

BAZA DANYCH ORAZ SZCZEGÓŁOWY MODEL GEOLOGICZNY 3D DLA PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA CO₂ W REJONIE BĘŁCHATOWA NA PRZYKŁADZIE STRUKTURY BUDZISZEWIC

DATABASE AND DETAILED 3D GEOLOGICAL MODEL FOR CO₂ UNDERGROUND STORAGE IN THE BĘŁCHATÓW REGION, A CASE STUDY OF THE BUDZISZEWICE STRUCTURE

JACEK CHEŁMIŃSKI¹, ŁUKASZ NOWACKI¹, BARTOSZ PAPIERNIK², MACIEJ TOMASZCZYK¹

Abstrakt. Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania wymagała budowy bazy danych oraz stworzenia modeli struktur geologicznych będących potencjalnymi zbiornikami CO₂. Archiwalne i zinterpretowane dane zapisano w bazie danych odpowiadającej wymaganiom oprogramowania tworzącego modele przestrzenne 3D.

Zgromadzone dane pozwoliły na konstrukcję statycznych, przestrzennych modeli 3D, składających się z:

– modelu strukturalnego – powstał on na podstawie interpretacji dziewięciu czasowych profili sejsmicznych; zbudowano pięć horyzontów odpowiadających stropom toarku, pliensbachu, synemuru, kajpru oraz wapienia muszlowego oraz stworzono powierzchnie czterech uskoków zlokalizowanych w południowej części obszaru; do budowy horyzontów oraz uskoków zastosowano algorytm interpolujący DSI;

– modelu stratygraficznego – obejmuje on pięć sekwencji stratygraficznych: górny toark, dolny toark, pliensbach, hetang–synemur i retyk, podzielonych na zmienną liczbę proporcjonalnych warstw;

– modelu litologicznego – opracowano go na podstawie krzywych litologicznych z otworów wiertniczych Budziszewice IG 1, Buków 1 oraz Zaosie 2; do jego opracowania wykorzystano sekwencyjny algorytm stochastyczny *Sequential Indicator Simulation*;

– przestrzennego modelu dystrybucji parametrów złożowych – do opracowania modelu zailenia (VSH) i porowatości efektywnej (Pe) wykorzystano stochastyczną warunkowaną (*Conditional*) technikę estymacji – *Sequential Gaussian Simulation* i jej modyfikacje *Gaussian Random Function Simulation*, dostosowane do szybkiego obliczania dużych modeli 3D.

Wypracowana przez zespół metodyka konstruowania statycznych modeli przestrzennych 3D wiąże prace informatyczne z umiejętnością posługiwania się oprogramowaniem umożliwiającym modelowanie przestrzenne 3D.

Doświadczenia zebrane podczas prac nad systemem informatycznym oraz przy budowie przestrzennego modelu 3D struktury Budziszewic pozwolą na znacznie sprawniejsze wyznaczanie kolejnych obszarów geologicznych, potencjalnie nadających się do składowania CO₂.

Słowa kluczowe: sekwestracja CO₂, model 3D, baza danych, struktura Budziszewic.

Abstract. Selection of geological formations and structures for safe underground storage of CO₂ as well as development of a site monitoring program required construction of a database and creation of a model of geological structures that are potential reservoirs of CO₂. Archive and newly interpreted data were input into a database suitable for the requirements of the 3D modelling software. The database resources allowed a construction of static, 3D models composed of the following:

– structural model – created based on nine seismic sections in time domain; five horizons, corresponding with tops of Toarcian, Pliensbachian, Sinemurian, Keuper and Muschelkalk were built as well as surfaces of four faults located in the southern part of the region. The horizons and faults were constructed by applying the DSI algorithm;

– stratigraphic model – contains five stratigraphic sequences: upper Toarcian, lower Toarcian, Pliensbachian, Hettangian–Sinemurian, Rhaetian – divided into a variable number of proportional layers;

– litological model – created based on litological curves in the Budziszewice IG 1, Buków 1 and Zaosie 2 boreholes; sequential stochastic algorithm called “Sequential Indicator Simulation” has been used to construct it;

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa; e-mail: jacek.chelminski@pgi.gov.pl

² Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: papiernik@geol.agh.edu.pl

– 3D model of reservoir parameters distribution - stochastic conditional estimation technique “Sequential Gaussian Simulation” and its modification “Gaussian Random Function Simulation”, adapted to fast calculation of large 3D models, were applied for the development of the volume of shale model (VSH) and effective porosity (Pe) model.

Methodology of the construction of static 3D models developed by the team connects digital computation tasks with the knowledge of usage of the 3D modelling software.

Experience gained during the work upon the informatics system and construction of the 3D model of the Budziszewice structure will greatly aid further potential CO₂ storage site selection and appraisal.

Key words: CO₂ sequestration, 3D model, database, Budziszewice structure.

WSTĘP

Realizacja zadania związanego z rozpoznaniem formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania wymagała budowy bazy danych oraz stworzenia modeli struktur geologicznych będących potencjalnymi zbiornikami CO₂. Archiwalne i zinterpretowane dane zapisano w bazie danych spełniającej wymaganiom oprogramowania tworzącego modele przestrzenne 3D.

Przygotowane zasoby bazy danych pozwoliły na konstrukcję statycznych przestrzennych modeli 3D składających się z modeli: strukturalnego, stratygraficznego, litologicznego oraz z przestrzennych modeli dystrybucji parametrów złożowych (m.in. rozkładu zailenia i porowatości). Tak przygotowane statyczne modele przestrzenne będą wykorzystywane w symulatorach, np. *Eclipse*, do przeprowadzenia symulacji zatłaczania.

BUDOWA BAZY DANYCH

W ramach projektu przewidziano budowę bazy danych, której zasoby będą wykorzystane m.in. do konstrukcji przestrzennych modeli strukturalno-parametrycznych. Podczas konsultacji z zespołem realizującym projekt opracowano strukturę bazy danych, uwzględniającą specyfikę niezbędnych informacji do konstrukcji modeli przestrzennych.

Na podstawie danych zawartych w bazie będzie można przeprowadzić interpretację oraz analizę poszczególnych struktur geologicznych, w tym:

- analizę danych petrologicznych pod kątem zawartości węglanów i minerałów ilastych w próbkach rdzeni;
- analizę danych petrofizycznych na podstawie parametrów filtracyjnych skał zbiornikowych oraz uszczelniających;
- analizę danych geofizyki wiertniczej – podczas prac przy konstruowaniu szczegółowego modelu przestrzennego (3D) struktury Budziszewic, konieczne było wykorzystanie danych karotażowych otworów wiertniczych (tzn. wyników interpretacji profilowań geofizyki wiertniczej). Z uwagi na konieczność umieszczenia w bazie danych informacji karotażowych poddano modyfikacji jej strukturę. Utworzono dodatkowo tablicę, w której zawarte dane uwzględniają charakterystykę ilościową i jakościową dostarczonych danych źródłowych (tab. 1);
- analizę danych hydrogeologicznych dla formacji wodonośnych oraz danych geochemicznych płynów;
- charakterystykę formacji i struktur odpowiednich do geologicznego składowania CO₂.

Aby uzyskać pełny obraz warstw związanych z potencjalnymi miejscami składowania CO₂ zaproponowano ope-

ratorom bazy danych możliwość rozdzielania poszczególnych wydzieleni geologicznych, nadanie im statusu kolektora lub uszczelnienia warstw zbiornikowych.

Efektem końcowym było wykonanie modeli przestrzennych 3D regionalnych i szczegółowych dla potencjalnych poziomów zbiornikowych i uszczelniających.

Utworzona baza danych „Sekwestracja CO₂” podczas kilkumiesięcznej eksploatacji podlegała kolejnym modyfikacjom uwzględniającym sugestie i opinie użytkowników.

Tabela 1

Przykładowe dane karotażowe
Example of well log data

Nazwa otworu	Od	Zailenie	Porowatość całk.	Porowatość efekt.	Kod litologiczny
Niechmirów 2	281,75	42,95	11,17	-999	4
Niechmirów 2	282,25	41,78	10,85	-999	4
Niechmirów 2	282,75	42,12	11,39	-999	4
Niechmirów 2	283,25	37,40	11,85	-999	4
Niechmirów 2	283,75	40,55	11,05	-999	4
Niechmirów 2	284,25	33,17	12,04	-999	4
Niechmirów 2	405,25	16,73	11,77	9,25	5
Niechmirów 2	405,75	21,14	10,87	8,47	5

Uzupełniono bazę danych parametrami określającymi skład fizykochemiczny wód podziemnych i solanek. Przypisane atrybuty pozwoliły na szczegółowe opisanie takich parametrów, jak: przyływ solanek, temperatura, gradient, mineralizacja, poziomy zwierciadła, zawartość pierwiastków i związków chemicznych.

W celu umożliwienia korzystania z zasobów bazy danych „Sekwestracja CO₂” przez wszystkich uczestników projektu, wykorzystano możliwości platformy systemowej Jetro CockpIT jako generatora trójwarstwowych aplikacji, umożliwiającą korzystanie z aplikacji przy pomocy przeglądarki internetowej MS Explorer.

KONSTRUKCJA MODELU STRUKTURALNEGO

Na podstawie interpretacji dziewięciu czasowych profili sejsmicznych (fig. 1) zbudowano powierzchnie pięć horyzontów odpowiadających stropom toarku (Jt), pliensbachu (Jpl), synemuru (Js), kajpru (Tk) oraz wapienia muszlowego (Tw) (fig. 2), jak również stworzono powierzchnie czterech uskoku zlokalizowanych w południowej części obszaru (fig. 3). Do budowy powierzchni horyzontów oraz uskoku zastosowano algorytm interpolujący DSI (*discrete smooth interpolation*), jest to metoda zaproponowana przez Malleta (2002).

Interpretację danych sejsmicznych przeprowadzono w domenie czasu. Taki zapis danych niesie za sobą wiele ograniczeń, np. nie ma możliwości szczegółowej analizy zależności pomiędzy poszczególnymi elementami struktury, gdyż model w domenie czasu nie pozwala na rzeczywiste odzwierciedlenie jej architektury (fig. 4), a co za tym idzie, niemożliwe jest przeprowadzenie dokładnych obliczeń wolumetrycznych i miąższości poszczególnych warstw kolektorowych. Dlatego niezbędna była konwersja poszczególnych elementów z domeny czasu (ms) na domenę głębokości (m).

Konwersja czasowo-głębokościowa polega na przeliczeniu czasu podwójnego przejścia fali sejsmicznej (punkt wzbudzenia fali na powierzchni-reflektor-geofon) na rzeczywistą głębokość w metrach. W tym celu wykorzystuje się znane wartości prędkości fali w poszczególnych ośrodkach – warstwach skalnych. Do stworzenia modelu prędkościowego wykorzystano wartości prędkości średnich uzyskanych w trakcie badań karotażowych w sześciu otworach wiertniczych (Budziszewice IG 1, Buków 1 i 2 oraz Zaosie 1, 2 i 3). Konwersje przeprowadzono w module *velocity* programu goCad.

Ze względu na niewielką pionową rozdzielczość danych sejsmicznych oraz niedoskonałość modelu prędkościowego konieczne było dopasowanie poszczególnych powierzchni horyzontów do wartości ich głębokości uzyskanych w otworach wiertniczych. Błąd ten wahał się od kilku do kilkunastu metrów w zależności od otworu. Dodatkowo model uzupełniono o trzy horyzonty uzyskane w wyniku cyfrowego przetworzenia archiwalnych map strukturalnych (stropy jury górnej i środkowej, spąg powierzchni podkenozoicznej) (fig. 3).

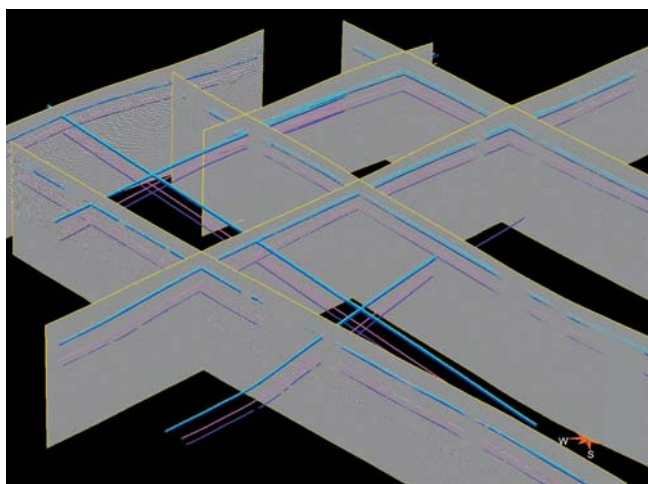


Fig. 1. Wizualizacja pięciu profili sejsmicznych zlokalizowanych w rejonie Budziszewic oraz ich interpretacji w programie goCad

Visualization of five seismic profiles and their interpretations (Budziszewice area, goCad program)

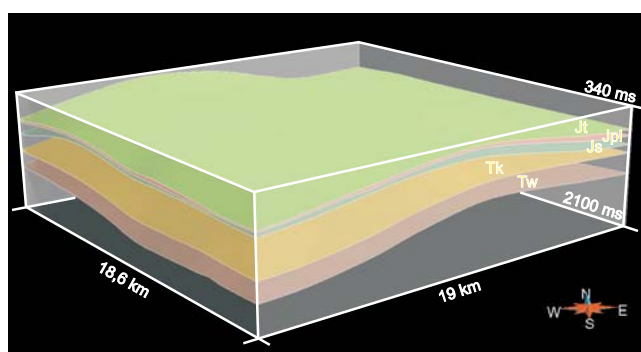


Fig. 2. Powierzchnie pięciu horyzontów powstałe w wyniku interpolacji zinterpretowanych danych sejsmicznych

Tw – wapień muszlowy, Tk – kajper, Js – synemur, Jpl – pliensbach, Jt – toark; wizualizacja w domenie czasu

Surfaces of five stratigraphic horizons created using interpreted seismic data

Tw – Muschelkalk, Tk – Keuper, Js – Sinemurian, Jpl – Pliensbachian, Jt – Toarcian; visualization in time domain

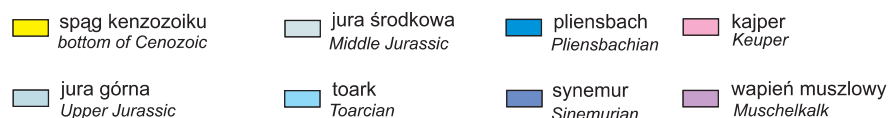
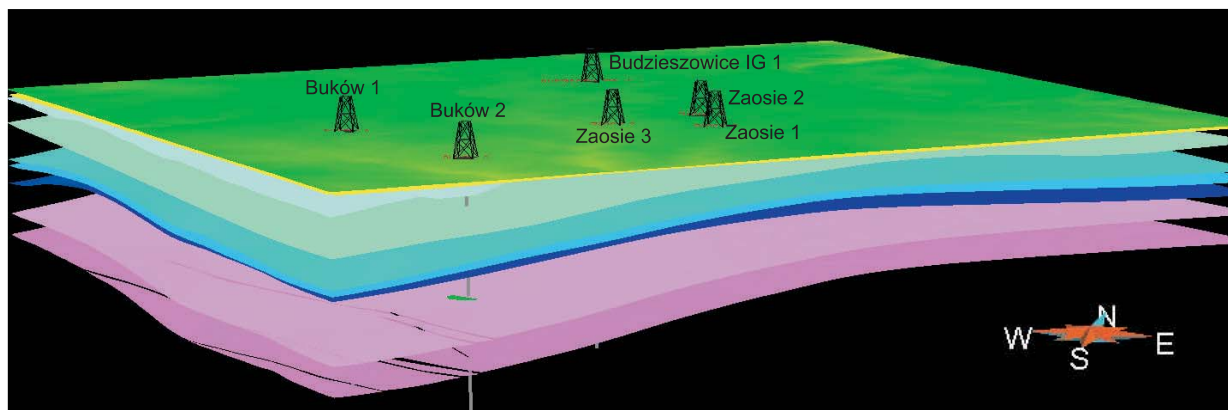


Fig. 3. Model strukturalny struktury Budziszewice – domena głębokości

3D structural model of the Budziszewice structure – depth domain

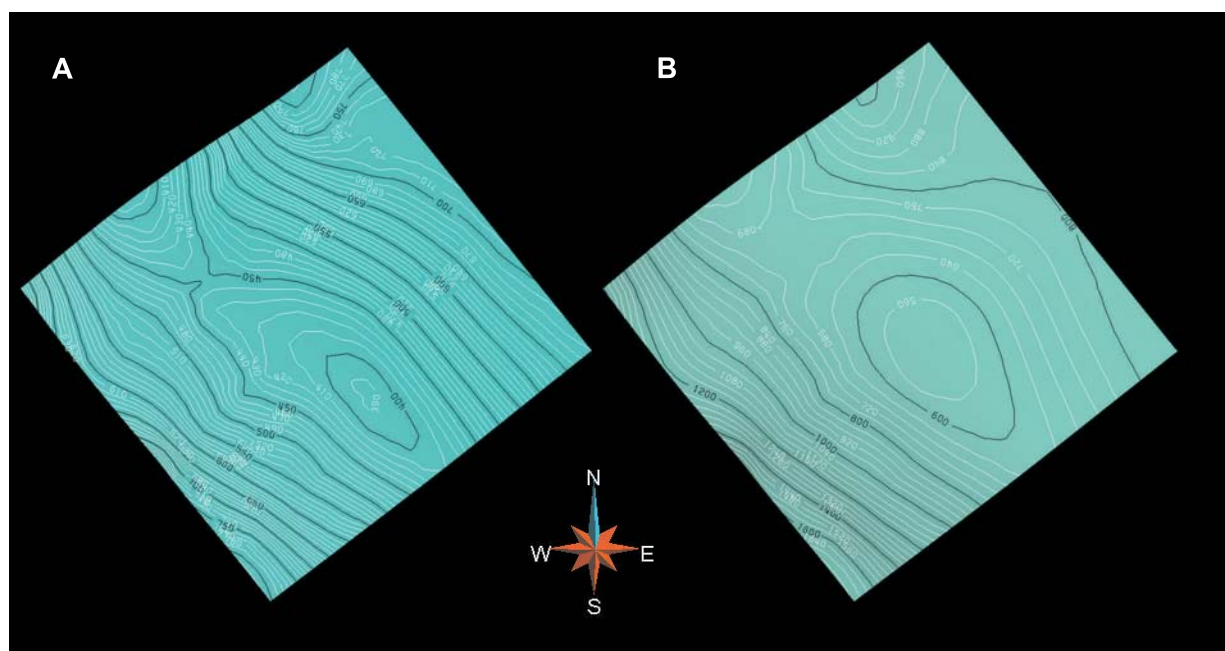


Fig. 4. Mapy strukturalne stropu toarku

A. Mapa w domenie czasu. **B.** Mapa w domenie głębokości

Structural maps of top of Toarcian

A. Time domain map. **B.** Depth domain map

OSNOWA STRATYGRAFICZNA

Wykorzystując dane wejściowe przygotowane przez zespół PIG–PIB Warszawa, w KSE AGH opracowano zmodyfikowaną wersję osnowy geometrycznej modelu 3D.

Powstały model obejmuje pięć sekwencji stratygraficznych (*zones*) podzielonych na zmienną liczbę proporcjonalnych warstw:

A – toark górny (5 warstw), B – toark dolny (formacja ciechocińska, 6 warstw), C – pliensbach (15 warstw), D – hetang–synemur (20 warstw), E – retyk (10 warstw).

Zastosowanie powyższego podziału stratygraficznego osnowy geometrycznej modelu pozwoliło uszczegółwić przestrzenną dystrybucję potencjalnych horyzontów uszczelniających i zbiornikowych w profilu dolnej i środkowej

jury antykliny Budziszewic. Zróżnicowanie wewnętrznego uwarstwienia wydzielań jurajskich pozwala na dokładniejsze (mniej uśrednione) zrekonstruowanie zmienności litologicznej badanych sekwencji i powiązanej z nią zmienności parametrów zbiornikowych. Opracowany model 3D w całości składa się z 1 942 121 komórek.

MODEL LITOLOGICZNY

Model litologiczny opracowano na podstawie krzywych litologicznych zestawionych przez J. Szewczyka w otworach wiertniczych Budziszewice IG 1, Buków 1 oraz Zaosie 2. Do jego wykonania wykorzystano sekwencyjny algorytm stochastyczny *Sequential Indicator Simulation* (Deutsch, Journel, 1992). Symulacje przestrzennego rozkładu litologii wykonano pięciokrotnie, uzyskując równie prawdopodobne warianty modelu litologicznego. Model koń-

cowy obliczono w wyniku selekcji najczęściej występującej litologii (*most of*) (fig. 5).

Uzyskany w ten sposób model można uznać za bardzo reprezentatywny. Jego istotną zaletą jest zachowanie ciągłości lateralnej warstw. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić jakościowo, że potencjalnie najlepsze uszczelnienie stanowią zdominowane przez ilowce warstwy ciechocińskie dolnego toarku.

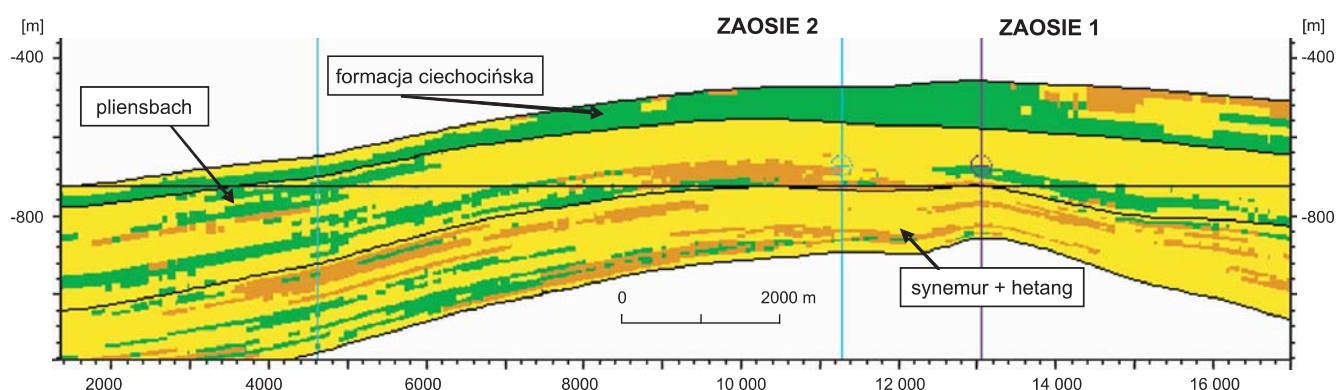


Fig. 5. Wynikowy model litologiczny powstały w wyniku przetworzenia pięciu wariantów stochastycznych modelu litologicznego

Litologia: zielona barwa – ilowce, brązowa – mułowce, żółta – piaskowce

Lithological model resulting from the processing of five variants of stochastic models

Lithology: green – shales, brown – siltstones, yellow – sandstones

MODEL ZAILENIA I POROWATOŚCI

Do opracowania modelu zailenia (VSH) i porowatości efektywnej (P_e) z trzech wyżej wymienionych otworów wiertniczych położonych w rejonie struktury Budziszewic wykorzystano sekwencyjną, stochastyczną, warunkowaną (*Conditional*) technikę estymacji – *Sequential Gaussian Simulation* (Gomez-Hernandez, Journel, 1993; Dubrule, 1998, 2003) i jego modyfikację *Gaussian Random Function Simulation*, dostosowaną do szybkiego obliczania dużych modeli 3D (*Petrel 2009 Manual*). Obliczono pięć równie prawdopodobnych wariantów (*realisation*) modelu zailenia – VSH oraz sześć wariantów modelu porowatości PHI. Modelowa-

nie każdego wariantu modelu VSH i PHI wykonano warunkując symulację przestrzennym rozkładem litologii zarejestrowanym w wynikowym modelu litologicznym. Końcowe wersje modeli VSH oraz PHI stanowią średnią arytmetyczną modeli wariantowych. Wyniki modelowania zilustrowano na figurze 6, na przykładzie modelu zailenia.

Wstępna analiza modelu pozwala ocenić, że w analizowanym wycinku profilu struktury Budziszewic najkorzystniejszy układ sekwencyjny tworzą: uszczelnienie zbudowane z ilastych warstw ciechocińskich dolnego toarku oraz zalegające niżej piaskowce wyższej części pliensbachu.

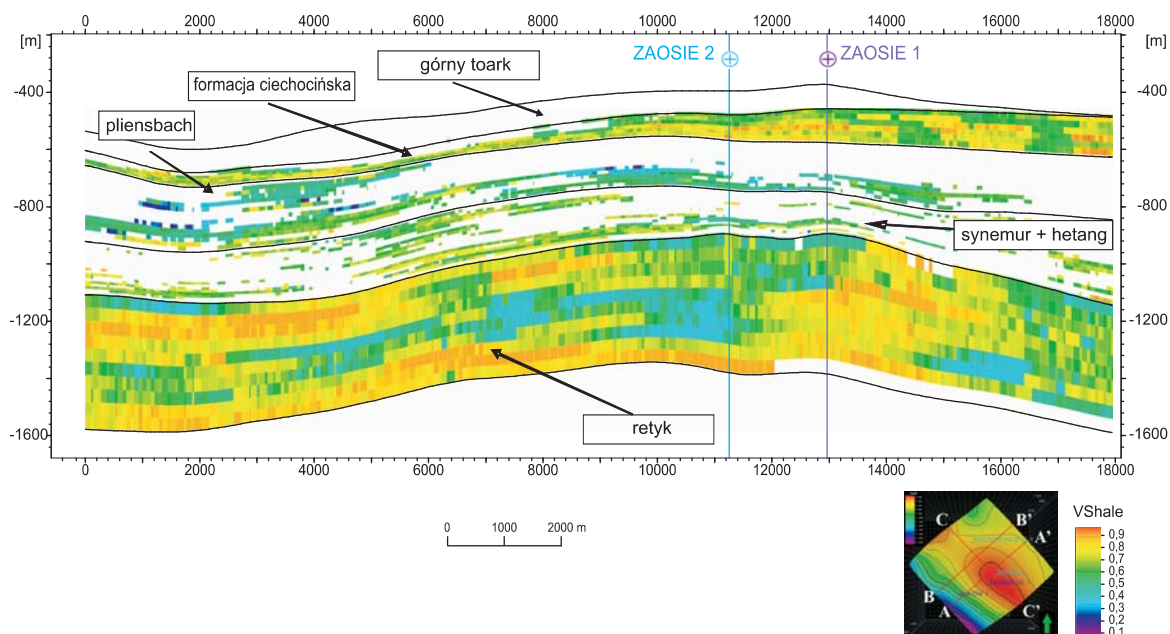


Fig. 6. Model uśrednionego zailenia (VSH) potencjalnych kompleksów uszczelniających – wariant realistyczny (wzdłuż linii przekrojowych C–C')

The model of average shale content (VSH) in potentially sealing complexes – a realistic option (along the horizontal line C–C')

Niższe sekwencje jury dolnej mają wkładki porowatych piaskowców o dobrej porowatości i małym zaileniu. O ich mniejszej przydatności dla celów sekwestracyjnych decy-

dują słaba ciągłość lateralna oraz stosunkowo małe zailenie potencjalnych poziomów uszczelniających dolnego plienschbachu oraz ilastych wkładek w profilu hetangu–synemuru.

WNIOSKI

Wypracowana przez zespół metodologia konstruowania statycznych modeli przestrzennych 3D wiąże prace informatyczne ze znajomością posługiwania się specjalistycznym oprogramowaniem goCad i Petrel. W trakcie eksploatacji prototypowej bazy danych nastąpiły jej znaczne modyfikacje, uwzględniające zarówno oczekiwania uczestników projektu, jak i operatorów oprogramowania modelującego strukturę przestrzenną. Zestaw informacji zgromadzonych w bazie danych oraz dane sejsmiczne pozwoliły na wyznaczenie potencjalnych warstw uszczelniających oraz kolektorowych. Skonstruowane modele umożliwiły dokładne oszacowanie objętości warstw kolektorowych

Doświadczenia zebrane podczas prac przy budowie przestrzennego modelu 3D struktury Budziszewic pozwolą na wyznaczeniu kolejnych obszarów geologicznych potencjalnie nadających się do składowania CO₂.

Do opracowania zmodyfikowanej wersji modelu parametrycznego w KSE AGH wykorzystano program Petrel udostępniony Wydziałowi Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH przez SIS Schlumberger w ramach umowy o wspieraniu działalności dydaktycznej i naukowej.

LITERATURA

- DEUTSCH C., JOURNAL A.G., 1992 — GSLIB – Geostatistical Software Library and Users Guide, New York, Oxford University Press.
- DUBRULE O., 1998 — Geostatistics in petroleum geology. AAPG Continuing Education Course Note Series, 38. AAPG. Tulsa.
- DUBRULE O., 2003 — Geostatistics for seismic data integration in Earth models. 2003 Distinguished Instructor Short Course. Distinguished Instructor Series. No. SEG/EAGE. Tulsa.
- GOMEZ-HERNANDEZ J.J., JOURNAL A.G., 1993 — Joint sequential simulation of multigaussian fields, in geostatistics Troia'92 (red. Soares): 85–94. Kluwer publ.
- MALLET J.-L., 2002 — Geomodeling. Applied geostatistics. Oxford University Press.