



Integracja wglębnych danych geologicznych i geofizycznych w celu uszczegóławiania budowy geologicznej wysadów solnych na przykładzie wysadu Łanięta

Integration of subsurface data for refinement of geological structure of salt diapirs; Łanięta salt diapir case

Jacek CHEŁMIŃSKI, Grzegorz CZAPOWSKI, Zbigniew MAŁOLEPSZY, Łukasz NOWACKI,
Olga ROSOWIECKA, Urszula STĘPIEŃ

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

STRESZCZENIE

Współczesne modele geologiczne 3D mają charakter innowacyjny w kompleksowym podejściu do rozpoznania wglębnej budowy struktur i jednostek geologicznych. Umożliwiają one integrację i przestrzenną interpretację informacji geologicznej, archiwizowanej w postaci różnorodnych baz danych oraz analogowych materiałów kartograficznych. Zaletą tworzonych modeli 3D jest możliwość ich bieżącej modyfikacji wraz z dopływem nowych danych. Model geometryczny 3D uzupełniony informacjami o zmienności litolofacyjnej, parametrami petrologicznymi lub/i petrofizycznymi, jest podstawą szacowania zasobów złóż surowców i może być wykorzystany w symulacjach procesów geologicznych i hydrogeologicznych.

Przedstawiony model budowy geologicznej wysadu solnego Łanięta prezentuje możliwości kompleksowej analizy danych, uwzględniającej szerokie spektrum skali rozpoznania geologicznego wysadu. Podczas procesu budowania modelu matematycznego opierano się w znacznej mierze na archiwalnych danych otworowych, wynikach pomiarów i analiz fizyko-chemicznych, a także na dostępnych interpretacjach profilowań sejsmiki 2D. Główną część modelowania przeprowadzono w oparciu o szczegółowe i półszczełowe zdjęcia grawimetryczne.

Do modelowania gęstościowego wykorzystano anomalie grawimetryczne w redukcji wolnopowietrznej, dzięki czemu możliwe było zbudowanie modelu od powierzchni terenu.

Modelowanie wykonano w dwóch etapach. W pierwszym etapie obliczono prosty model oparty o zdjęcie półszczełowe. Głównym efektem tego etapu było uzyskanie tła geologiczno-gęstościowego dla drugiego etapu, jakim było modelowanie samej struktury solnej. Etap ten realizowany był w oparciu o zdjęcie szczegółowe. Zdjęcie to w jednoznaczny sposób ukazuje niejednorodność modelowanego ciała.

Dużym problemem w tego typu analizach jest prawidłowe zróżnicowanie gęstości w obrębie samego wysadu. Obecność dwóch typów litologicznych o bardzo zróżnicowanej gęstości (lekka sól i bardzo ciężki anhydryt) powoduje, że jednoznaczność wynikowego modelu w dużym stopniu uzależniona jest od znajomości relacji miąższościowych poszczególnych typów skał budujących pień solny wysadu (z otworów wiertniczych bądź sejsmiki).

Słowa kluczowe: integracja danych, geologia, geofizyka, model 3D, wysad solny Łanięta

ABSTRACT

Recent techniques of 3D geological models building present an innovative approach to integrated subsurface mapping of geological structures. Multiple sources of geological and geophysical data have been used in complex 3D modeling from both digital databases as well as analogue archives. Structural framework of the model supplemented with lithological and petrophysical data discretized in spatial grids is

used for resources assessment and modeling of geological and hydrogeological processes.

The 3D geological model of the Łanięta salt diapir has been developed as a case study for refinement of known structure and lithological variation of the salt dome with use of borehole data, cross sections and 2D seismic interpretation as well as petrophysical and geochemical analysis. The study has been focused on application of the geologically-constrained 3D geophysical inversion of gravity data for delineation of undrilled parts of the structure.

The free-air correction of gravity data have been used for modeling of the structure from the terrain surface down to the depth of 1 km below sea level. Both regional and local gravity surveys were used in two steps approach. The low resolution regional model has been created for 3D trend model of density distribution in the first step. It was followed by the high resolution, detailed inversion of local gravity data. The 3D inversion constrained by borehole control points presents density variation of modeled structure.

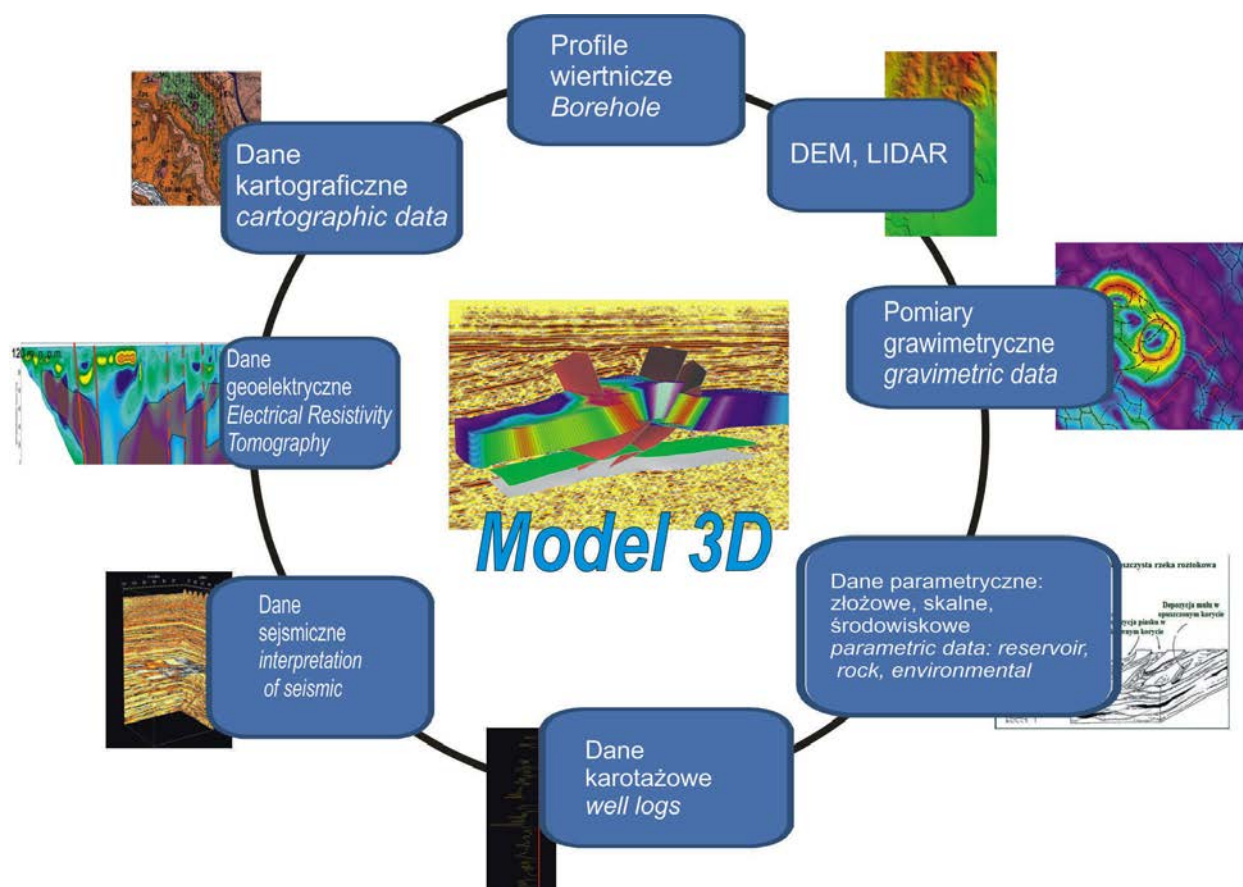
A significant challenge of presented approach of gravity inversion is an adequate differentiation of density in the salt diapir. The delineation of large density contrast of halite and anhydrite rock in the highly deformed internal diapir structures is problematic and it depends mostly on available borehole or seismic data on lithological succession and spatial distribution.

Key words: data integration, geology, geophysics, 3D model, Łanięta salt diapir

WSTĘP

Trójwymiarowe modele struktur geologicznych są obecnie niezbędnym narzędziem w badaniach i przedstawianiu lokalnej i regionalnej budowy geologicznej oraz w planowaniu zagospodarowania kryjących się w tych strukturach cennych kopalin np. wystąpienia węglowodorów, węgla, surowców chemicznych czy metalicznych. W przypadku osadów solnych na terenie Polski próby budowy takich modeli są podejmowane po 2000 roku (np. Chelmiński i in., 2008; Czapowski i in., 2007, 2013; Czochal, 2013; Piątkowska i in., 2013).

Laboratorium modelowania geologicznego 3D przy PIG-PIB swoje dotychczasowe doświadczenia związane z budową modeli przestrzennych 3D postanowiło wykorzystać celem możliwie jak najdokładniejszego odwzorowania wglębnej budowy geologicznej wysadu solnego Łanięta. Podjęto się opracowania modelu tego wysadu wraz z jego otoczeniem w oparciu o kompleksową integrację posiadanych geologicznych i geofizycznych (danych archiwalnych, ponownie zinterpretowanej informacji geologicznej zarchiwizowanej w postaci różnorodnych baz danych, analogowych materiałów kartograficznych i sejsmicznych) (Ryc. 1). Do tego celu wykorzystano dedykowane oprogramowanie.



Ryc. 1. Dane geologiczne wykorzystane do budowy modeli geologicznych 3D.

Fig. 1. Geological data in 3D geological modelling

W założeniu utworzony model geometryczny 3D może zostać uzupełniony informacjami o zmienności litofacjalnej oraz wypełniony parametrami petrologicznymi lub/i petrofizycznymi. Rozwiązanie to pozwala w toku dalszych prac szacować zasoby oraz prowadzić dalsze szczegółowe badania dotyczące np. symulacji procesów geologicznych i hydrogeologicznych. W przypadku wysadu solnego Łanięta złoża soli kamiennej zostało udokumentowane w kategorii C₁, a ilość, jakość i szczegółowość danych determinują rozdzielczość modelu oraz zakres i możliwość jego dalszego wykorzystania.

METODYKA BUDOWY MODELU

Wszystkie geologiczne modele przestrzenne 3D wzbogacają kartografię geologiczną o kolejny wymiar poprzez przedstawienie wykształcenia wydzieli geologicznych w postaci brył geometrycznych, a także otwierają możliwości do lepszej weryfikacji i integracji danych, wykonywania analiz i obliczeń parametrów w przestrzeni trójwymiarowej. Korzystając z dostępnych danych, które są sprowadzone do wspólnego układu współrzędnych geograficznych oraz jednej domeny przestrzennej (głębokościowej), tworzone są powierzchnie, które wraz ze wzajemnymi relacjami budują statyczne geologiczne modele 3D. W odróżnieniu od analogowej, płaskiej mapy z przekrojami, model 3D ukazuje wglębną budowę struktury lub jednostki geologicznej na całym obszarze mo-

delowanym, eliminując przy tym m.in. błędy związane z intersekcją.

Ważnym etapem konstrukcji modelu jest zbudowanie bazy danych (zawierającej m.in. archiwalne opracowania kartograficzne, profile otworów wiertniczych, dane geofizyczne, wyniki badań petro- i litologicznych), która umożliwia import wszystkich elementów do programu modelującego. Przed załadowaniem do bazy dane muszą podlegać procesom wartościowania, reinterpretacji oraz digitalizacji (w wypadku materiałów analogowych). Analiza danych w środowisku przestrzennym umożliwia porównywanie w jednym obszarze dużej ilości zróżnicowanych danych, eliminację niezgodności oraz dobór obszarów reperowych (o największej koncentracji danych). Model statyczny określa charakterystykę granic pomiędzy poszczególnymi powierzchniami stratygraficznymi (zgodne czy erozyjne), oraz pozwala kontrolować zgodność powierzchni w punktach referencyjnych takich jak przecięcia profili sejsmicznych z otworami wiertniczymi. Podczas konstrukcji modelu możliwe jest nadanie różnych „wag” różnym punktom referencyjnymi, np. danym z wierceń można przypisać większą wagę niż interpretacjom przekrojów geologicznych. Opracowany model strukturalny może być wypełniany siatką sześciątów – Sgrid, zawierających informacje parametryczne: złożowe, litologiczne, itp. Na podstawie informacji o litologii skał z wierceń i krzywych karotażowych, stosując metody geostatystyczne i porównawcze można wymodelować rozprzestrzenienie litofacji w obrębie brył modelu.



Ryc. 2. Lokalizacja wysadu solnego Łanięta na tle mapy geologicznej Polski bez utworów kenozoiku (wg Dadlez i in, 2000, zmienione).
 Fig. 2. Location of Łanięta salt diapir on geological map of Poland without Cenozoic deposits (after Dadlez et al., 2000, modified).

Oprogramowanie gOcad/Skua*Paradigm i Petrel*Schlumberger, z którego korzysta Laboratorium modelowania, pozwala prowadzić analizy i obliczenia w przestrzeni trójwymiarowej. Dzięki takiemu rozwiązaniu można określać przestrzenne relacje pomiędzy różnymi typami skał, weryfikować interpretacje czy dużo precyzyjniej obliczać zasoby. Następuje dzięki temu znaczna poprawa, jakości interpretacji i obliczeń, a wyniki prac są doskonalsze, znacznie bardziej zrozumiałe i łatwiejsze do wykorzystania.

Omawiany model budowy geologicznej wysadu solnego Łanięta prezentuje możliwości kompleksowej analizy danych, uwzględniającej szerokie spektrum skał i zakresu tematycznego rozpoznania struktury geologicznej.

ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ WYSADU I JEGO OTOCZENIA

Wysad solny Łanięta jest położony w północno-wschodniej części Wysoczyzny Kłódzkiej w środkowej części antyklinorium kujawsko-pomorskiego w rejonie wyniesienia kutnowskiego ponad antykliną solną Lubień Kujawski – Łanięta (Ryc. 2). W jądrze antykliny wypiętrzają się dwa słupy solne Lubień i Łanięta wyrastające z poduszki solnej Wojszyc.

Wysad solny Łanięta został zidentyfikowany przez E. Janczewskiego na podstawie badań grawimetrycznych w latach 1937-1939. Na wstępne okonturowanie obu wysadów pozwoliły badania sejsmiki refrakcyjnej z lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego stulecia (Czapowski i in., 2005).

Diapir Łanięta jest wysadem średniej wielkości, w przekroju poziomym ma kształt zbliżony do elipsoidalnego o osiach długości 3,7 i 3,3 km i powierzchni 9,9 km². Zwierciadło solne stwierdzono na głębokości 235,4 - 550,0 m p.p.t. Zewnętrzne granice wysadu są niemal pionowe, co przy niewielkiej średnicy wskazuje również na pionowe ustawienie ławic solnych. Z danych otworowych wynika, że w górnej części wysadu ławice zapadają pod kątem 30-90°, przy czym bardziej strome upady i przy większej zmienności nachylenia warstw notowano w NW części struktury. Należy podkreślić, że upady wszystkich przewierconych warstw są bardzo strome – nie mniejsze od 65°, a przeważają upady rzędu 75°–90°. Sugeruje to odwrócenie wielu warstw i ich kilkukrotne powtórzenie w profilu pionowym (otwór Łanięta Ł-4), wskazujące na przeładowanie serii solnych. Ze względu na ogólny kształt wysadu można przypuszczać, że fałdy te mają bardzo nieregularny zarys w przekrojach poziomych, a tym samym orientacja uławicenia w wysadzie jest najprawdopodobniej zmienna. Budowa wewnętrzna wysadu jest bardzo skomplikowana.

Na dotychczas rozpoznany profil serii solnej (Parecka, 1980) składają się następujące wydzielenia litostratigraficzne cechsztynu:

- zuber czerwony (Na4t), o miąższości do 100,8 m, zarejestrowano 1÷2 powtórzenia tektoniczne;

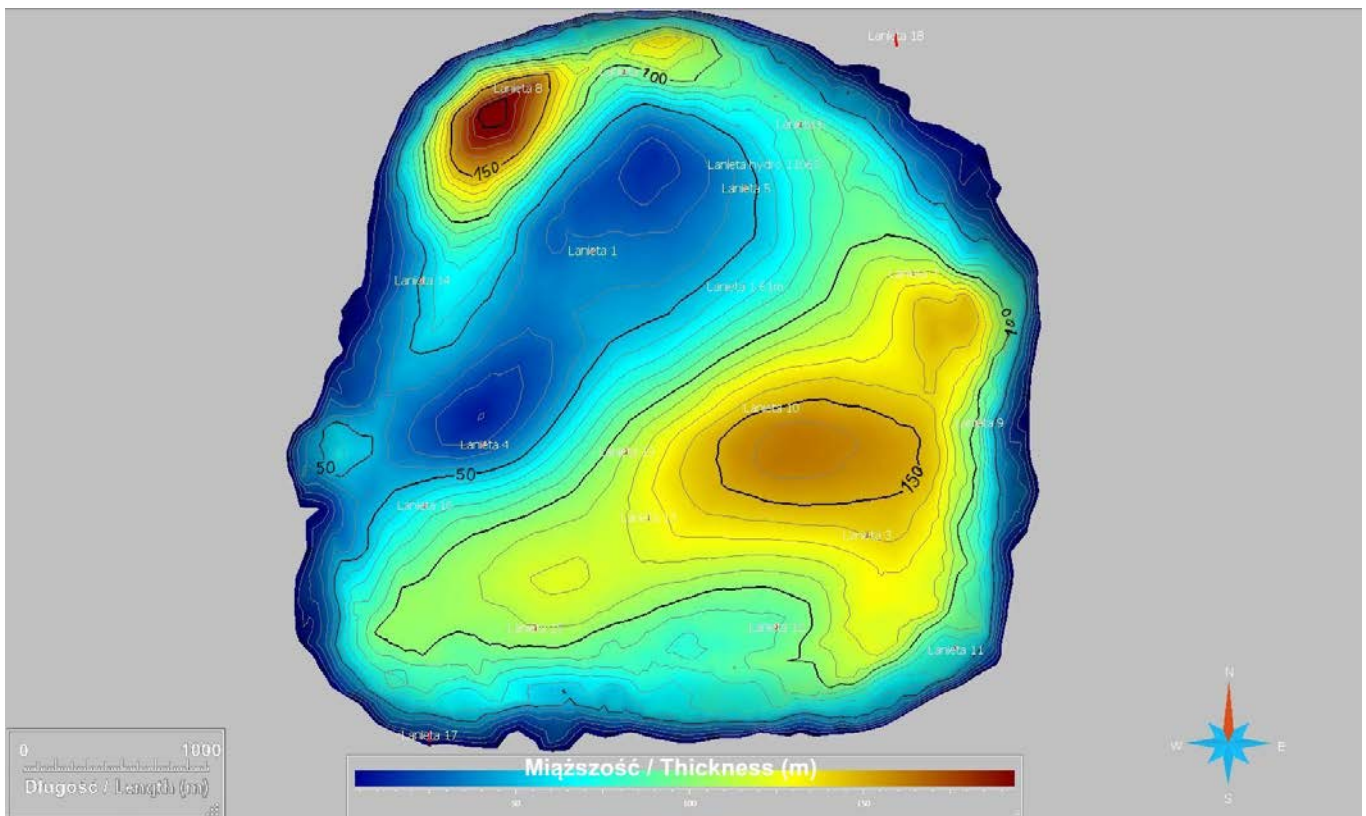
- najmłodsza sól kamienna (Na4), o miąższości do 40,7 m, zarejestrowano 1÷2 powtórzeń tektoniczne;
- zuber brunatny (Na3t), o miąższości do 104,0 m;
- młodsza sól kamienna (Na3), o miąższości ponad 86,0 m;
- anhydryt główny (A3), o miąższości do 121,6 m, zarejestrowano 1÷7 powtórzeń tektonicznych;
- starsza sól kamienna (Na2), o miąższości do 257,4 m, zarejestrowano 1÷8 powtórzeń tektonicznych;
- starsza sól potasowa (K2), o miąższości do 7,0 m;
- anhydryt podstawowy (A2), o miąższości do 103,4 m, zarejestrowano 10÷15 powtórzeń tektonicznych.

Opisana sukcesja dowodzi istnienia silnych zaburzeń tektonicznych w strukturze solnej.

Powyżej serii solnej na głębokości 141,5-386,4 m p.p.t. występuje czapa wysadu grubości 29,6-241,4 m. (Parecka, 1980) (Ryc. 3). Ma ona charakter gipsowo-anhydrytowy i gipsowo-iłowy. Czapa gipsowo-anhydrytowa występuje na ogół na obszarach, gdzie w jej podłożu znajdują się sole cyklotemu PZ2. Czapa gipsowo-anhydrytowa występuje w środkowej części wysadu, a jej zarys jest wydłużony w kierunku NE-SW; tworzą ją gips i anhydryt (miejscami zgipsowany) oraz - podrzędnie – ił (Parecka, 1980). W tym rodzaju czapy, który powstał przeważnie z utworów ogniwa anhydrytu głównego (A3), występują powszechnie zjawiska krasowe. Na pozostałym obszarze wysadu dominuje czapa gipsowo-iłowa, która rozwinęła się na wiekowo różnych utworach: na zubrach cyklotemu PZ4 oraz na zubrach cyklotemu PZ3. Ten typ czapy budują ily zwietrzelinowe z niewielką zawartością gipsu w postaci przerostów, żył, gniazd oraz okruchów i występuje ona w partiach wysadu przylegających do jego zewnętrznego konturu.

W bezpośrednim sąsiedztwie wysadu występują utwory jury (Czapowski i in., 2005). Wzdłuż południowo-wschodniej granicy wysadu Łanięta występują utwory malmu, wykształcone w postaci jasnoszarych wapieni dolomitycznych, a przy północno-zachodniej granicy wysadu stwierdzono utwory doggeru i malmu. W sąsiedztwie wysadu Łanięta strop osadów jury występuje na głębokości 93,3-388,4 m p.p.t., maksymalna miąższość tych osadów wynosi 557,7 m. Poza obszarem wysadów strop osadów jury występuje na głębokości 84,8-171,5 m p.p.t., miąższość tych osadów przekracza 24,7 m.

W nadkładzie wysadu brak jest utworów przedkenozoicznych. Profil osadów paleogenu i neogenu jest niemal kompletny i charakterystyczny dla obszaru Niżu Polskiego (Czapowski i in., 2005). Utwory paleogenu w nadkładzie wysadu Łanięta są reprezentowane przez osady węgliste, zaliczane do formacji odrzańskiej (paleocen). W stropie utworów tej formacji występuje tam cienki pokład węgla brunatnego (VII pokład odrzański) z licznymi wkładkami ilastymi i piaszczystymi o miąższości 1,7 m. Utwory eocenu (formacja jermianowicka) to drobnoziarniste, mułkowate piaski kwarcowe z glaukonitem o miąższości kilku metrów. Na profil osa-



Ryc. 3. Miąższość czapy gipsowej wysadu solnego Łanięta
Fig. 3. Cap rock thickness of the Łanięta salt diapir

dów oligocenu składają się piaski kwarcowo-glaukonitowe z wkładkami drobnego żwirku kwarcowego (formacja mosińska dolna), osady mułowcowe (formacja czempińska), gruby pokład węgla brunatnego o średniej miąższości sięgającej 22,4 m wraz z piaszczystymi utworami formacji mosińskiej górnej. Ponad wysadem Łanięta strop osadów paleogenu występuje na głęb. 109,0–199,0 m p.p.t., miąższość tych osadów waha się od 2,5 do 187,4 m.

Profil osadów neogenu budują kolejno: piaszczyste utwory formacji rawickiej: kompleks węglistych piasków kwarcowych formacji ścinawskiej z pokładem węgla brunatnego (miąższości do 19,5 m, II pokład lużycki) w stropie oraz kompleks piasków drobnoziarnistych i mułków formacji adamowskiej. Ponad tymi utworami występuje pokład węgla brunatnego o miąższości do 6,8 m (pokład środkowopolski) rozpoczynający profil formacji poznańskiej. Profil osadów miocenu kończą utwory ilasto-mułkowe o miąższości rzędu 30–40 m. Ponad wysadem Łanięta strop osadów neogenu występuje na głębokości 36,4–104,0 m p.p.t., miąższość tych osadów waha się w granicach 22,8–158,8 m, wynosząc średnio 77,1 m. Poza nadkładem wysadu strop osadów neogenu występuje na głębokości 30,2–73,0 m p.p.t., miąższość osadów neogenu mieści się w przedziale 54,6–121,7 m.

Powstanie miąższych serii węgla brunatnych powiązane jest zapewne z rozwojem zjawisk krasowych w obrębie czapy i rozpuszczaniem soli i tworzeniem się niecek (Kasiński i in.,

2009a). Proces ten był niejednorodny, największe miąższości węgla znajdują się w WN granicy czapy, co powiązać można z nasileniem w tym rejonie procesów rozpuszczania, bądź silniejszym wypiętrzaniem w centralnej części wysadu. Na silny przyrost czapy w paleogenie i neogenie wskazują osady nawiercone w otworze Łanięta-14 gdzie w obrębie czapy na głębokości 366,4–386,4 m p.p.t. występują porwaki piasków z lignitem.

Ponad wysadem zaznaczają się deformacje w osadach plejstocenu, powstałe zapewne wskutek mobilności wysadu w okresie interglacjału mazowieckiego, wczesnego okresu zlodowacenia środkowopolskiego i ruchów odprężeniowych po ustąpieniu lądolodów.

DANE OTWOROWE

Dane otworowe są jednym z kluczowych elementów każdego przestrzennego modelu budowy geologicznej. Są reperami, do których dowiązywane są inne dane, np. geofizyczne. Stąd też odgrywają kluczową rolę w trakcie prac weryfikacyjnych i reinterpretacyjnych oraz w całym procesie modelowania.

Podczas prac nad budową modelu 3D wykorzystano dane zawarte w dokumentacji geologicznej dla złoża soli kamiennej w wysadzie solnym Łanięta (Parecka, 1980). Złoże udokumentowane zostało 19 otworami badawczo-poszukiwawczymi (Ryc. 4), sięgającymi do głębokości od 137 m do 653 m.

W 14 otworach na głębokości od 150,7 m (otwór Łanięta-16) do 106,3 m (otwór Łanięta-12) nawiercono utwory solne. Wykorzystano także trzy otwory hydrogeologiczne odwiercone w celu rozpoznania utworów paleogenu-neogenu i utworów czwartorzędowych. Osady czapy zostały ponadto nawiercone w otworach Łanięta-8 i Łanięta-14, gdzie do spągu otworów (odpowiednio 301,2 m i 550 m) nie dowieziono się do spągu serii ilasto-anhydrytowej.

Wyznaczenie powierzchni strukturalnych na podstawie danych otworowych (Ryc. 4) umożliwiło identyfikację błędów i stanowiło podstawę do weryfikacji informacji w otworach wiertniczych. Wsparciem w procesie modelowania były syntetyczne opracowania kartograficzne zawarte w dokumentacji złożowej (Parecka, 1980).

DANE KARTOGRAFICZNE

Dane kartograficzne są dwuwymiarową interpretacją danych geologicznych (m.in. otworowych i geofizycznych). Ponieważ model budowy geologicznej wysadu jest modelem lokalnym, dlatego też jedyne szczegółowe opracowania kartograficzne dostępne są w dokumentacjach złożowych. W większości przypadków są to dane analogowe, które nie mogą być wykorzystane bez uprzedniego przekształcenia do postaci cyfrowej. Przykładowe opracowanie autorstwa E. Pareckiej (1980) zostało najpierw zeskanowane, następnie nadano mapie georeferencje. Reperami, które mogą osadzić

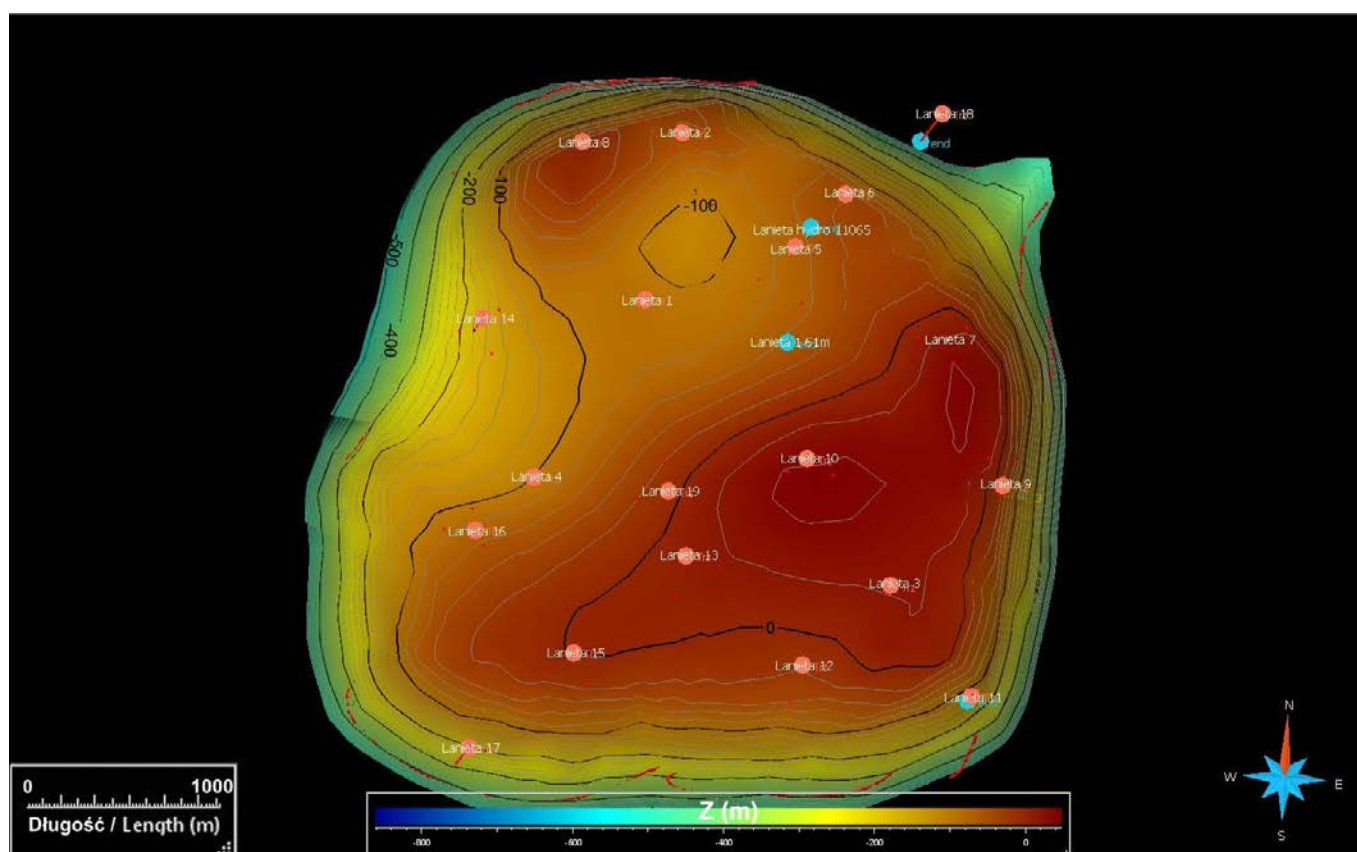
mapę we współrzędnych mogą być charakterystyczne punkty topografii, lecz najczęściej w takich przypadkach są nimi lokalizacje otworów wiertniczych. Sam raster nie jest jednak wystarczający. Wydzielenia i uskoki zostały zdigitalizowane i nadano im atrybuty zgodne z opisem zawartym w dokumentacji (Ryc. 5).

Tak przygotowany materiał kartograficzny wykorzystano w procesie modelowania jako wparcie przy interpretacji danych w przestrzeni 3D. Należy podkreślić, że mapy geologiczne nie mają charakteru danych reperowych. Analiza danych podczas opracowywania modelu budowy geologicznej niejednokrotnie dostarczyła nowych informacji, których uwzględnienie zmodyfikowało obraz kartograficzny uzyskany z dokumentacji geologicznej.

Poza danymi punktowymi i syntetycznymi opracowaniami kartograficznymi w modelowaniu geologicznym ważną rolę odgrywają dane geofizyczne. Ich zaletą jest to, że pozwalają w sposób ciągły śledzić zmienność parametrów wynikającą ze zróżnicowania budowy geologicznej. Jest to szczególnie ważne przy identyfikacji i interpretacji deformacji. W konstrukcji modelu wysadu solnego Łanięta wykorzystano dane geoelektryczne, sejsmiczne i grawimetryczne.

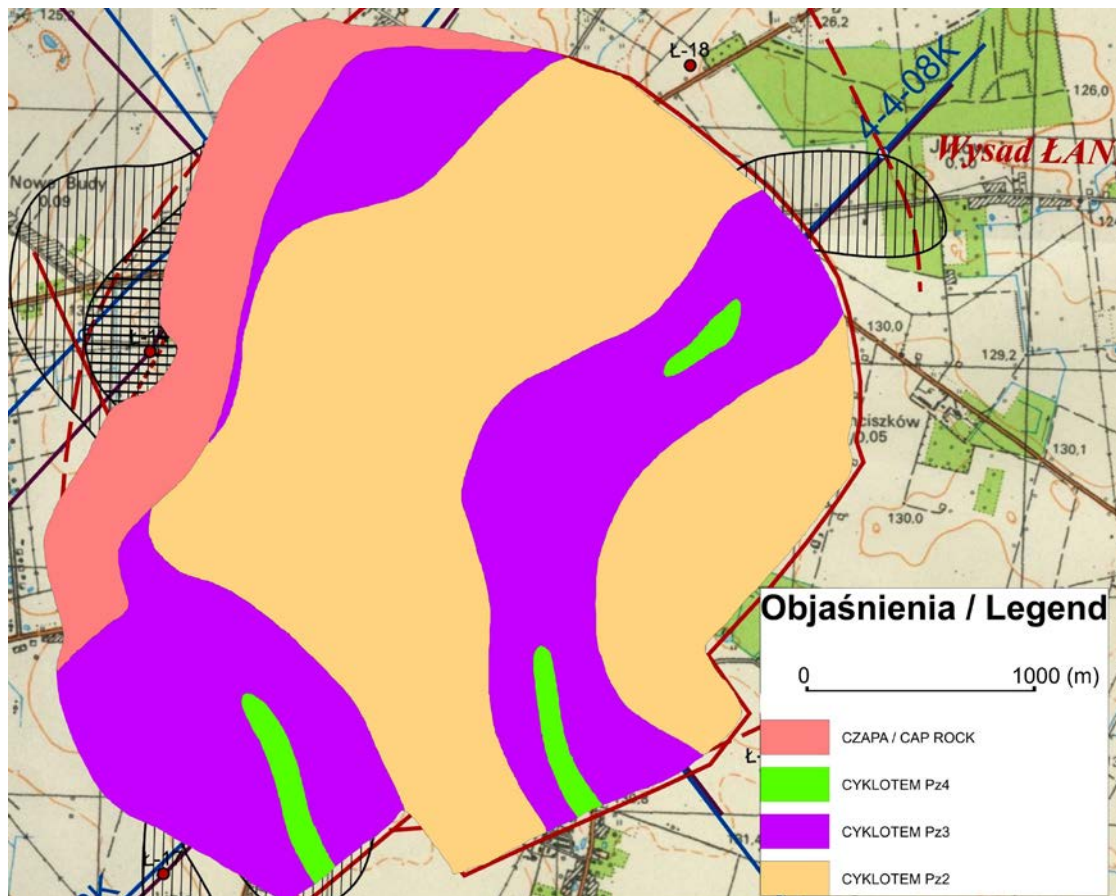
DANE GEOELEKTRYCZNE

Przy opracowaniu modelu korzystano z najnowszych danych geoelektrycznych (profile ERT) wykonanych na potrze-



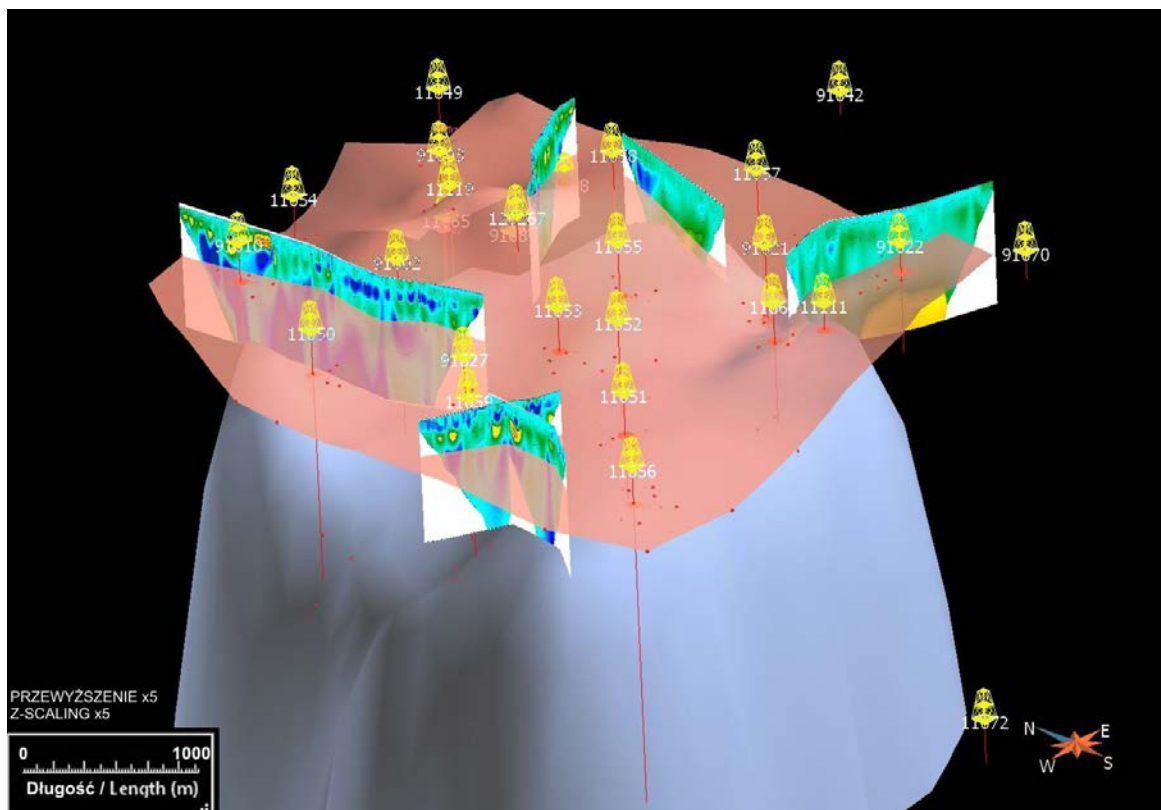
Ryc. 4. Lokalizacja otworów wiertniczych na tle powierzchni stropowej czapy wysadu solnego Łanięta

Fig. 4. Boreholes location on the top surface of cap rock in the Łanięta salt diapir



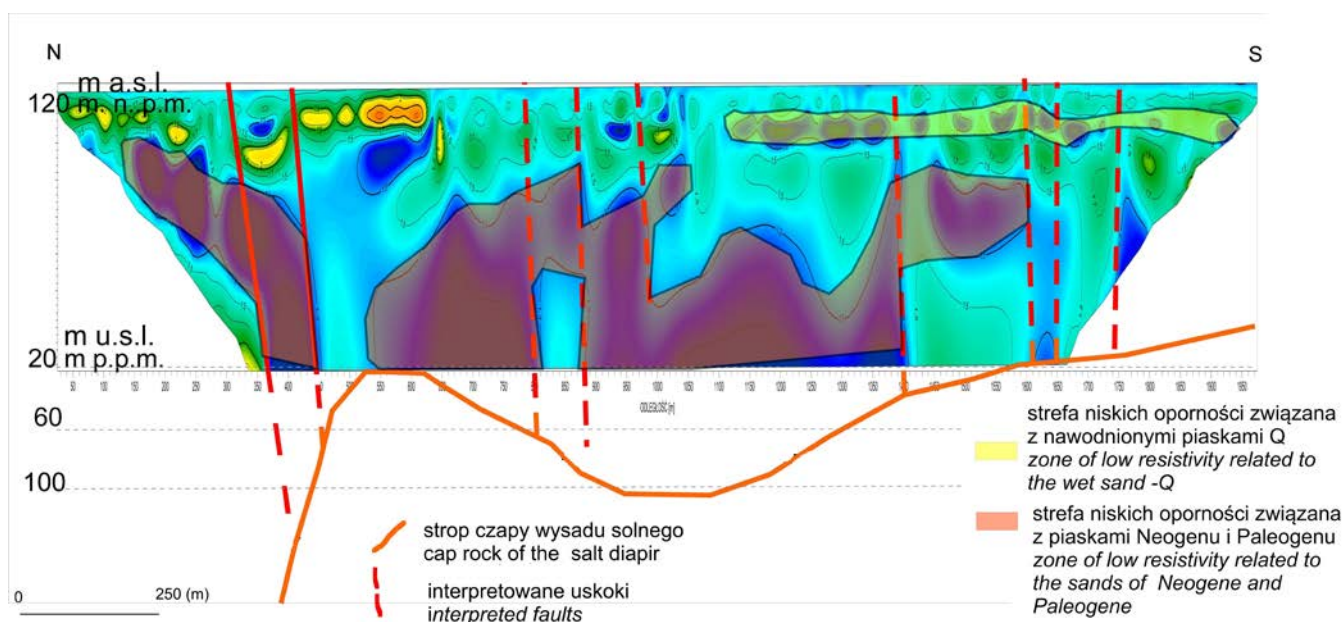
Ryc. 5. Mapa geologiczna wysadu solnego Łanięta (wg Pareckiej, 1980)

Fig. 5. Geological map of the Łanięta salt diapir (after Parecka, 1980)



Ryc. 6. Analiza przekrojów ERT w środowisku 3D – na tle otworów wiertniczych i horyzontów modelu (strop neogenu-kolor różowy, czapa wysadu solnego Łanięta-kolor niebieski)

Fig. 6. ERT profiles analysis – base on boreholes and model horizons (Neogene top, cap rock of the Łanięta salt diapir)



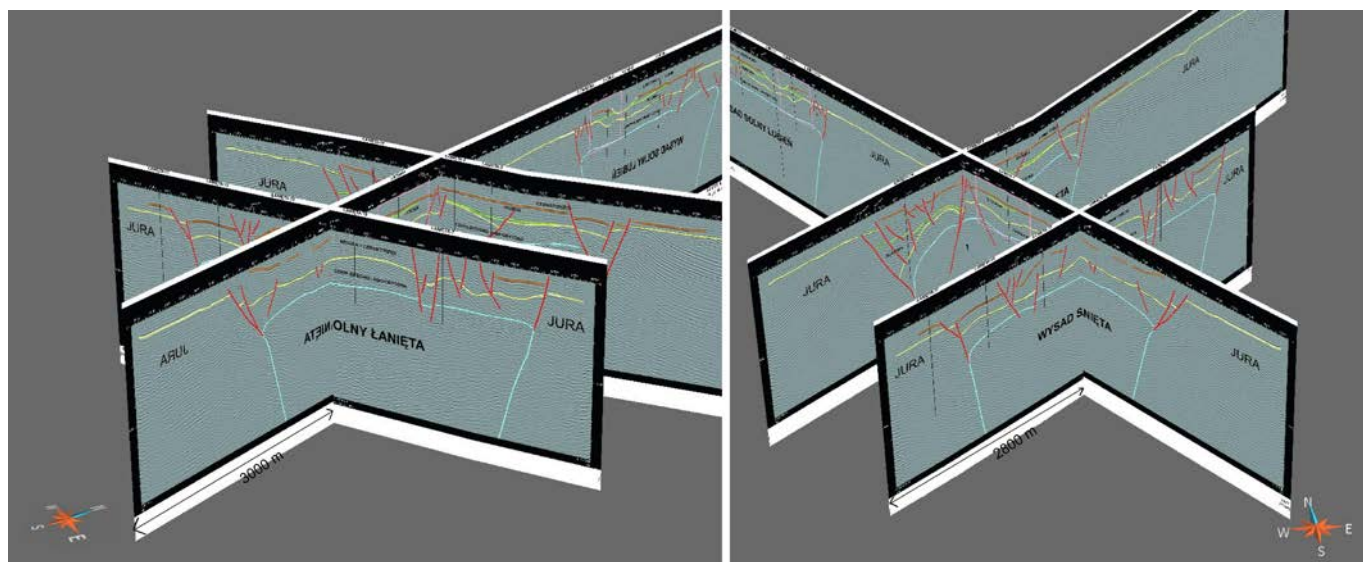
Ryc. 7. Interpretacja profilu geoelektrycznego ERT w osadach czwartorzędzu, neogenu i paleogenu nad wysadem solnym Łanięta – zestawienie w środowisku 3D: interpretacji sejsmiki, danych otworowych i przekrojów archiwalnych z dokumentacji złożowej
Fig. 7. Interpretation of ERT profiles through Quaternary, Neogene and Paleogene deposits through higher up the Łanięta salt diapir - juxtaposition in the 3D environment: the interpretation of seismic data, boreholes and archival resource documentation

by projektu „Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D” realizowanego przez PIG-PIB (projekt sfinansowano ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej). Wykorzystano 6 profili elektrooporowych (Pacanowski i in., 2016), które zlokalizowane zostały powyżej strefy kontaktu wysadu i czapy solnej ze skałami otaczającymi. Integracja danych ERT z danymi otworowymi i powierzchniami strukturalnymi (horyzontami) wysadu, cza-

py i nadkładu pozwoliła zweryfikować i doprecyzować przebieg stropu neogenu w nadkładzie struktury solnej (Ryc. 6).

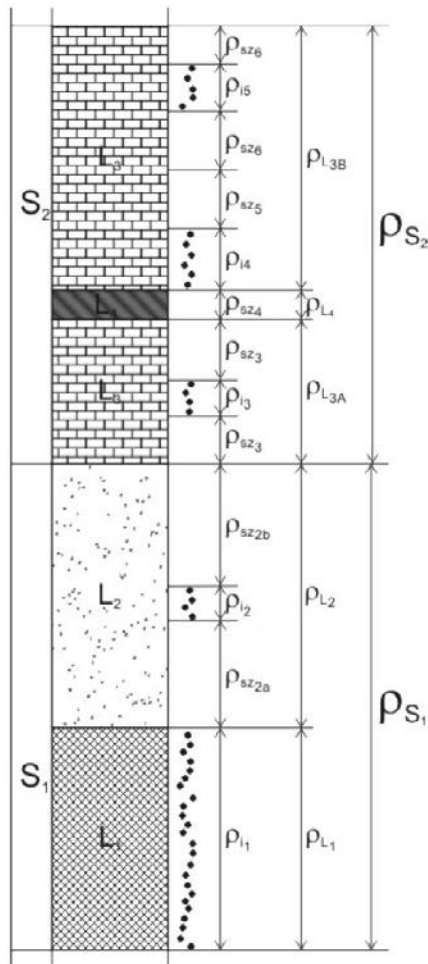
W kolejnym etapie dane z profili ERT zestawiano, analizowano i interpretowano łącznie z interpretacjami sejsmicznymi i danymi otworowymi (Ryc. 7). Do tego dołączono także przekroje geologiczne zawarte w dokumentacji złożowej. Wszystkie analizy i interpretacje przeprowadzono w środowisku 3D.

Zestawienie danych geoelektrycznych, otworowych, profili sejsmicznych i archiwalnych przekrojów pozwoliło zweryfikować spójność interpretacji i doprecyzować przebieg



Ryc. 8. Zestawienie zinterpretowanych wysokorozdzielczych profili sejsmicznych przez wysad solny Łanięta (profile wg Kasiński i in., 2009b)

Fig. 8. The juxtaposition of interpreted high resolution seismic profiles through the Łanięta salt diapir (profiles after Kasiński et al., 2009b)



Ryc. 9. Schemat szacowania gęstości w otworze wiertniczym

Fig. 9. Scheme of the density estimation in borehole

S_1, S_2 – wydzielenia stratygraficzne

$L_{1...4}$ – wydzielenia litologiczne

$\rho_{i1...5}$ – średnia gęstość objętościowa dla interwału pomiarowego

$\rho_{sz1...6}$ – średnia gęstość objętościowa szacowana dla interwału bezpomiarowego

$\rho_{L1...3}$ – gęstość objętościowa wydzielenia litologicznego

$\rho_{S1,2}$ – gęstość objętościowa wydzielenia stratygraficznego

S_1, S_2 – stratigraphic units

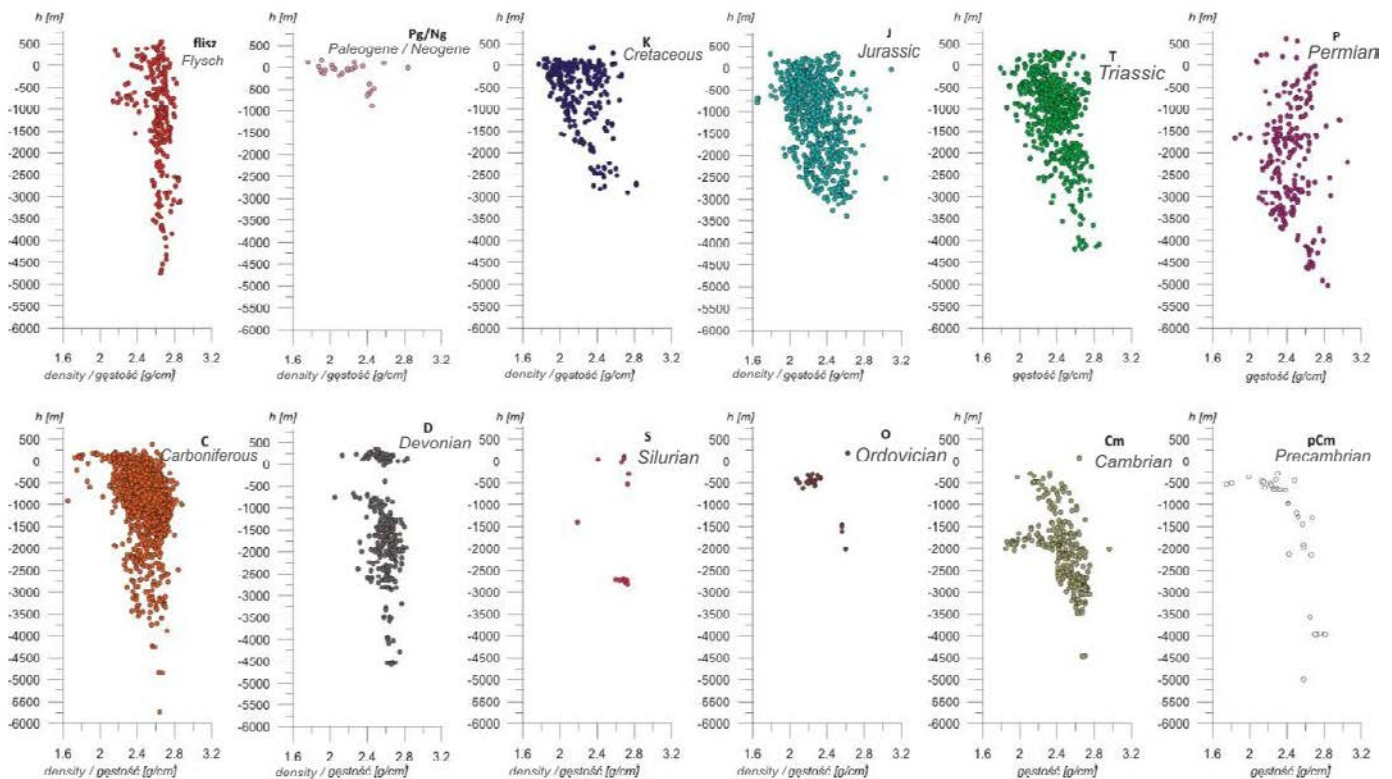
$L_{1...4}$ – lithological unit

$\rho_{i1...5}$ – average bulk density for the measurement interval

$\rho_{sz1...6}$ – average bulk density estimated for the measurement interval

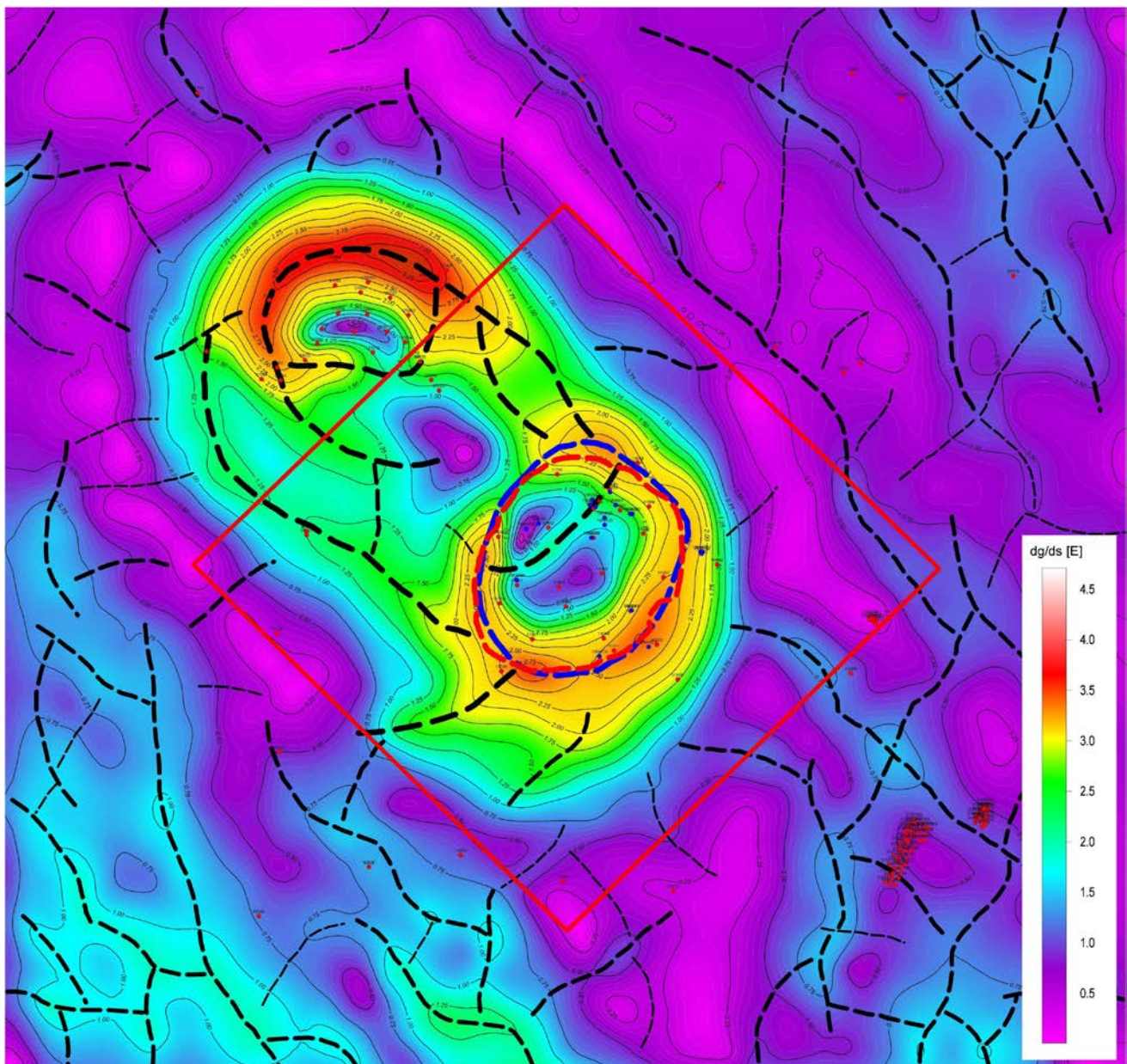
$\rho_{L1...3}$ – bulk density of the stratigraphic unit

$\rho_{S1,2}$ – bulk density of the lithological unit



Ryc. 10. Zmiana gęstości piaskowców wraz z głębokością dla różnych wydzieleni stratygraficznych

Fig. 10. Changing the density of sandstone with depth for different stratigraphic units



Ryc. 11. Obraz zróżnicowania geologiczno-gęstościowego rejonu wysadu solnego Łanięta- Anomalie gradientu poziomego dg/ds pola siły ciężkości przełożonego analitycznie w górę na poziom +200 m n. p. m. opracowany na podstawie półszczegółowego zdjęcia grawimetrycznego. Zasięg stropu wysadu solnego Łanięta wyznaczony na podstawie szczegółowego (linia przerywana czerwona) i półszczegółowego zdjęcia grawimetrycznego (linia przerywana niebieska) (Musiatowicz, 2016)

Fig. 11. Differentiation of geological density in the nearby area of the Łanięta salt diapir- Anomalies horizontal gradient dg/ds gravity field up the level of 200 m a. s. l. developed according to semidetached gravity image. Range of the salt diapir appointed on the detailed gravity image (dotted red line) and semidetached gravity image (dotted blue line) (Musiatowicz, 2016)

powierzchni strukturalnych, ale także redefiniować markery modelu.

DANE SEJSMICZNE

Bardzo istotnym źródłem informacji do konstrukcji modeli geologicznych są dane sejsmiczne. Dzięki nim identyfikowane są powierzchnie strukturalne, a zwłaszcza powierzchnie nieciągłości i deformacje, które rzadko są rejestrowane w danych otworowych. Dane sejsmiczne przechodzą konwersję czasowo-głębokościową. Model opiera się na danych w do-

menie głębokościowej. W przypadku wysadu solnego Łanięta dysponowano jedynie profilami sejsmicznymi opracowanymi na potrzeby projektu „Perspektywy występowania węgla brunatnego w sąsiedztwie wysadów solnych na Niżu Polskim” (Kasiński i in., 2009b). Zinterpretowane profile sejsmiczne zestawiono w środowisku 3D (Ryc. 8).

Dzięki zestawieniu danych i wizualizacji w środowisku 3D przeanalizowano i skonfrontowano geometrię wysadu solnego otrzymaną na podstawie danych otworowych, grawimetrii i interpretacji profili sejsmicznych wykazując małą

przydatność i wiarygodność tych ostatnich, co uzasadniono w dalszej części artykułu.

DANE GRAWIMETRYCZNE

Opróbowanie rdzenia na potrzeby badań gęstościowych często jest nierównomierne, z dużymi interwałami bez opróbowania. Z tego względu podjęto się szacowania gęstości w odcinkach pozbawionych pomiarów (Ryc. 9). Gęstości szacowano przy uwzględnieniu litologii, stratygrafii i trendu zmiany gęstości wraz z głębokością. Dla poszczególnych wydzieł litologicznych i stratygraficznych obliczono następnie wartości średnie ważone, gdzie wagą była miąższość poszczególnych odcinków.

Na rysunku 10 przedstawiono jak zmienia się gęstość (ciężar objętościowy) piaskowców wraz z głębokością dla poszczególnych wydzieł stratygraficznych. Pod uwagę zostały wzięte otwory badawcze z całego obszaru Polski.

Podczas procesu budowania modelu matematycznego wysadu Łanięta opierano się w znacznej mierze na geologicznych danych archiwalnych, na dostępnych interpretacjach profilowań sejsmiki 2D. Znaczną część modelowania przeprowadzono w oparciu o szczegółowe i półszczełowe zdjęcia grawimetryczne (Ryc. 11).

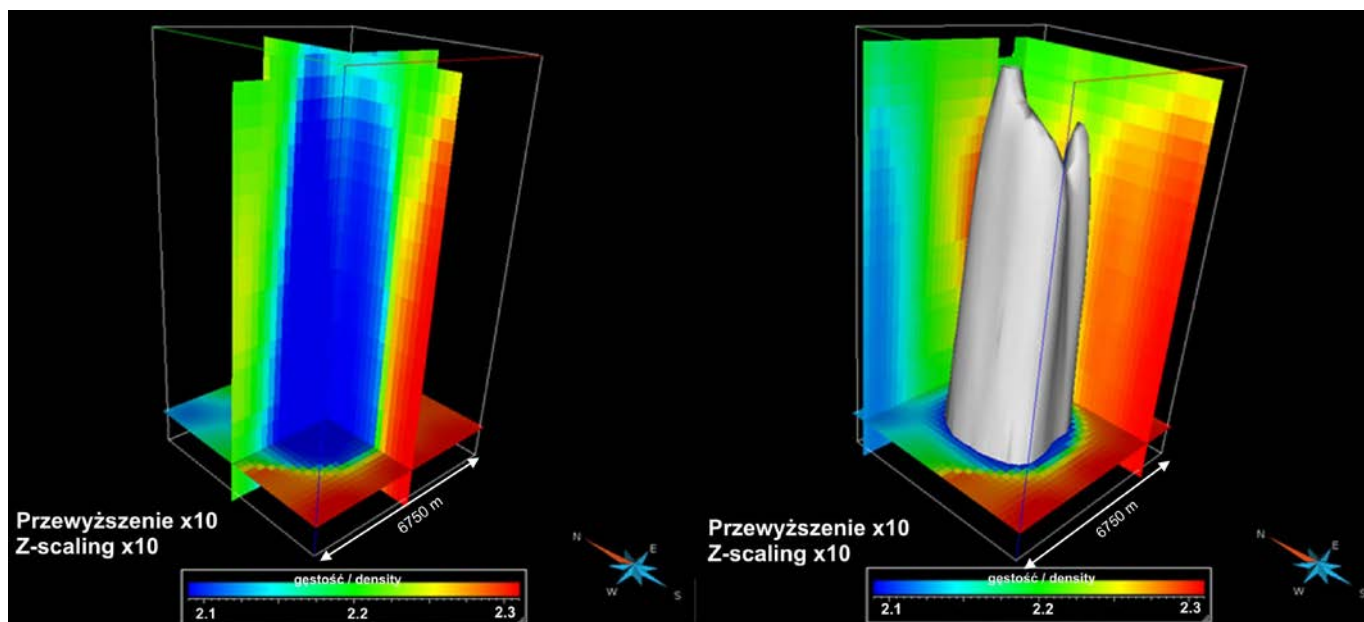
Do modelowania gęstościowego wykorzystano anomalie grawimetryczne w redukcji wolnopowietrznej, dzięki czemu możliwe było zbudowanie modelu od powierzchni terenu. Modelowanie wykonano w dwóch etapach. W pierwszym

etapie obliczono prosty model oparty o zdjęcie półszczełowe (Ryc. 11). Głównym efektem tego etapu było uzyskanie tła geologiczno-gęstościowego dla drugiego etapu, jakim było modelowanie samej struktury solnej. Etap ten realizowany był w oparciu o zdjęcie szczegółowe. Zdjęcie to w jednoznaczny sposób ukazuje niejednorodność modelowanego ciała.

Dużym problemem w tego typu analizach jest prawidłowe zróżnicowanie gęstości w obrębie samego wysadu (Ryc. 12 i 13). Obecność dwóch typów litologicznych o bardzo zróżnicowanej gęstości (lekka sól i ciężki anhydryt) powoduje, że jednoznaczność wynikowego modelu w dużym stopniu uzależniona jest od znajomości relacji miąższościowych poszczególnych typów skał budujących pień solny wysadu (dane z otworów wiertniczych bądź sejsmiki).

INTEGRACJA DANYCH I MODELOWANIE

Prace wykonywane były w układzie odniesienia PL-1992 tak więc zaimportowanie danych archiwalnych wymagało operacji technicznych związanych z cyfrowaniem i przeliczeniem danych do wspólnego układu. Procesowi digitalizacji podlegały mapy z „Dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej w wysadzie solnym Łanięta” (Parecka, 1980) w tym mapa strukturalna zwierciadła solnego oraz mapa geologiczna na poziomie -160 m n.p.m. a także interpretacje płytkich wysokorozdzielczych profili sejsmicznych i szereg przekrojów geologicznych przez rejon Lubień-Łanięta (Kasiński i in., 2009b). Przydatność zaimportowanych danych takich jak za-



a)

b)

Ryc. 12. Zastosowanie danych grawimetrycznych do określenia stropu wysadu solnego Łanięta

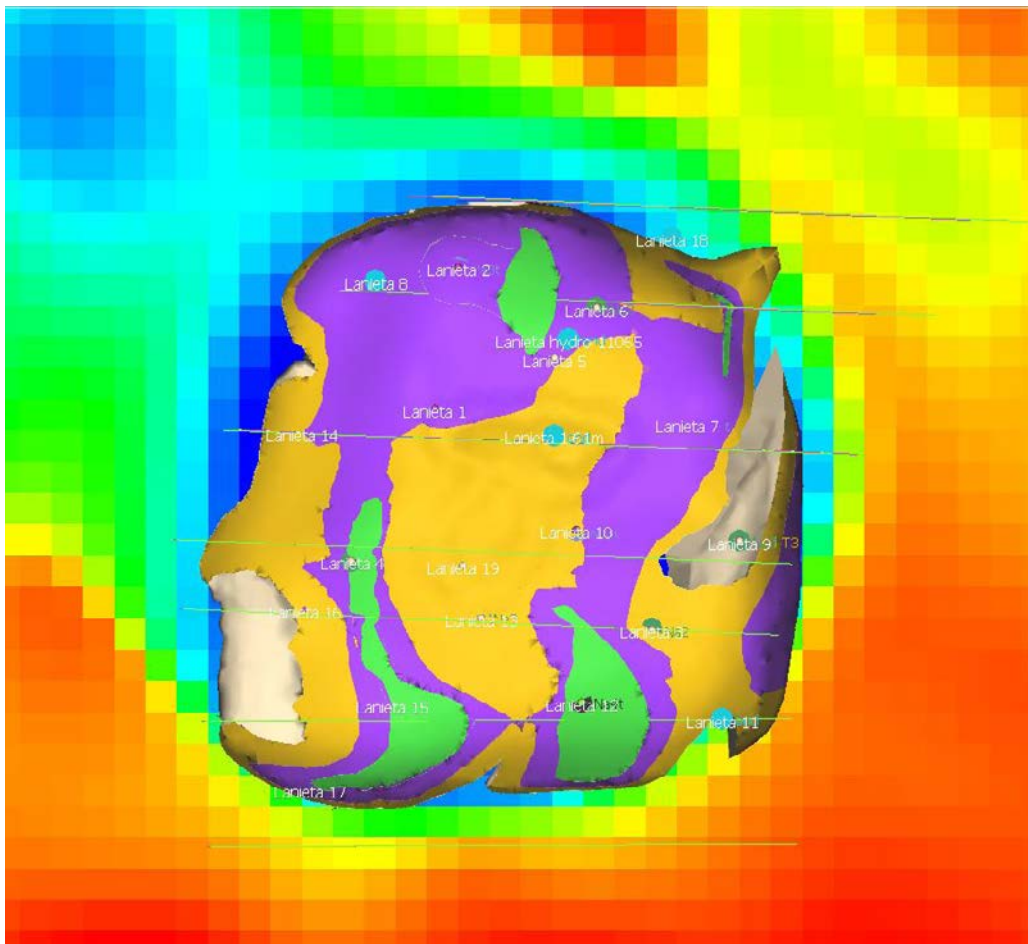
a) Rozkład gęstości w modelu lokalnym (z uwzględnieniem trendu z modelu regionalnego)

b) Zarys powierzchni wysadu Łanięta: izopowierzchnia dla wartości 2.1 g/cm³

Fig. 12. The use of gravity data to determine the top surface of Łanięta salt diapir

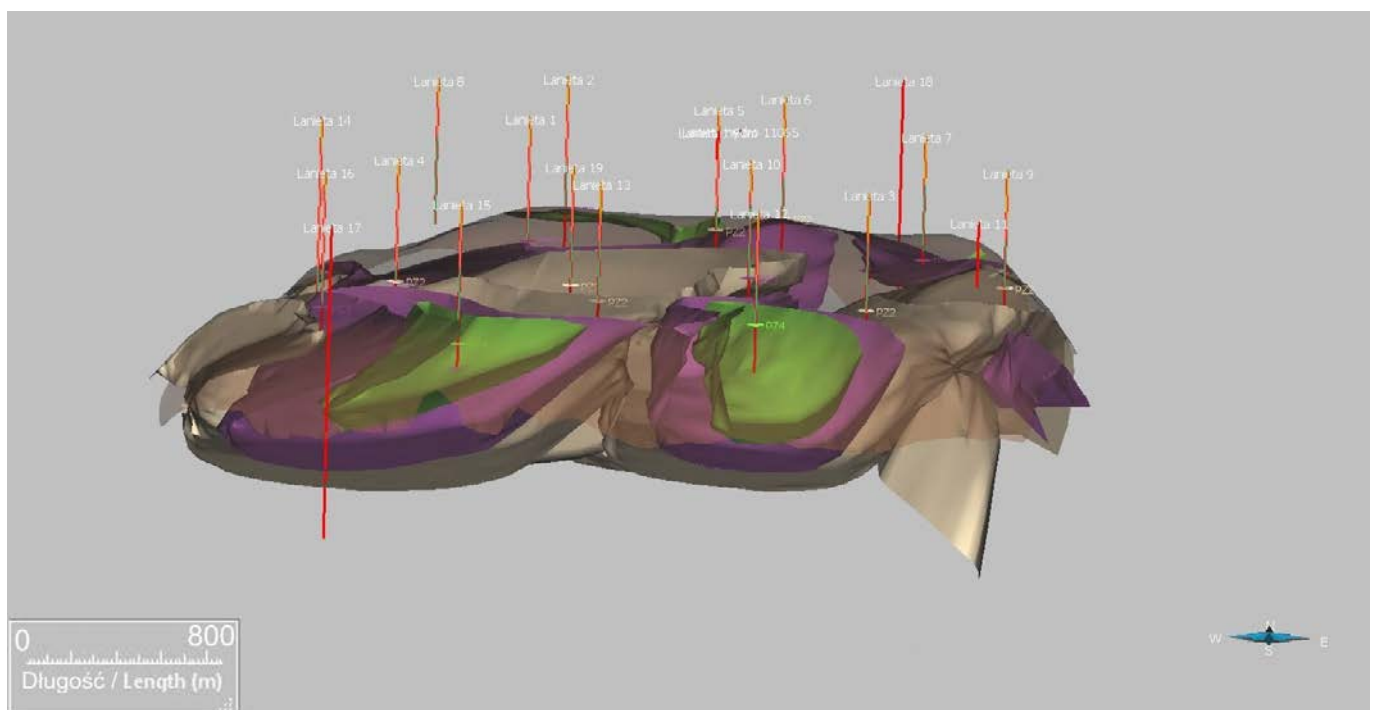
a) The density distribution in the local model (estimated with trends from the regional model)

b) Outline of top surface of the Łanięta salt diapir: isosurface for the value of 2.1 g/cm³



Ryc. 13. Model wysadu Łanięta na tle zdjęcia grawimetrycznego o rozdzielczości 200x200 m, na poziomie -575 m n.p.m.

Fig. 13. The model of salt diapir Łanięta on the background of the gravimetric scene (resolution 200x200m) for the horizon placed at -575 m above sea level



Ryc. 14. Wyinterpretowane powierzchnie spągowe cyklotemów cechsztynu: PZ2 (beżowy), PZ3 (fioletowy) i PZ4 (zielony) w obrębie wysadu solnego Łanięta; w profilach otworów zaznaczone markery powierzchni stropu cyklotemów.

Fig. 14. Estimated bottom surfaces of Zechstein cyclothem layers: PZ2 (beige), PZ3 (purple) and PZ4 (green) within the Łanięta salt diapir; the top surface of each cyclothem was marked in the boreholes

Tabela 1. Zestawienie reperowych danych otworowych dla rejonu wysadu solnego Łanięta

(cyklotemy cechsztynu: żółty – PZ4; pomarańczowy – PZ3; czerwony – PZ2)

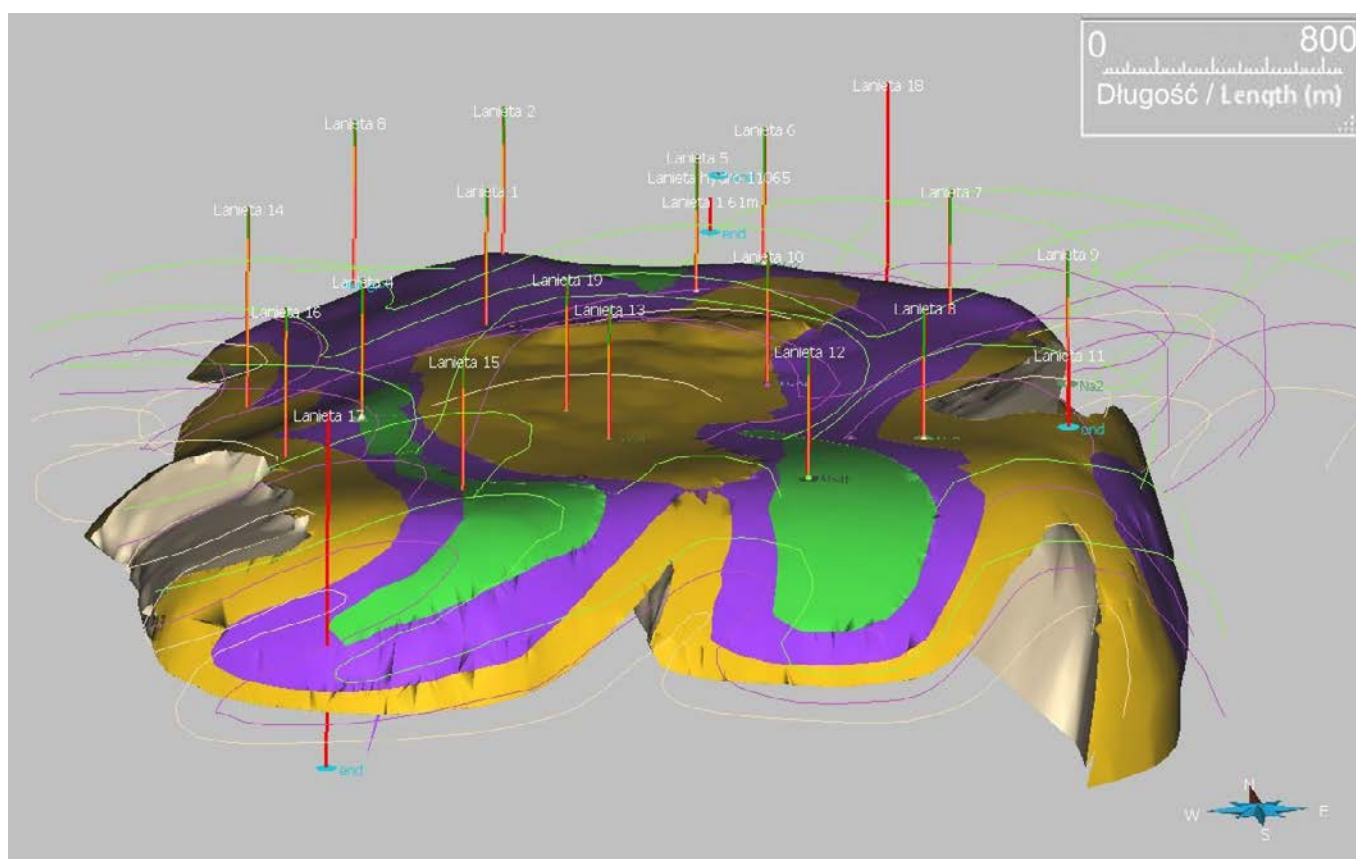
Table 1. List of benchmark borehole data for the Łanięta salt diapir area (Zechstein cyclothemes: yellow – PZ4; orange – PZ3; red – PZ2)

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego <i>Name and symbol of borehole</i>	Rzędna otworu (m n.p.m.) <i>Borehole altitude (m a.s.l.)</i>	Gł. końcowa otworu (m) <i>Borehole depth (m)</i>	Przedział głębokości (m) <i>Depth interval (m)</i>		Wydzielenie litostratygraficzne <i>Lithostratigraphic unit</i>	Cyklotem <i>Cyclotheme</i>	Ilość powtórzeń <i>Number of tectonic multiplication</i>
				Od <i>from</i>	Do <i>to</i>			
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
1	ŁANIĘTA Ł-01	132	452.7	257.3	403.1	A3 i T3	PZ3	4
2	ŁANIĘTA Ł-01	132	452.7	303.8	440	Na2	PZ2	3
3	ŁANIĘTA Ł-01	132	452.7	440	447	Na2-K2	PZ2	
4	ŁANIĘTA Ł-02	130.9	373.2	273.2	373.2	Na3t	PZ3	
5	ŁANIĘTA Ł-03 (Suchodębie)	126.7	500.5	243.1	500.5	Na2	PZ2	
6	ŁANIĘTA Ł-04 (Witoldów)	132	461.9	256.6	448.6	A3	PZ3	7
7	ŁANIĘTA Ł-04 (Witoldów)	132	461.9	254.4	461.9	Na2	PZ2	8
8	ŁANIĘTA Ł-05	130.4	353	252.5	353	Na2	PZ2	
9	ŁANIĘTA Ł-06	125	459.4	250	459.4	Na2	PZ2	
10	ŁANIĘTA Ł-07 (Franciszków)	125.1	344	241	258	Na3t	PZ3	
11	ŁANIĘTA Ł-07 (Franciszków)	125.1	344	258	344	Na3	PZ3	
12	ŁANIĘTA Ł-09 (Franciszków)	126.7	343	325	343	A3 i T3	PZ3	
13	ŁANIĘTA Ł-09 (Franciszków)	126.7	343	242	325	Na2	PZ2	
14	ŁANIĘTA Ł-10	127.1	346	242	346	Na3t	PZ3	
15	ŁANIĘTA Ł-12 (Suchodębie)	129.1	336.2	235.4	336.2	Na4t	PZ4	
16	ŁANIĘTA Ł-13 (Suchodębie)	127.1	350	245.2	350	Na2	PZ2	
17	ŁANIĘTA Ł-15 (Suchodębie)	131.8	345.8	245.5	315.6	Na4t	PZ4	2
18	ŁANIĘTA Ł-15 (Suchodębie)	131.8	345.8	291.4	344	Na4	PZ4	2
19	ŁANIĘTA Ł-15 (Suchodębie)	131.8	345.8	344	345.8	Na3	PZ3	
20	ŁANIĘTA Ł-16 (Budy Stare)	131.8	385	343.4	385	Na4t	PZ4	
21	ŁANIĘTA Ł-16 (Budy Stare)	131.8	385	282.5	343.4	Na3t	PZ3	
22	ŁANIĘTA Ł-19	129.9	360	348.8	360	A3 i T3	PZ3	2
23	ŁANIĘTA Ł-19	129.9	360	248	355.2	Na2	PZ2	2

się i kształt czapy, lustra solnego czy wydzielen w obrębie poszczególnych cyklotemów cechsztynu została zweryfikowana na podstawie opisów otworów wiertniczych (Tab. 1.).

Na podstawie lokalnego modelu rozkładu gęstości i wierceń konturujących wysad ustalono kształt diapiru i czapy gipsowo-anhydrytowo ilastej. Analizując interpretację sejsmiki oraz przekroje pośrednio na niej oparte stwierdzono ich małą przydatność, prawdopodobnie ze względu na błędy przeliczeniowe z domeny czasu do domeny głębokości, czego konsekwencją jest znaczne przesunięcie granicy wysadu w kierunku wschodnim, nie mające potwierdzenia w otworach i grawimetrii. Przekroje lokalizowane były w przestrzeni 3D na podstawie mapy lokalizacyjnej sekcji oraz zaznaczonych na

opracowaniu otworów. Zespół nie dysponował dodatkowymi szczegółowymi informacjami na temat relacji między danymi sejsmicznymi a innymi danymi i interpretacjami, dzięki którym możliwe byłoby określenie przyczyn stwierdzonych rozbieżności. Po zestawieniu danych, z uwagi na charakter erozyjny powierzchni lustra solnego, zdecydowano się na wy-modelowanie przebiegu powierzchni spągowych poszczególnych cyklotemów. Metodyka opierała się na wygenerowaniu serii 7 przekrojów o przebiegu W-E, prostopadłym do orientacji synklin (Parecka, 1980). Modelowane powierzchnie spągowe zestawiono z danymi archiwalnymi - mapą geologiczną na poziomie -160 m n.p.m. (op. cit.) i ostatecznie ograniczono je powierzchniami zwierciadła solnego i stropu czapy wysa-

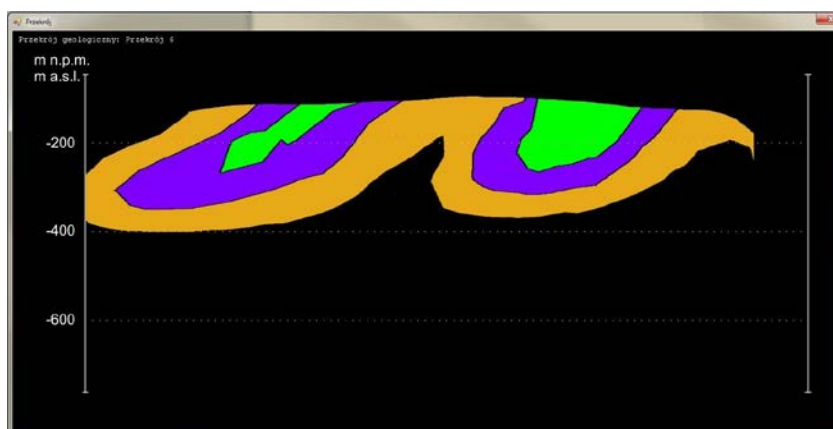
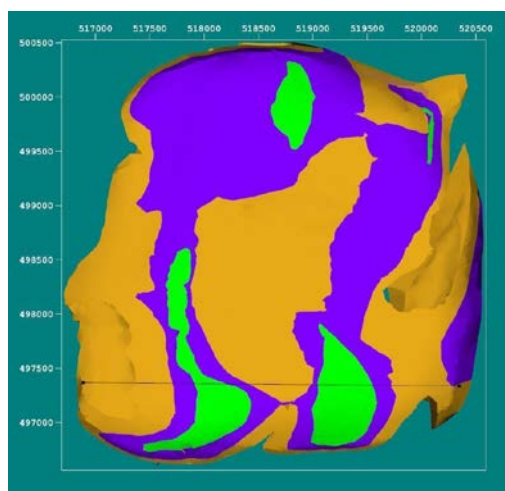


Ryc. 15. Bryły poszczególnych cyklotemów w obrębie wysadu solnego Łaniewa wraz z liniami interpretacji powietrznej (ciągłe kolorowe linie). Objasnienia jak na Ryc. 13

Fig. 15. The cyclothemes solids within the Łaniewa salt diapir with lines of the air interpretation (color continuous lines). Other captions as on Fig. 13.

du. Kolejnym etapem było modelowanie powierzchni stropowych poszczególnych cyklotemów. Łącząc powierzchnie stropowe i spągowe uzyskano bryły reprezentujące poszczególne cyklotemy (Ryc. 14 i 15).

Model bryły wysadu solnego umiejscowiony jest w obrębie modelu strukturalnego, który zawiera powierzchnie spągowe wydzielenia stratygraficznego i numerycznego modelu powierzchni terenu (ISOK – model zgeneralizowany do roz-



b)

Ryc. 16. Model wysadu solnego Łaniewa do głębokości rozpoznania otworami wiertniczymi (utwory cyklotemów: PZ4 - zielony, PZ3 – fioletowy i PZ2 - beżowy) powstały w wyniku integracji danych i interpretacji – przeglądarka Geo3D; (a – rzut na powierzchnię stropu zwierciadła solnego; b – przekrój –

Fig. 16. The model of Łaniewa salt diapir to the depth recognized by borehole (deposits of cyclothemes: PZ4 - green, PZ3 – purple and PZ2 - beige) as a result of data integration and their interpretation – Geo3D viewer (a – throw on the surface salt diapir; b – cross section)

dzielczości 35 m). Poszczególne horyzonty to powierzchnie spągowe utworów: czwartorzędu, neogenu i paleogenu oraz jury.

Budowę geologiczną wysadu przedstawiono w postaci przypuszczalnego położenia powierzchni granicznych cyklotemów cechsztynu, bez szczegółowego podziału litostratigraficznego utworów ewaporatowych. Zdecydowano się na takie rozwiązanie głównie z powodu niewystarczającej ilości danych i ich zasięgu głębokościowego. Brak także informacji i przesłanek pozwalających symulować jak w tak skomplikowanym i sfałdowanym obrazie zachowałyby się stosunkowo sztywny anhydryt, jednocześnie nie można potwierdzić czy nie tworzyłby on odrębnych bloków. Pod utworami cyklotemu PZ2 występują kolejne powtórzenia serii solnych nieudokumentowane danymi otworowymi. Można przewidywać, że szczegółowe georadarowe w obrębie wysadu umożliwią wyodrębnienie stref występowania anhydrytu i uszczegółowienie budowy wewnętrznej wysadu.

Korzystając z opracowanej i utworzonej przez zespół PIG-PIB przeglądarki komputerowej Geo3D, można będzie udostępnić wizualizację modelu wysadu solnego. Predefiniowany model pozwoli zobrazowywać wglębną budowę struktury solnej poprzez wygenerowanie trójwymiarowych blokdiagramów, przekroi i profili geologicznych oraz wygenerować wirtualne otwory wiertnicze (Ryc. 16).

PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki prac mają na celu prezentację metodyki integracji danych dotyczących budowy geologicznej wysadów solnych na przykładzie wysadu Łanięta. Wyniki należy potraktować jako wstępne, ponieważ dotyczą tylko górnej części wysadu i jego nadkładu. Są one wynikiem prac określonych danymi, które posiadał zespół modelujący. W miarę pojawiania się nowych danych, tych zarówno pozyskanych w przyszłości, jak i danych archiwalnych, które dotychczas nie zostały wykorzystane, model może zostać poddany reambulacji celem jego uszczegółowienia. Dodatkowo model wglębnej budowy geologicznej wysadu powinien zostać uzupełniony danymi powierzchniowymi, które zobrazują nie tylko wewnętrzną budowę wysadu wraz z jego otoczeniem, ale również powinien uzupełnić ten obraz modelem powierzchni terenu wraz z infrastrukturą podziemną. Da to podstawę m.in. do racjonalnego planowania zagospodarowania przestrzeni podziemnej, a w przypadku współwystępowania wielu form działalności gospodarczej umożliwi podjęcie właściwej decyzji środowiskowej i administracyjnej.

PODZIĘKOWANIA

W realizacji zadania wykorzystano oprogramowanie gOcad/Skua, za którego licencje dziękujemy firmie Paradigm.

SUMMARY

Nowadays 3D models of geological structures are a necessary tool of research and a main method to present regional and local geological structures. They are also useful for spatial planning of mineral resources. The presented model of the Łanięta salt diapir was constructed basing on integration of geological and geophysical data (present and archival, digital and analogue ones) (Fig. 1). The main part of modelling process based on detailed and semi-detailed gravimetric scenes. All analysis were conducted in 3D environment (3D software).

The Łanięta salt diapir is located in a NE part of Kłodawa upland, in the middle part of the Kujawy-Pomorze Anticline, in the Kutno elevation above the Lubień Kujawski-Łanięta salt anticline (Fig. 2). The diapir was identified by E. Janeczowski between 1937 and 1939 years after the gravimetric research. In the 50's and 60's of previous century the salt diapir was appointed thanks to seismic investigations (Czapowski et al., 2005). The Łanięta salt diapir is a middle size diapir, the horizontal section shows it like an ellipsoid with 3,7 and 3,3 km long axis and 9,9 km² area. A salt mirror was identified on -235,4-550,0 m asl. External boundary of the diapir are semi-vertical. There is a gypsum-anhydrite and gypsum-clay cap rock above salt mirror (at 141,5-386,4 m asl) (Parecka, 1980) (Fig. 3).

Structural layers were identified with borehole data (Fig. 4). Additionally synthetic maps of the investigated area (Parecka, 1980) (Fig. 5) were used in modelling processes. The newest 6 geoelectric profiles (Pacanowski et al., 2016) located above a contact were salt diapir and cap rock and the surrounding geological structures were analysed and interpreted together with boreholes data, seismic data and archival cross sections (Fig. 7). The only seismic data that was used in modelling process from the study of perspectives nearby salt diapirs in the Polish Lowlands (Kasiński et al., 2009b) (Fig. 8).

The boreholes are unevenly sampled so it was necessary to estimate a density based on lithology, stratigraphy and the trend of changes in density with depth. For each lithologic and stratigraphic unit weighted average was counted (thickness was the weight) (Fig. 9). The relation between a volume weight of sandstones and their occurrence depth stratigraphic units from whole Poland was shown of Fig. 10.

The analysis of semidetached gravity scene gave the geological-density background (Fig. 11) for modelling of salt structure. The main problem was the density differentiation inside the salt diapir (Fig. 12, 13). The coexistence of light salt and heavy anhydrite requires the knowledge of the relationship thickness of different types within the salt diapir (eg. boreholes data, seismic data).

Whole analysis and interpretation were prepared in coordinate system PL-1992. The imported archival data (Parecka,

1980; Kasiński et al., 2009b) had to be digitized and converted to the common coordinate system. This simple solution allowed to compare seismic interpretations (Kasiński et al., 2009b) with other spatial data as boreholes and maps of Łanięta area. For evaluation of imported data used borehole descriptions (Tab. 1).

The shape of salt diapir and gypsum-anhydrite-clay cap rock was predicted with local density distribution and boreholes data. The analysis of seismic interpretation and cross sections shows differences that probably resulted of some mistakes made during time-depth conversion - the boundary of the Łanięta salt diapir on horizontal sections was moved eastward.

Due to the erosive nature of the salt mirror surface, insufficient number of data and their depth range decided to model the boundary surfaces separating individual Zechstein cyclothems without a detailed subdivision of evaporite rocks. Additionally there is no data which allow to simulate the behavior of a stiff anhydrite in a complex and folded salt structure. Joining the boundary surfaces of units received a solids of individual cyclothemes to the depth penetrated by boreholes.

The salt diapir model is located inside a structural model built with bottoms of several stratigraphic units (Quaternary, Neogene, Paleogene, Jurassic) and digital elevation model. Below the deposit of PZ2 cyclothem there are other repeating salt series non documented by borehole data. It could be predicted that detailed geophysical research allow to detect location of anhydrite layers and recognize the detailed structure of salt diapir.

The study results intended to present the methodology for integrating data on the geological structure of salt diapirs on the example of the Łanięta salt diapir. This study should be treated as experimental, because it apply only to the top of the salt structure. The model is the preliminary product of analysis and interpretation of data, which were held by PGI modeling team.

The presented model will be reconstructed and upgraded to detailed its structure in situation then a new data will be delivered. Additionally, the model of deep geological structure of the diapir should be developed with the surface and infrastructure data. This solution, among others, allows to rationalize planning of underground excavations and in the case of coexisting of many business forms makes the optimal environmental and administrative decision.

LITERATURA/REFERENCES

CHEŁMIŃSKI J., TOMASZCZYK M., SŁODKOWSKI M., CZAPOWSKI G., MISIEK G., 2008. Informatyczny system rejestracji zagrożeń wodnych w Kopalni Soli Kłodawa w Kłodawskim

Wysadzie Solnym (Centralna Polska). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24 (3/2): 185-195. Kraków.

- CZAPOWSKI G., CHEŁMIŃSKI J., TOMASZCZYK M., TOMASSI-MORAWIEC H., 2007. Metodyka modelowania przestrzennego budowy geologicznej osadowych złóż pokładowych na przykładzie cechsztyńskiego złoża soli kamiennej „Mechelinki” nad Zatoką Pucką. *Prz. Geol.*, 55 (8): 681-689. Warszawa.
- CZAPOWSKI G., KASIŃSKI J., KRZYWIEC P., POLECHOŃSKA O., TOMASSI-MORAWIEC H., WRÓBEL G., BURLIGA S., WILKOSZ P., 2005. Ocena złóż solnych w rejonie Pomorza i Kujaw pod kątem ich przydatności do eksploatacji metodą otworową. IKS SOLINO S.A, Inowrocław: 1-101.
- CZAPOWSKI G., TOMASZCZYK M., GAŚKA K., WILKOSZ P., GRZYBOWSKI Ł., 2013. Model 3D budowy geologicznej złoża soli kamiennej Mechelinki w świetle wyników prac prowadzonych podczas budowy KPMG Kosakowo. *Przegląd Solny/Salt Review*, 9: 79-80. Kraków.
- CZOCHAL S., 2013. Dokumentacja geologiczna złoża wydobywanego soli kamiennej „Goleniów” w kat. D w miejsc. Zielonczyn gm. Stepnica, Goleniów, woj. zachodniopomorskie. NAG PIG [271/2014], Warszawa.
- DADLEZ R., MAREK S., POKORSKI J., 2000. Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku w skali 1:1000 000. PIG-PIB. Warszawa.
- KASIŃSKI J. R., CZAPOWSKI G., PIWOCKI M., 2009a. Rola halokinezy w powstawaniu trzeciorzędowych złóż węgla brunatnego na Niżu Polskim. *Prz. Geol.*, 57 (11): 964-975.
- KASIŃSKI J. R., KRZYWIEC P., CZAPOWSKI G., KIJEWSKA S., SATERNUS A., URBAŃSKI P., WRÓBEL G., PAPIERNIK B., SIUPIK J., 2009b. Perspektywy występowania węgla brunatnego w sąsiedztwie wysadów solnych na Niżu Polskim. NAG PIG-PIB, Warszawa
- MUSIATEWICZ M., 2016. Analiza istniejących danych grawimetrycznych z zasobów CBDG wraz z ich interpretacją. Podzadanie projektu: „Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D”. Projekt w trakcie realizacji.
- PACANOWSKI G. CZARNIAK P., 2016. Przygotowanie linii podstawowych profili badawczych na potrzeby pomiarów geoelektrycznych i robót geologicznych” oraz „Realizacja pomiarów geofizycznych. Podzadania projektu: „Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D”. Projekt w trakcie realizacji.
- PARECKA K., 1980. Dokumentacja geologiczna w kat. C1 złoża soli kamiennej w wysadzie solnym ŁANIĘTA. NAG PIG-PIB [13772], Warszawa.
- PIĄTKOWSKA A., CZYRYŁOWICZ K., PRZYLUCKA M., NOWACKI Ł., CHEŁMIŃSKI J., TOMASSI-MORAWIEC H., 2013. Przestrzenny model 3D wydobywanego Inowrocław wraz z oznaczeniem przemieszczeń powierzchni terenu przy wykorzystaniu badań interferometrycznych. *Przegląd Solny/Salt Review*, 9: 117-119. Kraków.