

ZŁOŻA SOLI KAMIENNEJ Z REJONU WYNIESIENIA ŁEBY NA SEKCJACH PSEUDOIMPEDANCJI AKUSTYCZNEJ W KONTEKŚCIE BUDOWY PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW

ROCK SALT DEPOSITS OF THE ŁEBA ELEVATION ON PSEUDOIMPEDANCE ACOUSTIC SECTIONS FOR CONSTRUCTION OF UNDERGROUND STORAGE

Ewa Kawalec-Latała – Zakład Geofizyki, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Problematyka artykułu ściśle związana jest z budową podziemnych magazynów. Dotyczy wstępnego rozpoznania i kwalifikacji złoża. Podziemne składowanie rozważane jest dla celów magazynowania strategicznych rezerw węglowodorów, sekwestracji dwutlenku węgla CO₂ oraz składowania odpadów o wysokim stopniu radioaktywności. Złoża soli kamiennej spełniają odpowiednie warunki do budowy takich magazynów. W Polsce są to cechsztyńskie złoża soli w rejonie Wyniesienia Łeby i monokliny przedsudeckiej. Warunkiem powodzenia takiego zagospodarowania złoża jest prawidłowe rozpoznanie wszystkich niejednorodności w budowie pokładu soli. Powierzchniowe pomiary sejsmiczne są ekonomicznym źródłem pozyskiwania takich informacji. Wykonanie inwersji sekcji sejsmicznych w celu otrzymania sekcji pseudoimpedancji akustycznej prowadzi do uzyskania przybliżonego rozkładu impedancji akustycznej. To pozwala na wydobycie informacji bezpośrednio powiązanych z budową geologiczną. W artykule przedstawiono syntetyczne sekcje pseudoimpedancji akustycznej, generowane dla modelu, wzorowanym na złożu soli kamiennej Mechelinka z rejonu Wyniesienia Łeby. Załączone sekcje ilustrują jak cechy ważne dla lokalizacji podziemnego zbiornika, takie jak niejednorodności lito-facjalne w wykształceniu złoża i jego przestrzennym ułożeniu typowe dla złoża Mechelinka rejonu Wyniesienia Łeby odzwierciedlają się sekcjach pseudoimpedancji akustycznej.

The subject is strongly related to underground storage. The work deals with initial recognition and qualification of salts deposit. Underground reservoirs are very interesting as the objects for storage of hydrocarbons and wastes: carbon dioxide CO₂ sequestration and highly radioactive waste HLW. In salt deposits there are favorable conditions for construction of such reservoirs. Zechstein rocks salts of Łeba elevation and of the Fore-Sudetic Monocline have been recognized in Poland. A basic requirement is careful investigations of inhomogeneities within the salt deposit. All changes of thickness and lithology should be especially examined and predicted before the underground location is fixed. A seismic survey is the most economical source of detailed subsurface information. Inversion of seismic section extracts additional information from seismic data. Process effectively transforms seismic information into the geological domain. Pseudoimpedance acoustic section gives the possibility to bind very closely the acoustic impedance with subsurface structure. The paper presents the synthetic seismic section and pseudoimpedance section constructed for the simplified data from salts deposit Mechelinka of Łeba elevation. The synthetic pseudoimpedance acoustics sections presented in this paper show how significant changes of thickness and lithology typical for Zechstein salts deposits can be revealed in seismic synthetic sections.

Wprowadzenie

Utrzymanie odpowiedniego poziomu cywilizacyjnego i jego rozwój pociągają za sobą konieczność zapewnienia nieprzerwanych dostaw energii. Wymusza to konieczność zapewnienia możliwości długoterminowego składowania węglowodorów ciekłych i gazowych. Ponadto rezerwy krajowe ropy naftowej i gazu są czynnikiem warunkującym podniesienie bezpieczeństwa energetycznego kraju. Podziemne składowanie rozważane jest dla celów magazynowania strategicznych rezerw węglowodorów oraz składowania odpadów o wysokim stopniu radioaktywności HLW, a także sekwestracji dwutlenku węgla CO₂.

Magazyny zlokalizowane w strukturach geologicznych muszą spełniać określone, ściśle ustalone kryteria. Przede wszystkim, wymagana jest ich bezwzględna szczelność oraz brak reakcji paliwa ze skałą otaczającą, stosunkowo niewielka głębokość występowania oraz duża pojemność i łatwość pozyskiwania przechowywanych substancji. W tym aspekcie

w świetle światowych doświadczeń złoża soli kamiennej stwarzają doskonałe warunki do lokalizacji takich zbiorników. Właściwości fizyczne soli pozwalają na ługowanie dużych i statecznych zbiorników bez dodatkowych zabiegów wzmacniających. Z właściwości petrochemicznych jako szczególnie korzystne w kontekście budowy podziemnych zbiorników wyróżnia się: obojętność chemiczną, bardzo niską przepuszczalność, jednorodność w dużych partiach złoża. Wady tych magazynów wynikają z relatywnie wysokich kosztów inwestycyjnych i operacyjnych

Wyługowane w utworach solnych magazyny kawernowe stanowią ok. 9% magazynów na świecie. Magazyny te, są droższe od ulokowanych w złożach ropy i gazu, ale mają wiele zalet wynikających z właściwości soli. Możliwy jest szybki i pełny odbiór paliwa, bez zmian jego parametrów (brak reakcji soli z paliwem). Po zakończeniu funkcji magazynowej kawerny solne mogą służyć jako składowiska uciążliwych i niebezpiecznych odpadów. Korzystne warunki do budowy takich kawern oferują miększe (pow. 100 m grubości) złoża pokładowe soli kamiennej

o jednorodnej i prostej budowie. W Polsce są to cechsztyńskie złoża soli w rejonie Zatoki Puckiej i monokliny przedsudeckiej oraz kompleksy cechsztyńskich soli kamiennych w wysadach solnych [1]. Sole kamienne w wysadach solnych charakteryzują grubość soli sięgająca kilkuset metrów. To jest korzystne dla budowy zbiornika, jednak bardzo skomplikowana budowa wewnętrzna wysadów solnych utrudnia wykonanie wielu kawern. Lepsze warunki geologiczne są w pokładach soli i to przemawia za lokalizacją zbiorników w pokładowych złożach soli kamiennej. Dobrą lokalizacją pierwszej serii podziemnych zbiorników (do około 15 mln ton pojemności) jest rejon Mechelinek (gmina Kosakowo, na północ od Gdyni), gdzie na powierzchni około 6 km² występuje dogodnie złożone soli pokładowe [2]. Zbiorniki te budowane są w kawernach solnych przez ługowanie złoża otworami z powierzchni terenu. Uzyskana w procesie ługowania solanka po rozpuszczeniu i rozcieńczeniu przyczyni się do poprawy stanu środowiska naturalnego Bałtyku [8]. Interesujący jest więc, również aspekt ekologiczny tej lokalizacji. Warunkiem powodzenia takiego przedsięwzięcia jest dokładne rozpoznanie budowy wewnętrznej złoża.

Ośrodki geologiczne, w których występują pokładowe złoża soli kamiennej, charakteryzują się wysoką niejednorodnością sejsmogeologiczną. Znaczny kontrast właściwości sprężystych soli w stosunku do skał otaczających oraz duże różnice właściwości sprężystych w obrębie utworów samego cechsztynu generują wysokie współczynniki odbicia. Możliwe zmiany typu geometrycznego związane są zarówno z przebiegiem procesów sedymentacyjnych jak i późniejszymi przeobrażeniami w obrębie złóż soli kamiennej. Wiąże się to z powstawaniem soli wtórnych – descendentnych oraz zmienną miąższością soli siarczanowych – anhidrytów w stosunku do soli chlorkowych. Te ostatnie są przedmiotem zainteresowania jako potencjalne obszary magazynowe [1,10].

Metoda inwersji trasy sejsmicznej, rejestrowanej powierzchniowo, w celu obliczenia trasy pseudoimpedancji akustycznej jest operacją odwrotną do procedury obliczania sejsmogramów syntetycznych. Istnieje wiele modyfikacji algorytmów obliczania tras pseudoimpedancji akustycznej [11]. Uzyskana na podstawie inwersji trasy sejsmicznej tzw. pseudoimpedancja akustyczna nie stanowi pełnej informacji o jej wartości. Wynika to z ograniczonego zakresu częstotliwości rejestrowanego powierzchniowo sygnału sejsmicznego. Otrzymana informacja odpowiada tej części informacji, jaka zawarta jest w krzywych profilowania otworów wiertniczych po filtracji do zakresu częstotliwości rejestrowanego sygnału sejsmicznego. Dla wielu zagadnień interpretacyjnych jest to zakres wystarczający [4,5]. Precyzja interpretacji wzrasta, zarówno w miarę rozszerzania się zakresu częstotliwości jak i wzrostu częstotliwości dominującej sygnału [8].

Zarys budowy geologicznej cechsztyńskiej soli kamiennej w rejonie Wyniesienia Łeby

Cechsztyńska formacja solonośna pokrywa około 2/3 powierzchni Polski zalegając na ziemiach środkowych, zachodnich i północno-zachodnich. Jej normalna głębokość w centrum polskiej części zagłębia cechsztyńskiego przekracza 1500 m i maleje stopniowo w kierunkach ku peryferiom południowym i wschodnim do kilkuset metrów. Jednakże w kilku regionach geologicznych występuje ona na głębokościach mniejszych: od 2000 m do 500 m. Są to przede wszystkim: Wyniesienie Łeby,

tj. obszar rozciągający się od południka Łeby na zachodzie, po zatokę Pucką na wschodzie oraz wycinek monokliny przedsudeckiej o przebiegu NW – SE wzdłuż Odry, na odcinku od okolic Nowej Soli, poprzez okolice Głogowa i dalej na południowy wschód. W granicach tego wycinka znajduje się większa część LGOM-u. W obu regionach występują pokładowe złoża cechsztyńskich soli kamiennych, perspektywiczne w kontekście budowy podziemnych zbiorników [1,10].

W rejonie Wyniesienia Łeby przeciętna głębokość zalegania spagu cechsztynu równa jest - 1000 m ppm, a stropu – 685 m ppm. Formację solonośną tworzy zespół warstw ewaporatów tj. węglanów (wapienie, dolomity), siarczanów (anhidytry) i chlorków (sole kamienne) oraz skał ilastych. Pokład najstarszej soli kamiennej zalega poziomo lub prawie poziomo na przeciętnych głębokościach od -780 m ppm (strop złoża) do -940 m ppm (spag). Rozprzestrzenia się on na znacznym obszarze, ale nie w sposób ciągły. Przeciętna miąższość pokładu równa jest 160 m, jednakże miąższość ta nie jest stała: Wyraźnie zaznacza się jej zmienność, przy czym lokalnie jej wartość maleje do zera. Przyczyną tej zmienności jest skrasowienie stropowej części złoża oraz rozpuszczenie skał solnych reprezentujących wyższe ogniwa cechsztynu. Zjawiska erozji rozwijające się w stropie pokładu najstarszej soli kamiennej doprowadziły do utworzenia się głębokich rynien i dolin oraz szeregu innych form krasowych. Miejskami doszło do zupełnej erozji pokładów solnych. Na tak zerodowanym podłożu spoczywają utwory wtórne. Sole wtórne są skałami o specyficznej, przeważnie grubokrystalicznej strukturze, czasami nierównomiernie zanieczyszczonymi anhidrytem i polihalitem oraz zawiesiną ilową [9]. Według nowszych badań uważa się, że te „zanieczyszczone” sole są odmianą facjalną soli „czystych”, a nie osadem krasowym [2]. Na obrzeżach omawianego obszaru, w pewnych liniach przekrojowych należy spodziewać się zmian facjalnych, tzn. przechodzenia facji chlorkowej w siarczanowo-węglanową. Lokalne zaburzenia w zaleganiu złoża mogą wiązać się także z nieciągłymi deformacjami podłoża przedcechsztyńskiego. Niezależnie od genezy powstania niejednorodności w wykształceniu złoża, z uwagi na ich dużą zmienność, możliwość ciągłej ich detekcji jaką mogą zapewnić odpowiednio przetworzone dane sejsmicznych pomiarów powierzchniowych.

Syntetyczne sekcje pseudoimpedancji akustycznej

Do modelowania syntetycznych sekcji pseudoimpedancji akustycznej wykorzystano informatyczny system INWERS. Modelowania przebiegały w dwóch etapach. W pierwszym, dla zadanego *a priori* sejsmogeologicznego modelu ośrodka, obliczono syntetyczne sekcje, aproksymujące rzeczywiste sekcje sejsmiczne, rejestrowane w terenie. W drugim, wykonano ich inwersję w kierunku obliczania pseudoimpedancji akustycznej.

Konfiguracja geologiczna modeli inspirowana jest budową geologiczną z rejonu Wyniesienia Łeby. Są to modele teoretyczne, których parametry są zgodne z parametrami sejsmogeologicznymi rejonu i odnoszą się do konkretnej części złoża. Przy konstrukcji modeli formacje nadkładowe zostały w modelach uproszczone. W przekroju geologicznym formacji cechsztyńskiej, uwzględniono występowanie soli wtórnych i anhidrytów w sąsiedztwie soli kamiennej, co pozwala ocenić możliwości detekcji tych stref na sekcjach pseudoimpedancji

akustycznej.

Do budowy modeli sejsmogeologicznych zawierających pokładowe złoża soli wykorzystano parametry sprężyste typowe dla cechsztynu oraz formacji nadkładowych dostępne w literaturze [3,7]. Utworzono dwa modele sejsmogeologiczne. Model I z rejonu Wyniesienia Łeby wzorowany jest na złożu z okolic Władysławowa. Model ten upraszcza budowę nadkładu cechsztynu. W formacji cechsztyńskiej, uwzględniono występowanie soli wtórnych i anhydrytów w sąsiedztwie soli kamiennej poprzez wprowadzenie wartości sprężystych typowych dla tych utworów cechsztynu. Model II jest modyfikacją modelu I, polegającą na uwzględnieniu ciągłych zmian stopnia przeobrażenia soli wtórnych w środkowej części. Konsekwencją tego mogą być zmiany właściwości sprężystych, uwzględnione w modelu II poprzez poziome zmiany prędkości. Modele utworzono tak, aby ocenić efektywność interpretacji sekcji pseudo-impedancji akustycznej w przedstawionym rejonie.

Sejsmogramy syntetyczne obliczono poprzez spłot trasy impulsowej z sygnałem. Jako typ sygnału zadano sygnał Puzyrieva - $s(t)$

$$s(t) = \exp(-\beta^2 \cdot t^2) \cdot \sin(2\pi f_0 t \pm \varphi_0) \quad (1)$$

Parametrami sygnału są: częstotliwość dominująca sygnału - f_0 , współczynnik tłumienia - β , faza początkowa - φ_0 .

Modelowania wykonano bez uwzględniania szumu. Obecność szumu obniża jakość odwzorowania stref niejednorodności geologicznych. Trasy sejsmiczne, a w konsekwencji sekcje pseudoimpedancji akustycznej generowano dla częstotliwości

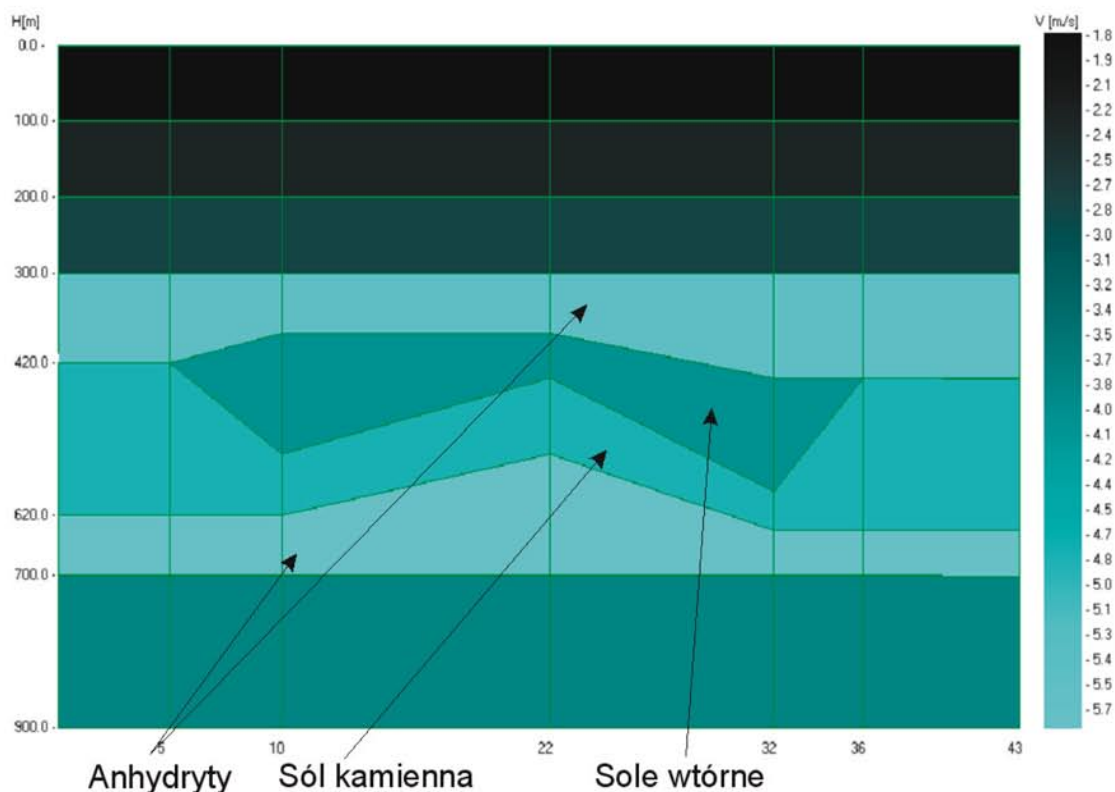
dominująca sygnału $f_0 = 60$ Hz o współczynniku tłumienia $\beta = 30$ i fazie początkowej $\varphi_0 = 0$. Jest to sygnał dość długi, co pogarsza rozdzielczość, ale z uwagi na nieuwzględnianie w modelowaniach szumu, nie prowadzi do zbytnej idealizacji wyników.

Wprowadzenie do modelu sejsmogeologicznego, soli wtórnych i anhydrytów pozwala ocenić możliwości detekcji tych stref na sekcjach pseudo-impedancji akustycznej w zależności od kontrastu właściwości sprężystych, geometrii i jakości sygnału sejsmicznego. Interesująca z punktu widzenia lokalizacji podziemnego magazynu formacja cechsztyńska na syntetycznych sekcjach sejsmicznych i sekcjach pseudo-impedancji akustycznej, dla których skalą pionową jest skala czasowa występuje w zakresie czasu 0,27s – 0,45s. Na modelach sejsmogeologicznych mieści się w zakresie głębokości 300 m - 700 m.

Modyfikacja modelu II dotyczy wprowadzenia ciągłej zmiany parametrów sprężystych symulujących zmianę stopnia przeobrażenia w obszarze soli wtórnych pomiędzy 10 a 32 trasą (numeracja tras na osi poziomej rysunków). Centralnie (trasa 22) w obszarze najmniejszej miąższości soli wtórnych symulowano najniższy stopień ich przeobrażenia. Zmiana ta zaznaczona jest jaśniejszym kolorem na rysunku 2.

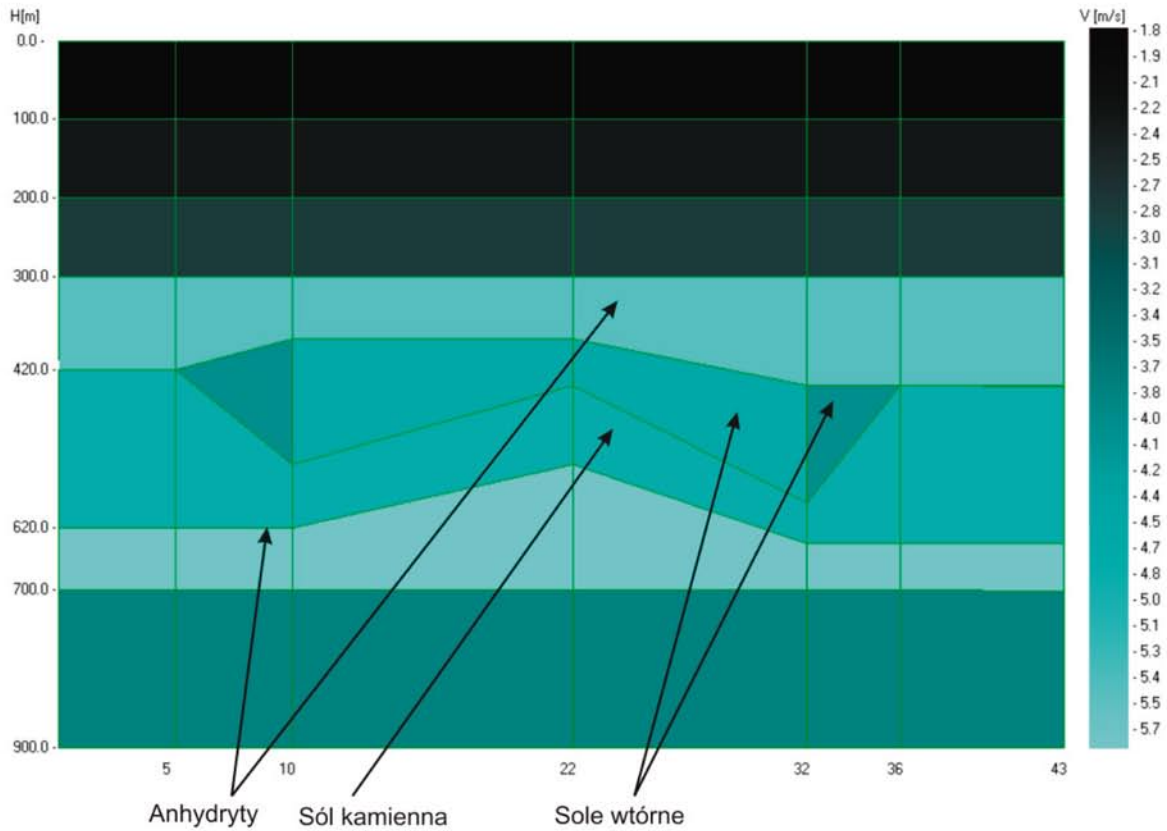
Sekcje pseudoimpedancji akustycznej (rys. 5, 6), uzupełniono o skalę barwną, obrazującą relatywne zmiany pseudoimpedancji akustycznej. Skalą pionową modelu sejsmogeologicznego jest skala głębokościowa. Skalą pionową sekcji pseudoimpedancji akustycznej i towarzyszącą jej skalą barwną opisującą względne zmiany prędkości jest skala czasowa. Graficzna prezentacja modelu I przedstawiona jest na rysunku 1, a modelu II na rysunku 2.

Sejsmogeologiczny model

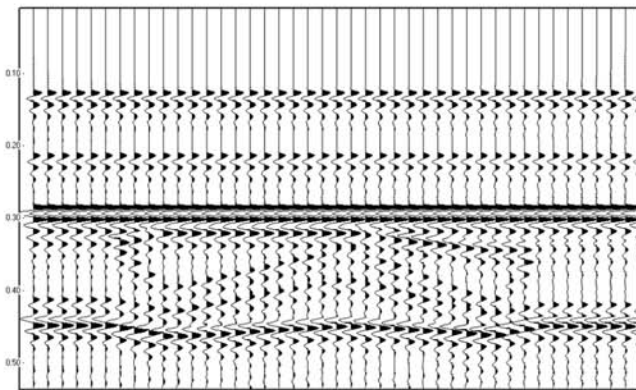


Rys.1. Uproszczony model I budowy sejsmogeologicznej ośrodka
Fig.1. Simplified seismological model I

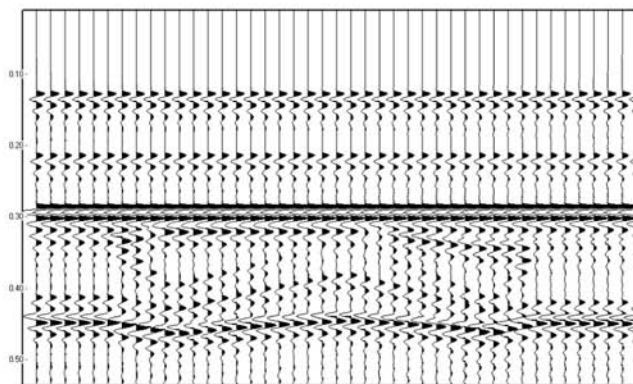
Sejsmogeologiczny model



Rys. 2. Uproszczony model II budowy sejsmogeologicznej ośrodka
Fig. 2. Simplified seismological model II



Rys.3. Syntetyczna sekcja sejsmiczna generowana dla modelu I. Sygnał o częstotliwości dominującej 60 Hz i współczynnika tłumienia $\beta=30$
Fig. 3. Synthetic section generated for model I



Rys. 4. Syntetyczna sekcja sejsmiczna generowana dla modelu II
Fig. 4. Synthetic section generated for model II

Syntetyczne sekcje sejsmiczne generowane dla modelu I i II przedstawione są odpowiednio na rysunkach 3 i 4.

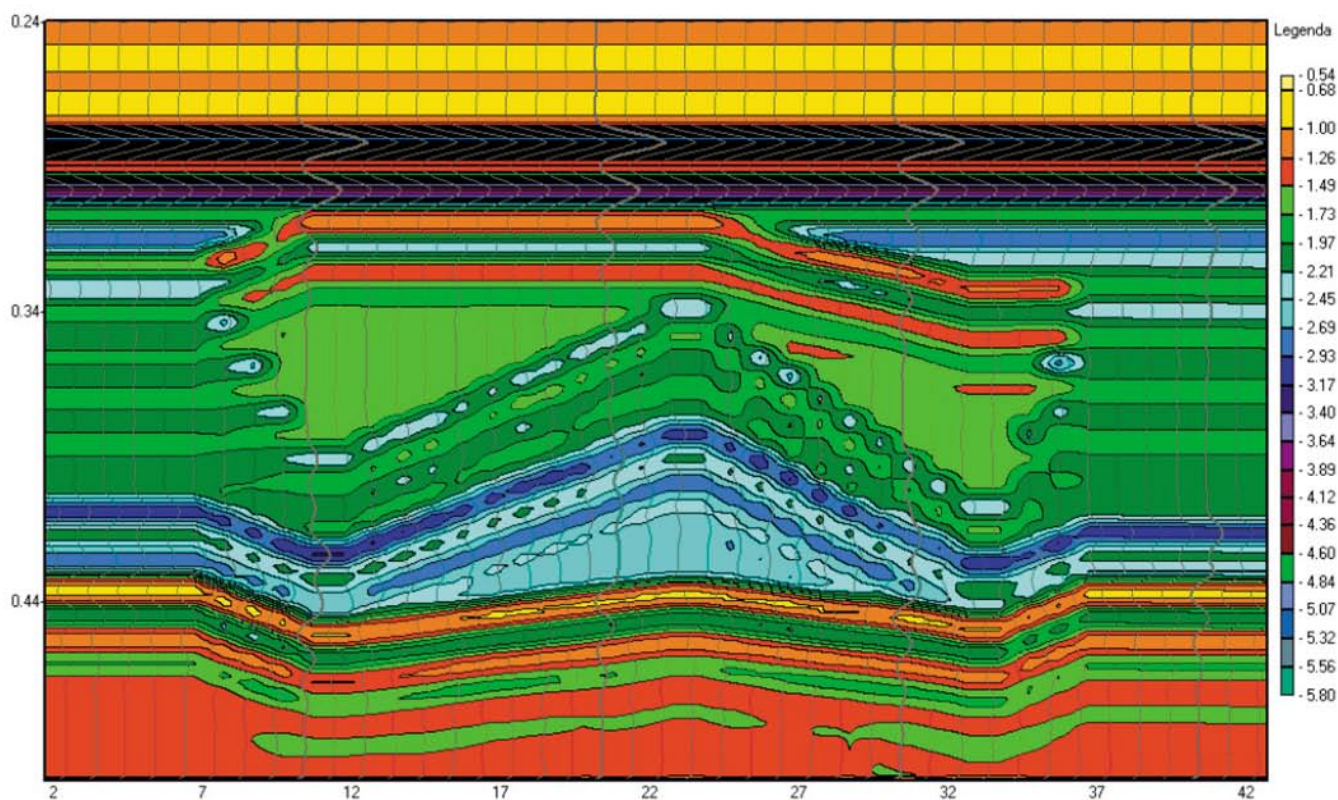
Na sekcjach sejsmicznych z rysunków 3 i 4 zasadnicze niejednorodności w budowie cechsztynu są widoczne, ale już zdecydowanie trudne do interpretacji są zmiany litologiczne w obrębie soli wtórnych.

Sekcje pseudoimpedancji akustycznej otrzymane w wyniku inwersji sekcji sejsmicznych (rys. 3 i 4), przedstawione są na rysunku 5 dla modelu I i rysunku 6 dla modelu II. Na obu rysunkach przedstawiony jest powiększony fragment sekcji pseudoimpedancji akustycznej obejmujący złożę soli wraz z towarzyszącymi mu anhydrytami i solami wtórnie przeobrażonymi.

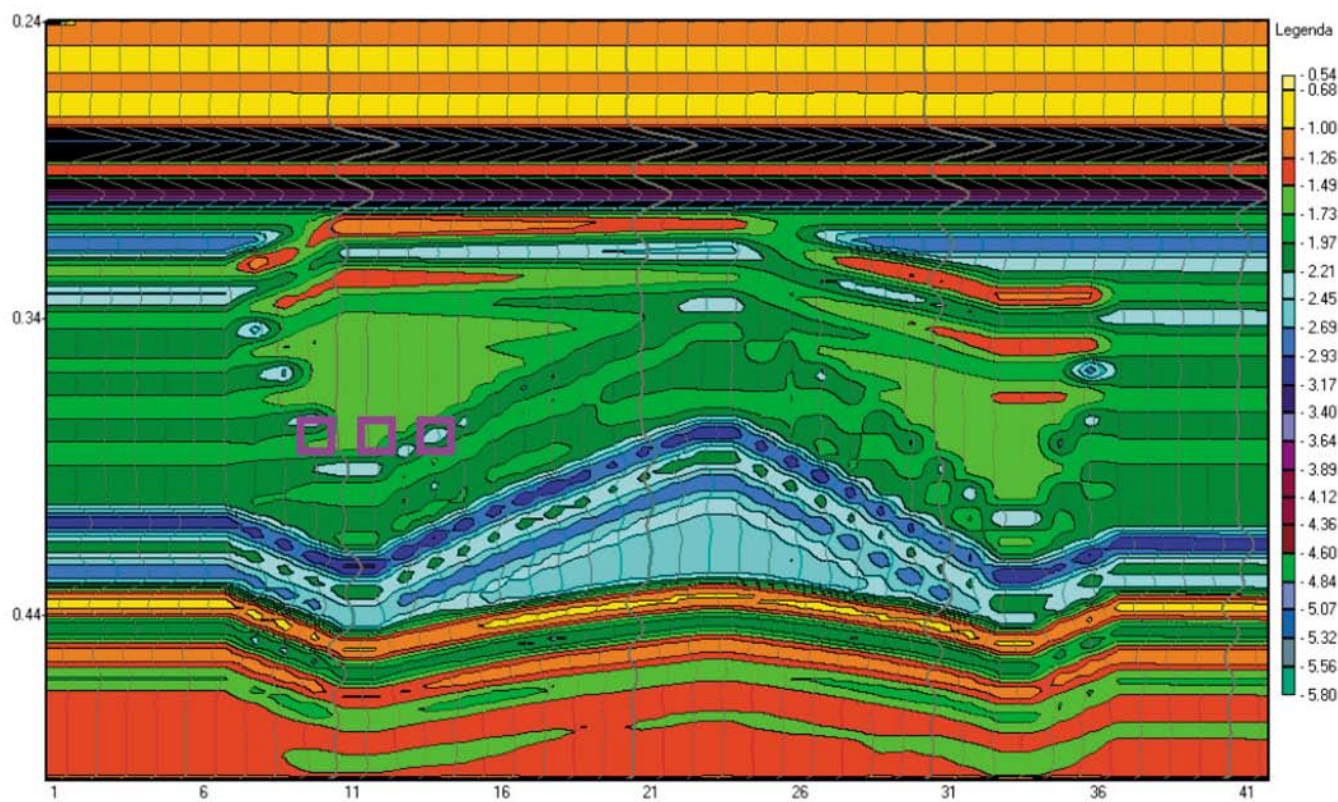
Przedstawione modelowania wskazują, że zdecydowanie lepsze jest odwzorowanie, a tym samym możliwość interpretacji niejednorodności w budowie cechsztynu na syntetycznych sekcjach pseudoimpedancji akustycznej niż na sekcjach sejsmicznych. Wyraźnie widoczne są zmiany powodowane przez różnice w stopniu przeobrażenia soli wtórnych, uwzględnione w modelu I i w modelu II. Analiza generowanych dla odpowiednio skonstruowanych modeli sejsmogeologicznych syntetycznych sekcji pseudoimpedancji akustycznej, pozwoli na uzyskanie wstępnej informacji o sposobie odzwierciedlania się na rzeczywistych sekcjach spodziewanych w danym rejonie niejednorodności geologicznych. Będzie to możliwe, zarówno w aspekcie litologiczno-facjalnym jak i geometrycznym, związanym z przestrzennym ułożeniem warstw.

Podsumowanie

Budowa podziemnych zbiorników i późniejsze ich wykorzystanie jako magazyny, powinno być wykonywane jedynie



Rys.5. Syntetyczna sekcja pseudoimpedancji akustycznej generowana dla modelu I. Powiększenie
 Fig. 5. Synthetic pseudo-impedance acoustic section generated for model I. Magnification



Rys. 6. Syntetyczna sekcja pseudoimpedancji akustycznej generowana dla modelu II. Powiększenie
 Fig. 6. Synthetic pseudo-impedance acoustic section generated for model II. Magnification

w partiach złoże soli o jednorodnej wewnętrznej strukturze i poziomym lub prawie poziomym warstwowaniu. Przedstawiono modelowania syntetycznych sekcji pseudoimpedancji akustycznej dla modeli sejsmogeologicznych, wzorowanych na złożach soli kamiennej z rejonu Wyniesienia Łeby z okolic Władysławowa. Modelowania syntetycznych sekcji pseudoimpedancji akustycznej, wykonane dla danej konfiguracji geologicznej złoże soli z uwzględnieniem anhydrytu i wtórczej soli wtórnych o różnym stopniu przeobrażenia dostarczyły pozytywnej odpowiedzi o możliwości detekcji niejednorodności występujących w złożu soli kamiennej. Prezentowana praca sugeruje, że analiza syntetycznych sekcji pseudoimpedancji akustycznej generowanych dla odpowiednio skonstruowanych modeli sejsmogeologicznych pozwoli na uzyskanie wstępnej informacji o sposobie odzwierciedlania się na rzeczywistych

sekcjach, spodziewanych w danym rejonie niejednorodności geologicznych. Dla ustalenia obszarów ewentualnej eksploatacji i zagospodarowania złoże soli ma to istotne znaczenie. Wskazane jest więc poszerzenie badań o interpretację sejsmiczną sekcji pseudoimpedancji akustycznej otrzymanych w wyniku inwersji sekcji sejsmicznych. Interpretacja geologiczna sejsmicznych danych otrzymanych metodą powierzchniowych pomiarów pozwala na zachowanie ciągłości w śledzeniu złoże soli kamiennej. Stanowi też wiarygodne uzupełnienie danych pomiędzy otworami wiertniczymi. Jakość interpretacji będzie rosła w miarę poprawy jakości materiału sejsmicznego.

Zrealizowano w ramach działalności statutowej Katedry Geofizyki AGH (nr. 11.11.140.769)

Literatura

- [1] Czapowski G. 2006, *Geologia permskich struktur i złóż solnych w Polsce – aktualny stan wiedzy i perspektywy zagospodarowania*, Przegląd Geologiczny, vol 54: 301-302
- [2] Czapowski G. i Tomassi-Morawiec H. 2006, *Geologia permskiego pokładowego złoże soli kamiennej w rejonie Zatoki Gdańskiej – aktualny stan wiedzy*, Przegląd Geologiczny, vol. 54: 309-310
- [3] Grad M. 1987, *Prędkość fal sejsmicznych w pokrywie osadowej platformy wschodnioeuropejskiej*. Kwart. Geol., tom 31
- [4] Kawalec-Latała E. 2003, *Rozpoznawanie niejednorodności pokładowych złóż soli w aspekcie budowy podziemnych zbiorników*. Miesięcznik WUG nr 5, str. 45-46
- [5] Kawalec-Latała E. 2006, *Wykrywanie zmian litologicznych w pokładach soli metodami powierzchniowymi*. ZSMGiG, nr XXIX, Geotechnika i budownictwo specjalne, 189-194
- [6] Kawalec-Latała E., Markiewicz A. 2007, *Zastosowanie syntetycznych sekcji pseudo-impedancji akustycznej do odwzorowania geologii w rejonie potencjalnej budowy kawernowego magazynu węglowodorów w soli NaI NW części LGOM*. [W:] Mater. ZSMGiG, Nr XXX, Geotechnika i Budownictwo Specjalne, s. 315-324
- [7] Kawalec-Latała E. 2008, *The influence of seismic wavelet on the resolution of pseudoimpedance section for construction of underground storage – Wpływ sygnału sejsmicznego na rozdzielczość sekcji pseudoimpedancji akustycznej w rejonie budowy podziemnych magazynów*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi Mineral Resources Management 2008 t. 24 z. 2/3 s. 387–397. LF 10
- [8] Krynicki T. 1980, *Własności sprężyste utworów cechsztyńskich*. Kwart. Geol., tom 24, nr 3
- [9] Pieńkowski G. 2006, *Magazynowanie węglowodorów w strukturach solnych w Polsce w świetle założeń projektu NATO-CCMS 982185*. Prz. Geol., vol. 54: 312-313. Warszawa
- [10] Pieńkowski G., Wagner R. 2006, *Magazynowanie węglowodorów w strukturach solnych PROJECT NATO – CCMS – oferta dla Polski, Europy i NATO, Konferencja Paliwowo-Naftowa, Uniwersytet Warszawski 22-23 marzec*
- [11] Poborski J. 1975, *O halogenicznych zjawiskach krasowych w permie górnym na wyniesieniu Łeby*. Prz. Geol. Nr 7
- [12] Ślizowski W. 2006, *Możliwości zagospodarowania podziemnych złóż i struktur solnych w Polsce na składowisko odpadów promieniotwórczych*, Prz. Geol. 54, str 314
- [13] Veeken i Da Silva. 2004, *Seismic inversion and some of their constrains*, First Break 22 (6) 47-70

Artykuł recenzował prof. dr hab. inż. Zbigniew Kasina
Rękopis otrzymano 8.04.2011 r. *2297

