intercept*, a tło kolorystyczne wartościom *AVO product*. *Intercept* jest równy współczynnikowi odbicia fali na granicy dwóch ośrodków, a *AVO product* — to atrybut zależny od nachylenia prostej aproksymującej wzrost amplitudy z offsetem. Pozytywna anomalia AVO wskazuje na nasycenie gazem, potwierdza tym samym spadek prędkości fali P oraz  $V_p/V_s$  w warstwach złożowych. Na rysunku są widoczne także anomalie związane z warstwą anhydrytów oraz stopem jury, wywołane są one jednak znacznymi współczynnikami odbicia występującymi na tych granicach.

#### Estymacja porowatości, zailenia oraz nasycenia gazem

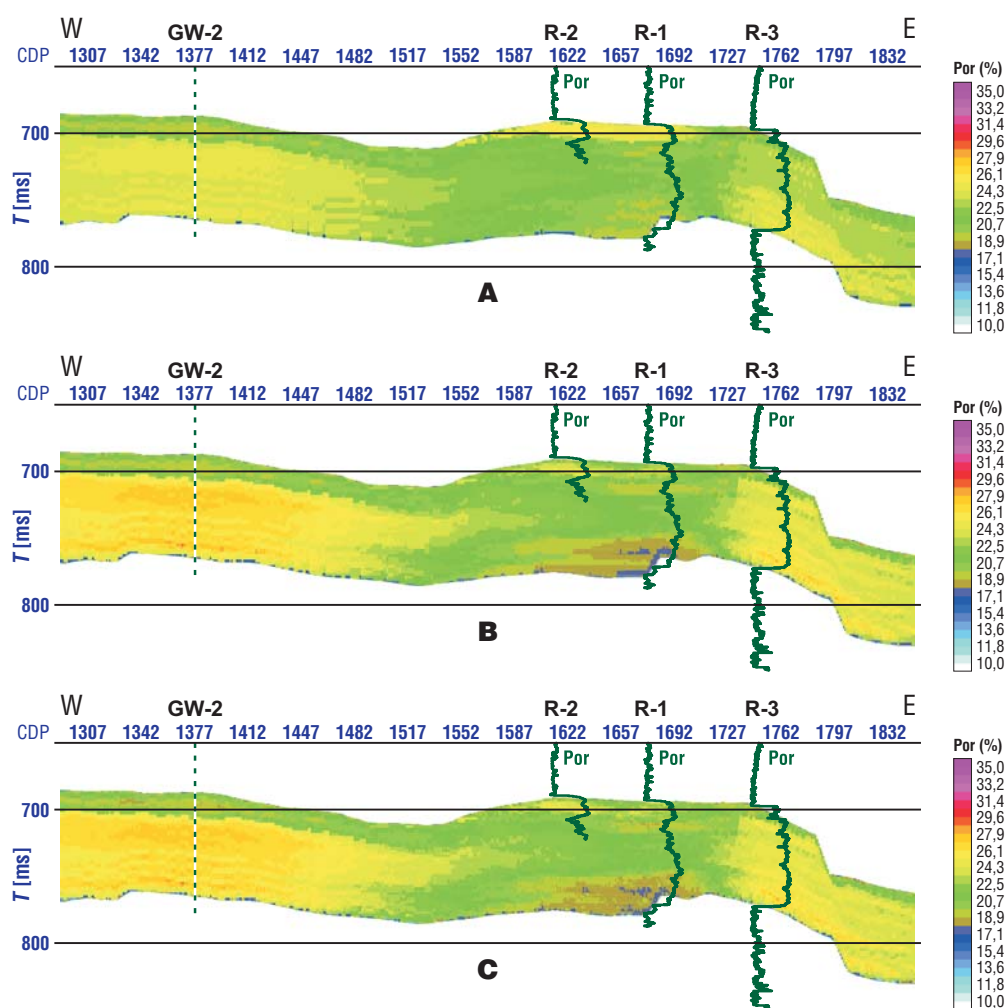
Przedstawione atrybuty sejsmiczne zawierają w sobie informacje o budowie i właściwościach fizycznych badanego ośrodka. Użycie metod geostatystycznych pozwala na jednoczesne wykorzystanie wszystkich omówionych atrybutów do estymacji konkretnego parametru (np. zailenia, porowatości) wzdłuż badanego profilu.

Wszystkie etapy wykonanej interpretacji oraz analiz miały na celu zgromadzenie jak największej ilości informacji charakteryzujących badane kompleksy geologiczne. Informacje te, w powiązaniu z danymi otworowymi, zostały wykorzystane do określenia nasycenia gazem, porowatości oraz zailenia w obrębie kompleksu cenomańskiego.

Obliczenia wykonano w module *Emerge* systemu *Hampson-Russell Software*, pozwalającym na wyznaczenie przestrzennego rozkładu parametrów dzięki określonym zależnościom, które mają najlepsze współczynniki korelacji (oraz najmniejszy błąd) pomiędzy danym parametrem a konkretnym atrybutem (sejsmiką, impedancją akustyczną, elastyczną itp.) oraz ich modyfikacjami. Wykorzystano dwie metody bazujące na regresji liniowej, pierwsza z nich (*single attribute analysis*) pozwala na wyznaczenie rozkładu szukanego parametru na podstawie jednego atrybutu. Druga natomiast (*multi attribute analysis*) na jednoczesne wykorzystanie większej liczby atrybutów do określenia rozkładu szukanego parametru wzdłuż profilu. Obliczenia w drugim wypadku opierają się na regresji krokowej postępującej, ze względu na jednoczesne wykorzystanie także modyfikacji obliczonych atrybutów, nie są stosowane atrybuty będące w relacjach liniowych (Hampson i in., 2001; pomoc elektroniczna *Hampson-Russell Software CE8 R2*, 2008).

Przedstawione analizy przeprowadzono w kompleksie cenomańskim. Zostały wykorzystane również dane z otworów Rajsko-1, 2, 3 oraz Grobla Wschód-2.

Wartość zailenia oraz porowatości uzyskano dzięki wynikom pochodzącym z wykorzystania kilku różnych atrybutów. W pierwszej fazie wykorzystano jedynie zale-



**Ryc. 12.** Estymacja rozkładu porowatości (Por) z wykorzystaniem: **A** — impedancji akustycznej, **B** — impedancji akustycznej, impedancji fali S oraz rozkładu  $V_p/V_s$ , **C** — wszystkich poprzednich oraz dodatkowo ilorazu impedancji elastycznych; CDP — wspólny punkt głębokościowy

**Fig. 12.** Porosity (Por) estimation with a use of: **A** — acoustic impedance, **B** — acoustic impedance, S-wave impedance and  $V_p/V_s$  distribution, **C** — additionally elastic impedance ratio; CDP — common depth point

żności pomiędzy szukanymi parametrami a impedancją akustyczną. W kolejnym kroku do wyznaczenia porowatości i zailenia wykorzystano impedancję fali P, fali S oraz rozkład  $V_p/V_s$ . W ostatnim etapie obliczeń wykorzystano wszystkie wcześniej zastosowane atrybuty oraz iloraz impedancji elastycznych. Taki sposób określania zailenia i porowatości pozwala, oprócz otrzymania dokładniejszego wyniku, także na określenie, czy dodatkowa informacja o fali S wpływa w sposób istotny na poprawność wyniku.

**Estymacja porowatości.** Wynik szacowania porowatości jedynie na podstawie rozkładu impedancji akustycznej jest przedstawiony na rycinie 12A. Trend zmian porowatości jest podobny do zmian impedancji i odpowiada wskazaniom przedstawionych krzywych porowatości (Por). W otworze Rajsko-3 porowatość zmienia się tylko w niewielkim stopniu, natomiast w otworze Rajsko-1 zmiany porowatości są większe, zasadniczo także zgodne ze wskazaniami krzywej porowatości.

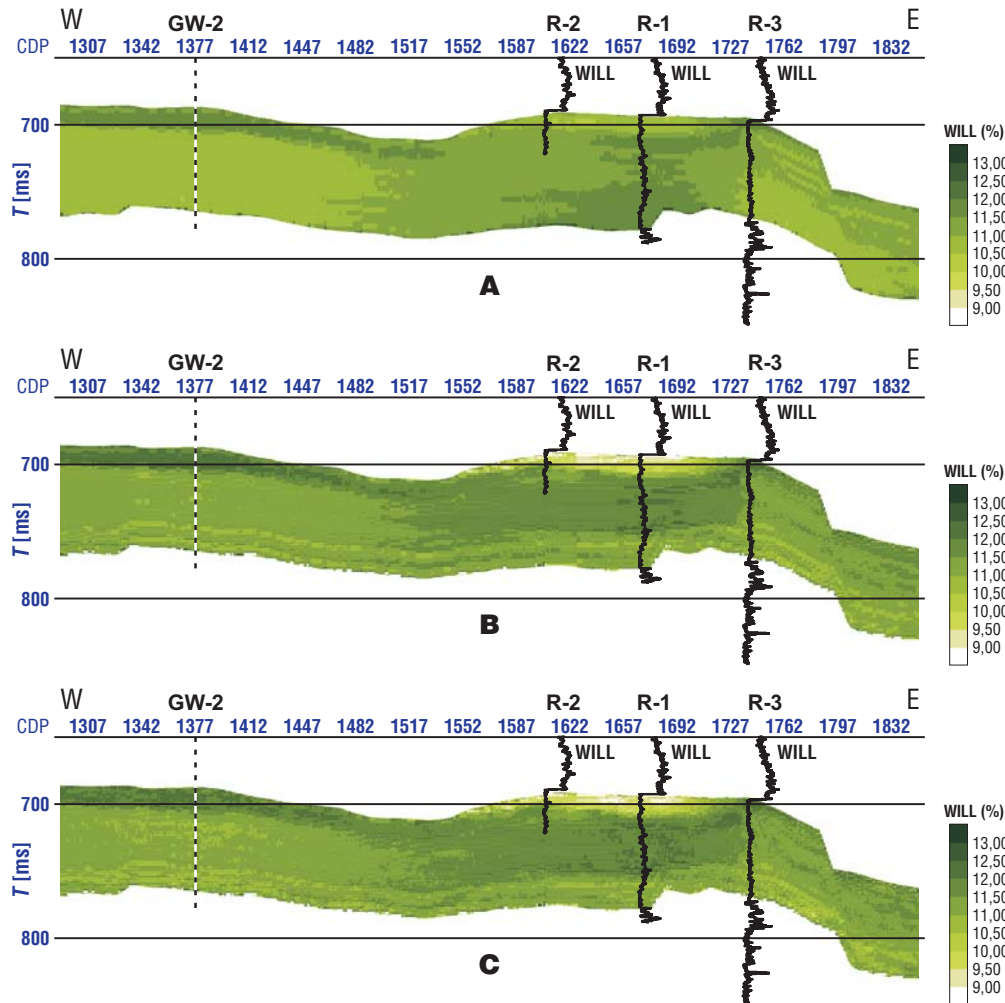
Wynik estymacji porowatości z wykorzystaniem impedancji fali P, fali S oraz  $V_p/V_s$  jest przedstawiony na rycinie 12B. Różnice w stosunku do poprzedniego rozkładu zana-

czają się w otworze Grobla Wschód-2 (zwiększenie porowatości) oraz w spągowej części kompleksu w okolicach otworu Rajsko-1 (zmniejszenie porowatości). Wykorzystanie dodatkowo informacji o impedancji elastycznej nie wprowadza znaczących zmian (ryc. 12C)

Analiza poszczególnych wyników pozwala stwierdzić, że wykorzystanie oprócz impedancji fali P również informacji o prędkości fali poprzecznej (impedancji fali S oraz  $V_p/V_s$ ) pozwala na dokładniejsze określenie rozkładu porowatości w obrębie kompleksu cenomańskiego. Argumentem za tym jest współczynnik korelacji pomiędzy wartościami na krzywej porowatości a obliczonymi z wykorzystaniem pola  $V_p$ ,  $V_s$  oraz  $V_p/V_s$ . W wypadku określania porowatości jedynie na podstawie impedancji fali P, współczynnik ten wynosi ok. 0,5, gdy dodatkowo wykorzystano impedancję fali S oraz  $V_p/V_s$ , wartość współczynnika wzrasta do 0,7.

**Estymacja zailenia.** Pomimo bardzo niewielkich zmian zailenia piaskowców cenomańskich wzdłuż profilu T004 (rzędu kilkunastu procent) oraz braku jednoznacznych zależności pomiędzy zaileniem a prędkościami oraz  $V_p/V_s$ , podjęto próbę estymacji zailenia.





**Ryc. 13.** Estymacja rozkładu zailenia (VILL) z wykorzystaniem: **A** — impedancji akustycznej, **B** — impedancji akustycznej, impedancji fali S oraz rozkładu  $V_p/V_s$ , **C** — wszystkich poprzednich oraz dodatkowo ilorazu impedancji elastycznych; CDP — wspólny punkt głębokościowy

**Fig. 13.** Shale content (VILL) estimation with a use of: **A** — acoustic impedance, **B** — acoustic impedance, S-wave impedance and  $V_p/V_s$  distribution, **C** — additionally elastic impedance ratio; CDP — common depth point

Rozkład zailenia obliczony z wykorzystaniem zależności z impedancją akustyczną jest przedstawiony na rycinie 13A. Wynik odpowiada rozkładowi impedancji. W obrębie złoża występuje zmniejszenia zailenia. W spągowej części kompleksu, pod złożem zailenie się zwiększa, co jest niezgodne ze wskazaniami krzywej zailenia VILL (niewielkie zmniejszenie zailenia). W otworze Rajsco-3 obliczony rozkład zailenia jest zgodny ze wskazaniami krzywej VILL.

Obliczenie rozkładu na podstawie impedancji fali P, impedancji fali S oraz rozkładu  $V_p/V_s$  (ryc. 13B) wprowadza niewielkie zmiany. W obrębie złoża jest obserwowane zmniejszenie zailenia ze względu na wykorzystanie rozkładu  $V_p/V_s$  w obliczeniach. Ważna zmiana w stosunku do poprzedniego rozkładu jest widoczna w spągu kompleksu cenomańskiego (w otworze Rajsco-1), gdzie występuje spadek zailenia zgodny ze wskazaniami krzywej VILL.

Wykorzystanie dodatkowo ilorazu impedancji elastycznych do określenia rozkładu zailenia (ryc. 13C) daje rezultat zgodny ze wskazaniami krzywych, podobny do poprzedniego (ryc. 13B).

**Szacowanie nasycenia gazem.** Analizy dotyczące nasycenia gazem mają jedynie charakter jakościowy.

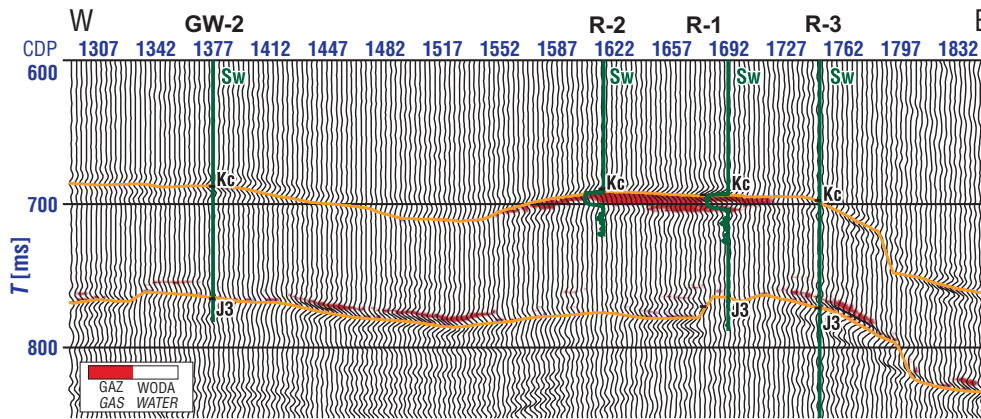
Do analizy wykorzystano dane wykazujące zmianę wraz z nasyceniem gazem (impedancja fali P,  $V_p/V_s$ , *AVO product*).

Obliczeń rozkładu nasycenia gazem dokonano wykorzystując dwa alternatywne podejścia. W pierwszym jednocześnie wykorzystano impedancję fali P oraz  $V_p/V_s$ , w drugim impedancję fali P,  $V_p/V_s$ , *AVO product* oraz wartości amplitud z tras sejsmicznych (ryc. 14). Analizując rysunek, można stwierdzić występowanie nasycenia w obrębie otworów Rajsco-1 oraz Rajsco-2, odpowiadające obniżonym wskazaniom krzywej nasycenia wodą (Sw). Zgodnie z danymi otworowymi nasycenie nie występuje w okolicach otworu Rajsco-3.

## Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki estymacji nasycenia gazem, zailenia i porowatości z wykorzystaniem danych otworowych oraz atrybutów obliczonych na podstawie danych sejsmicznych.

Wszystkie etapy interpretacji oraz analiz miały na celu zgromadzenie jak największej ilości informacji o badanych kompleksach geologicznych. Część z nich może jedynie posłużyć do interpretacji jakościowej (np. wyniki analizy



**Ryc. 14.** Estymacja nasycenia gazem obliczona na podstawie impedancji akustycznej, rozkładu  $V_p/V_s$ , AVO product oraz wartości amplitud z tras sejsmicznych; Sw — krzywa nasycenia wodą; CDP — wspólny punkt głębokościowy

**Fig. 14.** Gas saturation estimation calculated on the basis of acoustic impedance,  $V_p/V_s$  distribution, AVO product and seismic trace amplitudes; Sw — water saturation curve; CDP — common depth point

AVO), inne — do ilościowej interpretacji poszczególnych parametrów, mimo że w sejsmice mierzony jest efekt skumulowany wszystkich parametrów.

Szczególnie istotny jest fakt dostępności danych o rozkładzie prędkości fali poprzecznej, która jest tylko w bardzo niewielkim stopniu uzależniona od rodzaju medium nasycającego skały. Pomocne może być także wykorzystanie wyników inwersji elastycznej.

Wszystkie obliczone atrybuty sejsmiczne wnoszą istotne informacje w określanie rozkładu parametrów zbiornikowych i zailenia.

W wypadku ilościowej estymacji parametrów kluczowe znaczenie mają korelacje występujące pomiędzy parametrami, oznaczone na podstawie danych geofizyki wiertniczej. Niskie współczynniki korelacji oznaczają, że uzyskane wyniki — nawet na podstawie wielu atrybutów — mogą być obarczone błędem.

Badania przedstawione w artykule zostały wykonane w ramach realizacji projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Informatyzacji nr 4T12B 065 29 pt. *Identyfikacja stref zmienności parametrów petrofizycznych górotworu zapadliska przedkarpackiego na podstawie zróżnicowania pola fal P i PS z wykorzystaniem modeli sejsmicznych*. Autorzy dziękują PGNiG S.A. oraz Geofizyce Toruń Sp. z o.o. i Geofizyce Kraków Sp. z o.o. za udostępnienie danych geofizycznych.

## Literatura

- AVSETH P., MUKERJI T. & MAVKO G. 2005 — Quantitative Seismic Interpretation. Applying Rock Physics to Reduce Interpretation Risk. Cambridge University Press, Cambridge-New York-Melbourne.
- BARAN U., GLINIĄK E., JAWOR E. & URBANIEC A. 1999 — Perspektywność kompleksu górnej jury w rejonie Bochnia-Dębica w świetle badań sejsmicznych i wyników geologiczno złożowych, [W:] Przemysł naftowy i nauka — razem w XXI wiek. Karpaska Konferencja Naukowa, Raba Niżna, 19–21 maja 1999. PGNiG, Geonafta, Kraków: 85–94.
- BAŁA M. 2008 — Obliczenie teoretycznych wartości prędkości fal podłużnych i poprzecznych dla odwiertów, [W:] Kowalczyk J., Pietsch K., Bała M. & Kobylarski M. Identyfikacja stref zmienności parametrów petrofizycznych górotworu zapadliska przedkarpackiego na podstawie zróżnicowania pola fal P i PS z wykorzystaniem modeli sejsmicznych. Projekt badawczy MNiI (KBN) nr 4T12B 065 29. Arch. Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH, Kraków.

CONNOLLY P. 1999 — Elastic Impedance. *The Leading Edge*, 18, 4: 438–452.

DUFFOUR J., SQUIRES J., GOODWAY W.N., EDMUNDS A. & SHOOK I. 2002 — Integrated geological and geophysical interpretation case study, and Lamé rock parameter extractions using AVO analysis on the Blackfoot 3C-3D seismic data, southern Alberta, Canada. *Geoph.*, 67: 27–37.

FLOREK R., GÓRKA A. & ZACHARSKI J. 2006a — Wpływ architektury mezo-paleozoicznego podłoża miocenu na warunki migracji i akumulacji węglowodorów w utworach cenomanu i części przedgórzia [W:] Problemy techniczne i technologiczne pozyskiwania węglowodorów a zrównoważony rozwój gospodarki. *Pr. Inst. Nafty i Gazu*, 137: 231–239.

FLOREK R., GÓRKA A. & ZACHARSKI J. 2006b — Możliwości generacji i akumulacji węglowodorów w utworach mezo-paleozoicznych rejonu Grobla — Strzelce Wielkie — Rajsko, jako przykład schematu systemu naftowego przedgórzia Karpat, [W:] Problemy techniczne i technologiczne pozyskiwania węglowodorów a zrównoważony rozwój gospodarki. *Pr. Inst. Nafty i Gazu*, 137: 39–43.

GAISER J.E. 2000 — Advantages of 3-D PS-wave data to unravel S-wave birefringence for fracture detection, [In:] 70<sup>th</sup> Annual International Society of Exploration Geophysicists Meeting and Exposition, Houston, Texas: 1201–1204.

GRZYWA E., KASPRZYK M. & PRZYBYŁO A. 2005 — Opracowanie badań sejsmicznych temat: Krzczów-Rajsko 2D-3C, Geofizyka Toruń Sp. z o.o. Arch. PGNiG S.A.

HAMPSON D.D., SCHUELKE J.S. & QUIREIN J.A. 2001 — Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data. *Geoph.*, 66, 1: 220–236.

KOBYLARSKI M. 2008 — Zmienność pola fal podłużnych i przemiennych jako źródło informacji o parametrach petrofizycznych górotworu przedgórzia Karpat. Arch. WGGiOŚ AGH, Kraków.

KOBYLARSKI M., PIETSCH K. & KOWALCZUK J. 2008 — Modelowanie pól fal P i PS jako narzędzie konstrukcji modeli prędkości fal podłużnych i poprzecznych. *Geol. AGH*, 34, 2: 285–300.

KRIEF M., GARAT J., STELLINGWERFF J. & VENTRE J. 1989 — A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (Full-waveform sonic). *The Log Analyst*, 31: 355–369.

MINEAR J.W. 1982 — Clay models and acoustic velocities, [In:] 57<sup>th</sup> AIME Society of Petroleum Engineers annual technical conference and exhibition, 26 Sep 1982, New Orleans, USA. Pap. SPE11031.

OSTRANDER W.J. 1984 — Plane-wave reflection coefficients for gas sands at non-normal incidence. *Geoph.*, 49: 1637–1648.

TOSAYA C.A. & NUR A. 1982 — Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks. *Geoph.*, 9: 5–8.

VARGA R.M., BANCROFT J.C. & STEWART R.R. 2007 — Inversion and interpretation of multicomponent seismic data: Willesden Green, Alberta. [In:] 2007 CSPG CSEG Joint Convention: 350–354.

Praca wpłynęła do redakcji 20.02.2008 r.

Po recenzji akceptowano do druku 19.05.2008 r.