

## Geofizyczno-geologiczne badania stropu i nadkładu wysadu solnego „Damasławek”

Piotr Krzywiec\*, Marek Jarosiński\*, Jerzy Twarogowski\*, Stanisław Burliga\*\*, Jan Szewczyk\*, Stanisław Wybraniec\*, Grzegorz Czapowski\*, Piotr Zientara\*, Zdzisław Petecki\*, Aleksander Garlicki\*\*\*

*Celem prowadzonych prac było określenie budowy geologicznej czapy anhydrytowej oraz nadkładu wysadu solnego „Damasławek”. Podstawowym narzędziem badawczym były wysokorozdzielcze dane sejsmiki refleksyjnej. Dodatkowo wykonano pomiary i interpretację danych geoelektrycznych, oraz reinterpretację archiwalnych danych grawimetrycznych i geofizyki otworowej. Uzyskane dane sejsmiczne charakteryzowały się wysoką jakością. Zintegrowana interpretacja geofizyczno-geologiczna pozwoliła na bardzo precyzyjne określenie głównych i podrzędnych deformacji tektonicznych, rozwiniętych w obrębie czapy oraz w jej nadkładzie. Zidentyfikowano wiele reaktywowanych uskokuw inwersyjnych, które najprawdopodobniej przynajmniej częściowo były związane z ruchami przesuwczymi. Analiza sejsmostratygraficzno-tektoniczna pokazała, iż niektóre strefy uskokuwe były aktywne również w czwartorzędzie.*

**Słowa kluczowe:** wysokorozdzielcza sejsmika refleksyjna, geoelektryka, grawimetria, zintegrowana interpretacja, tektonika solna, składowiska materiałów radioaktywnych

Piotr Krzywiec, Marek Jarosiński, Jerzy Twarogowski, Stanisław Burliga, Jan Szewczyk, Stanisław Wybraniec, Grzegorz Czapowski, Piotr Zientara, Zdzisław Petecki & Aleksander Garlicki — **Geophysical-geological study of caprock and overburden of the “Damasławek” salt dome (Central Poland).** Prz. Geol., 48: 1005–1014.

*Summary. The goal of completed research project was to establish reliable geological model of cap rock and overburden of the “Damasławek” salt dome. High-resolution reflection seismic profiling was main research method used for this project. Additionally, geoelectrical profiling and interpretation as well as reinterpretation of available gravity and well log data was completed. Acquired seismic data were of very high quality. Integrated geophysical-geological interpretation allowed the major and subordinate tectonic deformations present within cap rock and salt dome’s overburden to be precisely distinguished. Numerous inversion faults possibly at least partly related to strike-slip movements were identified. Seismostratigraphic-tectonic analysis showed that some of identified fault zones were active also during the Quaternary.*

**Key words:** high-resolution reflection seismic methods, geoelectric methods, gravimetry, integrated interpretation, salt tectonics, radioactive waste disposal sites

Mimo, iż Polska jako jeden z bardzo niewielu krajów europejskich nie ma elektrowni jądrowej, problem składowania odpadów radioaktywnych dotyczy również i naszego kraju. Z jednej strony nie można wykluczyć powstania polskiej energetyki jądrowej w przyszłości, z drugiej — ciągle aktualny jest problem bezpiecznego składowania odpadów powstających np. w szpitalnictwie. Jednym z najszerzej stosowanych sposobów zabezpieczania odpadów radioaktywnych na świecie jest ich składowanie w obrębie wysadów solnych. Wysady, ze względu na uszczelniające właściwości soli, mogą zapewniać bezpieczne warunki składowania wysokotoksycznych odpadów radiaktywnych. Niestety, plastyczne sole stosunkowo łatwo ulegają mobilizacji, co jest bezpośrednim powodem halokinezy. Oznacza to, iż przed posadowieniem składowiska należy przeprowadzić analizę młodej i współczesnej dynamiki wysadu poprzez precyzyjny opis rozkładu deformacji tektonicznych, zwłaszcza związanych z ostatnimi fazami jego rozwoju (por. Zirngst, 1996). Jest to istotne ze względu na możliwość infiltracji wód podziemnych strefami uskokuwymi w obręb składowiska, co mogłoby doprowadzić do jego zniszczenia i zanieczyszczenia wód podziemnych substancjami radioaktywnymi.

Przeprowadzone dotychczas na zlecenie Państwowej Agencji Atomistyki (PAA) prace studialne doprowadziły do wyselekcjonowania wysadu solnego „Damasławek” jako potencjalnego miejsca składowania odpadów radioaktywnych (Garlicki, 1997, 1998). PAA podjęła zatem decyzję o wykonaniu badań geofizycznych, mających na celu rozpoznanie budowy geologicznej czapy gipsowo-anhydrytowej wysadu „Damasławek” oraz jego nadkładu, a w szczególności:

□ topografii czapy i jej miąższości, występowania stref nieciągłości (uskokuw, głównych systemów spękań lub brekcji tektonicznych) oraz, w miarę możliwości, niejednorodności litologicznych;

□ niejednorodności litologicznych i stref nieciągłości w bezpośrednim nadkładzie czapy.

Podstawową metodą badawczą zastosowaną w trakcie badań wysadu solnego „Damasławek” były płytkie refleksyjne profilowania sejsmiczne o wysokiej rozdzielczości. Uzupełniająco zastosowano badania geoelektryczne oraz reinterpretację archiwalnego szczegółowego zdjęcia grawimetrycznego. W trakcie prac interpretacyjnych przeprowadzono również reinterpretację dostępnych danych otworowych. Polowe prace sejsmiczne wraz z przetworzeniem pozyskanych danych zostały wykonane na zlecenie Państwowego Instytutu Geologicznego przez Zakład Geofizyka-Toruń Sp. z o.o., natomiast pomiary i wstępną interpretację danych geoelektrycznych zlecono do firmy GEOSERWIS. Integracja danych geofizycznych oraz interpretacja geologiczna zostały wykonane w Państwowym Instytucie Geologicznym.

\*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

\*\*Uniwersytet Wrocławski, ul. M. Borna 9, 50-204 Wrocław

\*\*\* Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

## Zarys budowy geologicznej wysadu solnego „Damasławek“ i jego czapy

Wysad „Damasławek”, zbudowany ze zdeformowanych utworów cechsztyńskich, zlokalizowany jest w ciągu struktur solnych o długości ok. 20 km i biegu NW-SE, do którego należy również wysad Wapna (Dadlez & Marek, 1974; Tarka, 1992; ryc. 1). Oba diapiry przebijają się na powierzchnię spągu trzeciorzędu. W sąsiedztwie wysadu „Damasławek” znajdują się również inne struktury solne typu poduszek solnych (np. w rejonie Szubina). Jego regionalna pozycja geologiczna została zobrazowana na pomierzonych w latach 1970 sejsmicznych profilach naftowych (ryc. 2).

Ponad czapą wysadu „Damasławek” występują osady kredy górnej (piaskowce glaukonitowe z gniazdami iłowców, mułowce, ily i margle grubości od 0,88 m do 2100,5 m — Kornowska, 1983; Garlicki, 1997–1998) oraz trzeciorzędu (oligocen?, miocen i pliocen) — piaski-piaszkowce, mułki-mułowce, ily, soczewy i poziomy węgły brunatnych, łącznej miąższości od 69 m do 245 m. Całość przykrywają osady czwartorzędu (gliny zwałowe, piaski, pospółki i żwiry) grubości 81–250 m. W obrębie wysadu, bezpośrednio pod zwierciadłem solnym znajdują się utwory cyklotemów PZ2, PZ3 i PZ4. Chlorki cyklotemu PZ2 to głównie jasnoszare i białe sole kamienne, średnio- i grubokrystaliczne, różnobarwne zaś miodowe, różowe i pomarańczowe — sole kamienne przypisuje się cyklotemom PZ3 i PZ4. Ponadto w ogniwach cykli PZ2 i PZ3 występują smugi, wprysnięcia lub gniazda soli potasowo-magnezowych (karnalit, sylwinit, kizeryt).

Na podstawie danych z licznych wierceń (Kornowska, 1983), stwierdzono, że w profilu pionowym czapy występuje stopniowa dehydratacja siarczanu wapnia i malejący udział klastyków: w stropie pojawiają się ily z okruchami gipsu oraz gips z domieszką materiału ilastego, zaś spąg czapy buduje głównie anhydryt. W części środkowej czapy przeważa anhydryt, gipsy zaś i brekcje siarczanowo-iłowe z wkładkami klastyków tworzą jej brzegi. Wśród utworów tworzących czapę wysadu wyróżniono cztery litofacje:

□ czapy siarczanowej (beztęksturalne bądź smugowane i laminowane gipsy i anhydryty — formujące się dzięki infiltracji wód w pierwotne ewaporaty wysadu),

□ pokryw ilastych (ily/iłowce, mułowce i margle z gruzłami siarczanów — to gromadzony w obniżeniach/kawernach czapy siarczanowej rezydualny materiał pelityczny oraz allochtoniczny, ponadto wynik koncentracji nierozpuszczalnych rezydów poniżej czapy gipsowej, a wzdłuż powierzchni niszczonego pnia solnego),

□ krasowych brekcji siarczanowo-iłowych (gruzłowe, brekcjowate siarczany z matryksem ilastym — powstałe zapewne w wyniku kolapsu ścian i stropów kawern krasowych, wyługowanych w porowatej czapie gipsowej, i/bądź redepozycji rumoszu w zagłębienia/kawerny czapy),

□ allochtonicznych wypełnień kawern krasowych (piaskowce i mułowce, wypełniające systemy spękań i kawern w obrębie czapy gipsowej).

### Pomiary geofizyczne i przetwarzanie danych

W celu rozpoznania budowy geologicznej stropowej części wysadu „Damasławek” i jego nadkładu przeprowadzono połowe pomiary sejsmiczne i geoelektryczne. Wykonano również w szerokim zakresie reinterpretację danych otworowych oraz grawimetrycznych. Lokalizacja

profilu sejsmicznych i geoelektrycznych oraz wykorzystanych otworów przedstawiona jest na ryc. 3.

**Dane sejsmiczne.** Prace sejsmiczne zostały wykonane przez grupę sejsmiczną nr 4 Zakładu Geofizyka-Toruń. Składało się na nie 5 profili sejsmicznych o łącznej długości 20,50 km. Cztery z nich zlokalizowano w poprzek struktury solnej, jeden zaś pokrywał się z osią podłużną wysadu (ryc. 3). Poprzedzono je wykonaniem prac doświadczalnych w celu określenia optymalnych parametrów wzbudzenia i rejestracji. Opinia hydrogeologiczna wykluczyła, ze względu na gęstą sieć drenarską oraz liczne rurociągi podziemne i dużą ilość linii energetycznych, możliwość wykonania prac z zastosowaniem źródła eksplozyjnego. Do wzbudzenia drgań użyto zatem wibratora Mark IV. Rejestracje prowadzono przy pomocy nowoczesnej aparatury telemetrycznej, wykorzystując 120 kanałów sejsmicznych. Odległość między kanałami wynosiła 10 m, odległość między punktami wzbudzenia 20 m. Zastosowano rozstaw środkowy o maksymalnej odległości kanału od punktu wzbudzenia wynoszącej 600 m. Czas rejestracji wynosił 2 sekundy, krok próbkowania 1 milisekundę. Grupowano 12 geofonów na każdy kanał.

Przetwarzanie danych sejsmicznych wykonano przy pomocy systemu ProMAX. Metodę dobrano po licznych testach. Wiele uwagi poświęcono tłumieniu fal zakłócających, usunięciu pojedynczych wysokoamplitudowych zakłóceń, a nawet całych nieakceptowalnych rejestracji i tras sejsmicznych. Usunięto efekty dywergencji sferycznej i tłumienia ośrodka, oraz przeprowadzono stosowaną dla wibratorowych źródeł wzbudzenia zerofazowo-minimalnofazową konwersję zapisu sejsmicznego. Zastosowano wielokanałową dekonwolucję typu *spike* oraz zmienne w czasie wybielanie widma sygnału sejsmicznego. Interaktywne analizy prędkości wykonywano w trzech iteracjach co ok. 0,5 km i 0,2 km. Przed sumowaniem wykonano automatyczną korektę poprawek statycznych, wprowadzono poprawki kinematyczne, wykonano *muting* i skalowanie tras. Po sumowaniu zastosowano wybielanie widma i dekonwolucję w celu poprawienia stosunku sygnał/zakłócenie i rozdzielczości sygnału, filtrację pasmową (wybrano pełne pasmo 20–30–100–120 Hz), końcowe skalowanie amplitud i migrację czasową z zastosowaniem wygładzonego pola prędkości sumowania zredukowanego do 95%. Dodatkowo na najdłuższym z profili zastosowano następującą procedurę: obliczono atrybuty zapisu sejsmicznego, wykonano migrację głębokościową przed składaniem oraz opracowano sekcję po inwersji sejsmicznej.

**Dane geoelektryczne.** Pomiarowe prace geoelektryczne były realizowane w wersji sondowań elektrooporowych, usytuowanych wzdłuż 6 ciągów (Jagodzińska & Kalituk, 1999). Łączna długość ciągów wynosiła 24 km (ryc. 3). Sondowania geoelektryczne wykonywano też w miejscu lokalizacji 16 archiwalnych otworów wiertniczych. Były to krzyżowe sondowania parametryczne. W sumie wykonano 84 sondowania na liniach ciągów oraz 32 sondowania na otworach archiwalnych, razem 116 sondowań. Maksymalne rozstawy sondowań wynosiły przeważnie AB = 2000 m, co w warunkach geoelektrycznych obszaru zapewniało głębokość prospekcji do ok. 500 m. Pomiary wykonywano aparaturą GMS-95. Wyniki sondowań zapisane zostały w tabeli, zawierającej oprócz współrzędnych sondowania i azymutu linii prądowej, wartości oporu pozornego i rozstaw AB/2 linii pomiarowej. Te dwie ostatnie wartości posłużyły do zestawienia krzywych sondo-





**Dane geofizyki otworowej.** We wszystkich otworach zlokalizowanych na omawianym obszarze były wykonane badania z zakresu geofizyki wiertniczej. Badania te obejmowały standardowy kompleks metod badawczych. Zakres prac reinterpretacyjnych został określony przede wszystkim przez potrzeby powierzchniowych metod geofizycznych (sejsmika i grawimetria), których podstawowym celem interpretacyjnym było określenie profilu prędkościowo-gęstościowego dla wybranych otworów wiertniczych. Fragmentaryczność wykonanych profilowań akustycznych, jak również wątpliwości co do jakości danych (a w odniesieniu do utworów młodszych od cechszynu całkowity ich brak), spowodował konieczność konstrukcji syntetycznych profilowań akustycznych oraz syntetycznych profilowań gęstości. W pracach interpretacyjnych zastosowano opracowany w Państwowym Instytucie Geologicznym system interpretacyjny GEOFLOG (Szewczyk, 1994). Profilowania syntetyczne zostały obliczane na podstawie profilu objętościowego skały określanej na drodze interpretacji istniejących profilowań. Ze względu na charakter danych wejściowych zastosowano uproszczony 3-składnikowy model skały (szkielet + zailenie + przestrzeń porowa) oraz najbardziej uniwersalny model prędkościowy (Han i in., 1986). Model ten zakłada istnienie liniowych zależności między składnikami badanych skał a obserwowaną prędkością fal akustycznych. Model ten jest dostatecznie dokładny dla większości formacji mezozoicznych na obszarze Niżu Polskiego (Szewczyk, 1998). W wykonanych pracach interpretacyjnych przyjęto literaturowe wartości prędkości fal akustycznych dla podstawowych składników litologicznych skał.

Na ryc. 4 przedstawiono na przykładzie otworu Damasławek IG-5 zestawienie wyników określania obydwo wymienionych typów profilowań syntetycznych z innymi danymi geofizycznymi oraz geologicznymi. Profilowania syntetyczne ze względu na jednolitość przyjętych założeń interpretacyjnych wykazują spójność między poszczególnymi otworami, podczas gdy wyniki bezpośrednich pomiarów charakteryzują się różnicowanym charakterem w poszczególnych otworach (co sugeruje możliwość błędnej ich kalibracji). W rejonie wysadu solnego „Damasławek” sejsmiczne profilowania prędkości (wyznaczenie prędkości średnich) wykonane zostały w dwóch otworach: Damasławek IG-11 oraz Damasławek-22. Ze względu na relatywnie duże oddalenie tego ostatniego od badanego obszaru podstawowym źródłem informacji o profilu prędkości sejsmicznych były dane z otworu Damasławek IG-11. Można założyć, że w tych samych ogniwach litostratygraficznych w dostatecznie bliskich otworach istnieje zbliżony rozkład prędkości sejsmicznych. Opracowano formuły określające zależność prędkości warstwowych od głębokości (dla poszczególnych wydzieli litostratygraficznych), które zastosowano do konstrukcji teoretycznych hodografów pionowych dla interpretowanych otworów. Uzyskane dane posłużyły do kalibracji syntetycznych profilowań akustycznych.

### Interpretacja danych geofizycznych

**Dane sejsmiczne.** Jednym z pierwszych problemów do rozwiązania w trakcie interpretacji danych sejsmiki refleksyjnej jest jak najprecyzyjniejsze dowiązanie danych otworowych (stratygrafia przewierconych osadów, ich litologia, itd.) i danych sejsmicznych.

Do korelacji otworowo-sejsmicznej użyto programu SynTool wchodzącego w skład systemu interpretacyjnego firmy Landmark Graphics Corp. i służącego do konstrukcji sejsmogramów syntetycznych. Po przetestowaniu szeregu sygnałów teoretycznych o różnych parametrach zdecydowano, iż do konstrukcji sejsmogramów syntetycznych zostanie wykorzystany zerofazowy sygnał Rickera o częstotliwości dominującej 50Hz. Procedura konstrukcji i korelacji sejsmogramu syntetycznego z pomierzonym polem falowym zilustrowana została na przykładzie otworu Damasławek IG-1 (ryc. 5). Na tle wybranych krzywych geofizycznych jest przedstawione położenie danych litologiczno-stratygraficznych. W trakcie interpretacji korelowano spąg i strop czapy gipsowej oraz strop kredy. Duże znaczenie miały również stosunkowo liczne pokłady trzeciorzędowych węgla brunatnych. Oznaczone one zostały symbolami spWB (spąg) i stWB (strop), wraz z numerem rzymskim, oznaczającym kolejny numer pokładu węgla zidentyfikowany w danym otworze. Podkreślić należy, że identyczne nazwy niektórych pokładów z różnych otworów bynajmniej nie oznaczają, że są to te same pokłady. Wręcz przeciwnie — wyniki interpretacji danych sejsmicznych jasno pokazały, że w wielu miejscach mamy do czynienia z wyklinowaniami i lateralnym zanikiem poszczególnych pokładów węgla. Analiza pomierzonego sejsmicznego pola falowego oraz sejsmogramu syntetycznego (czyli teoretycznego pola falowego wygenerowanego wzdłuż osi otworu) pokazuje, iż można pokazać trzy poziomy o bardzo wyraźnie zwiększonych amplitudach horyzontów sejsmicznych. Pierwszy z nich to pokład węgla brunatnych WBI, zalegający na stosunkowo niedużej głębokości. Drugi poziom o wyraźnie zwiększonych amplitudach sejsmicznych to strop kredy, bezpośrednio ponad którym występuje kolejny pokład węgla (WBII). Poniżej występuje trzeci i zarazem ostatni poziom o podwyższonych amplitudach, związany ze stropem czapy gipsowej. Korzystając z opcji programu SynTool skorelowano poszczególne minima i maksima występujące w pomierzonym (profil sejsmiczny) i teoretycznym (sejsmogram syntetyczny) obrazie falowym (ryc. 5). Dzięki temu określono również wiarygodne relacje czasowo-głębokościowe dla tego otworu. Zobrazowane one są w pierwszej od lewej kolumnie jako (*Time-Depth*). Podobne operacje przeprowadzono dla innych otworów.

Po dowiązaniu danych otworowych i sejsmicznych przeprowadzono interpretację zarejestrowanych profili sejsmicznych, w zakres której wchodziły takie zagadnienia jak:

- identyfikacja i korelacja głównych horyzontów sejsmicznych,
- identyfikacja stref wyklinowań oraz znacznych redukcji miąższości poszczególnych kompleksów,
- identyfikacja i korelacja głównych uskoków,
- identyfikacja podrzędnych uskoków.

Ciągłe, wysokoamplitudowe horyzonty były związane ze stropem czapy gipsowej, stropem kredy oraz z pokładami miocenijskich węgla brunatnych. Poniżej stropu czapy nie zarejestrowano ciągłych horyzontów, również spąg czapy nie zaznaczył się w postaci wyraźniejszego horyzontu. Jedynie miejscami obserwowano pakiety horyzontów o większej ciągłości i dynamice. W trakcie interpretacji danych sejsmicznych szczególną uwagę zwrócono na identyfikację stref wyklinowań i zmian miąższości ze względu na ich częsty związek z aktywnością tektoniczną.

Dzięki bardzo wysokiej jakości i rozdzielczości danych sejsmicznych, sięgającej pojedynczych metrów, udało się



zidentyfikować wiele, czasem nawet bardzo subtelnych, cech budowy geologicznej czapy gipsowej wysadu solnego „Damaśławek“ i jej nadkładu kredowo-kenozoicznego. Wzdłuż wszystkich profili zidentyfikowano następujące granice sejsmiczne:

□ granica miocen-pliocen, występująca lokalnie (horyzont ciemnoniebieski),

□ poziom węgla brunatnych występujących w stropie tzw. górnego kompleksu mioceńskiego (horyzont czerwony),

□ węgle brunatne o lokalnym zasięgu, miejscami wyklinowujące się do horyzontu czerwonego (horyzont ciemnozielony),

□ strop dolnego kompleksu mioceńskiego, miejscami korelujący się z cienkim pokładem węgla brunatnych (horyzont fioletowy),

□ strop kredy miejscami bezpośrednio na kredzie występują węgle brunatne, co dodatkowo wpływa na podniesienie dynamiki tego horyzontu (horyzont jasnozielony),

□ strop czapy gipsowej, horyzont śledzony ponad całym wysadem (horyzont jasnoniebieski),

□ spąg czapy gipsowej, zaznaczony na całej długości profilu; jego położenie ze względu na brak jednoznacznej korelacji tego poziomu z jakimś ciągłym horyzontem jest w dużej mierze wynikiem interpretacji danych otworowych oraz geometrii nadkładu (horyzont różowy).

Profil PIG10498 (ryc. 6) ulokowany jest wzdłuż rozciągłości wysadu, na kierunku NW–SE (ryc. 3). Ilustruje on bardzo dużą zmienność budowy geologicznej stropowych części wysadu i jego nadkładu. Do kalibracji obrazu sejsmicznego posłużyły następujące otwory: Damaśławek GEO-19, IG-1, IG-5, IG-9. Analiza miąższości poszczególnych interwałów ograniczonych przez kolejne horyzonty pokazuje, iż budowa geologiczna stropu wysadu i jego nadkładu jest bardzo urozmaicona. Miąższość czapy ulega pewnym wahaniom, ale generalnie nie odbiega od wartości średniej. Zupełnie inaczej sytuacja wygląda z utworami kredy. W NW części profilu, po wejściu w obręb wysadu, osiąga ona znaczną miąższość, co związane jest z występowaniem uskoku obrzeżającego wysad. Ku centrum wysadu jej miąższość gwałtownie maleje, by w części SE na powrót uzyskać większą grubość. Podobne zmiany miąższości da się zaobserwować w obrębie części kompleksów kenozoicznych. Wyraźną zmienność wykazuje zarówno dolny (między stropem kredy a fioletowym horyzontem), jak i górny (między fioletowym a czerwonym horyzontem) kompleks mioceński. Oprócz wymienionych wyżej horyzontów sejsmicznych można na profilu PIG10498 wskazać kilka obszarów o charakterystycznym zapisie istotnym dla interpretacji sejsmostratygraficznej. W części SW profilu ponad stropem miocenu widać charakterystyczne wyklinowania poziomych horyzontów w stosunku do zdeformowanych — w postaci uniesionej położej antykliny — osadów mioceńskich. Konfiguracja taka jest dowodem na postmioceńską aktywność tektoniczną w tej części wysadu. W mocno obniżonej części NW ponad horyzontem fioletowym również można wskazać charakterystyczne wyklinowania. Sugerują one, iż po depozycji osadów ograniczonych od góry tym horyzontem miała miejsce faza aktywności uskoku ograniczającego wysad solny, co zaowocowało zrotowaniem części nadkładu i niezgodnym przykryciem jej przez utwory młodsze. Tektonika widoczna na profilu jest również dość zróżnicowana. W NW części profilu PIG10498 zidentyfikowano uskoku normalny, obrzeżający wysad (zaznaczony

kolorem czerwonym). Uskok ten deformuje tak utwory kenozoczne (choć w niewielkim tylko stopniu), jak i kredę oraz strop wysadu solnego. Ponad nim w obrębie utworów mioceńskich występuje sieć potomnych uskoków normalnych. Przechodząc dalej ku centrum wysadu stwierdzono (okolica 700PS) strefę uskokową, wykazującą typowe cechy struktury inwersyjnej. Następnym uskoku odwróconym znajduje się w okolicach 850PS. W środkowej części wysadu zidentyfikowano wiele niewielkich uskoków normalnych, bardzo słabo deformujących strop czapy i bardzo tu cienkie utwory kredy. W okolicach 1300PS znajduje się kolejny duży uskoku inwersyjny. Znaczny wzrost miąższości osadów mioceńskich w jego sąsiedztwie udowadnia jego ekstensyjny charakter w poprzednich stadiach ewolucji wysadu. Uskok ten propaguje bardzo wysoko, nieomal do samej powierzchni, w znacznym stopniu deformując strop miocenu. Jest to dowodem na bardzo młodą aktywność tektoniczną tej części wysadu. W okolicach 1550PS znajduje się (zaznaczony na fioletowo) uskoku obrzeżający wysad od SE.

Pozostałe profile sejsmiczne ulokowano poprzecznie do profilu PIG10498, tj. poprzecznie do dłuższej osi wysadu (ryc. 3). Jednym z tych profili jest profil PIG40498 (ryc. 7). Do kalibracji obrazu sejsmicznego posłużyły w tym przypadku otwory Damaśławek IG-7 i IG-8. Czapa gipsowa wzdłuż tego profilu charakteryzuje się stosunkowo stałą miąższością. Podobnie jak w przypadku poprzedniego profilu, w profilu tym obserwujemy znaczne zróżnicowanie miąższości kredy, która osiąga największe miąższości w bezpośrednim sąsiedztwie SW uskoku obrzeżającego. Ku NE miąższość kredy systematycznie spada, wzrastając dopiero poza NE uskoku obrzeżającym. Miąższość poszczególnych kompleksów mioceńskich jest raczej jednorodna, wykazując jedynie niewielkie przyrosty ponad obniżeniami stropu czapy. Udowadnia to lokalną aktywność tektoniczną w trakcie ich sedymentacji. Na profilu PIG40498 zidentyfikowano wiele deformacji tektonicznych. SW uskoku obrzeżający ma tu charakter inwersyjny. W obrębie stropowych partii miocenu towarzyszy mu charakterystyczna antykлина inwersyjna. Jej strop jest niezgodnie przykryty przez horyzontalnie zalegające niezaburzone osady (czwartorzędowe?), które datują ostatnie stadium jej wypiętrzania. Uskoki inwersyjne występują również w innych fragmentach tego profilu (np. 750PS). Również NE uskoku obrzeżający wykazuje cechy uskoku inwersyjnego. W obrębie osadów mioceńskich towarzyszy mu system uskoku, przypominający strukturę kwiatową, co sugerowałoby wystąpienie w tym obszarze ruchów przesuwczych. Strop czapy przecięty jest przez wiele uskoku normalnych o stosunkowo niewielkich zrzutach.

Po przeprowadzeniu interpretacji czasowych profili sejsmicznych dokonano, przy pomocy programu TDQ, konwersji głębokościowej wyinterpretowanych horyzontów i uskoku. Program ten tworzy trójwymiarowy model półkocki. Model stworzony dla stropowej części wysadu solnego „Damaśławek” był oparty na czternastu funkcjach czas-głębokość, odpowiadającym czternastu otworom leżącym na profilach sejsmicznych lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Pary liczb czas-głębokość odpowiadały położeniu wyinterpretowanych horyzontów na profilu sejsmicznym czasowym (czas) i głębokość tego horyzontu według danych z otworu (głębokość). Wykorzystując ten model dokonano przeliczenia głębokościowego wszystkich horyzontów sejsmicznych i uskoku.

**Dane geoelektryczne.** W ramach interpretacji jakościowej danych geoelektrycznych przetransformowano wykresy sondowań na bardziej rozdzielczy układ dyferencyjny i na ich podstawie opracowano izoomy przekroju pionowego. Interpretację ilościową sondowań przeprowadzono przy pomocy modelowania komputerowego, z użyciem specjalistycznych programów. W jej efekcie uzyskano opory i głębokości, które wykorzystano do opracowania przekrojów geoelektrycznych. Na przekroje te naniesiono następnie profile litologiczne otworów wiertniczych z najbliższego sąsiedztwa. Z interpretacji ilościowej sondowań krzyżowych, wykonanych na 16 otworach wiertniczych, uzyskano charakterystyki oporowe poszczególnych wydziałów litologicznych lub kompleksów skalnych. Izoomy przekroju pionowego obrazują budowę geologiczną. Zarysy wysadu są odwzorowane najczęściej izolinią 40 lub 50 omm. Skomplikowany przebieg izolunii wskazuje na niejednorodną budowę geologiczną, gwałtowne zaś zmiany — na istnienie nieciągłości, także wewnątrz wysadu. W płytszych partiach wyraźnie zaznacza się występowanie otworów niskooporowych.

Interpretacja ilościowa, polegająca na wyliczeniu oporów rzeczywistych śledzonych warstw lub kompleksów i skorelowaniu ich z danymi litologicznymi, wykonana wzdłuż linii sondowań geoelektrycznych, pozwoliła na uzyskanie ogólnego obrazu budowy geologicznej wysadu i jego otoczenia. Rozpozniomowano osady czwartorzędu, rozpoznano ogólnie budowę trzeciorzędu, prześledzono zmienność litologiczną osadów kredy, a także rozpoznano zmienność litologiczną i strefy nieciągłości tektonicznych w obrębie czapy wysadu.

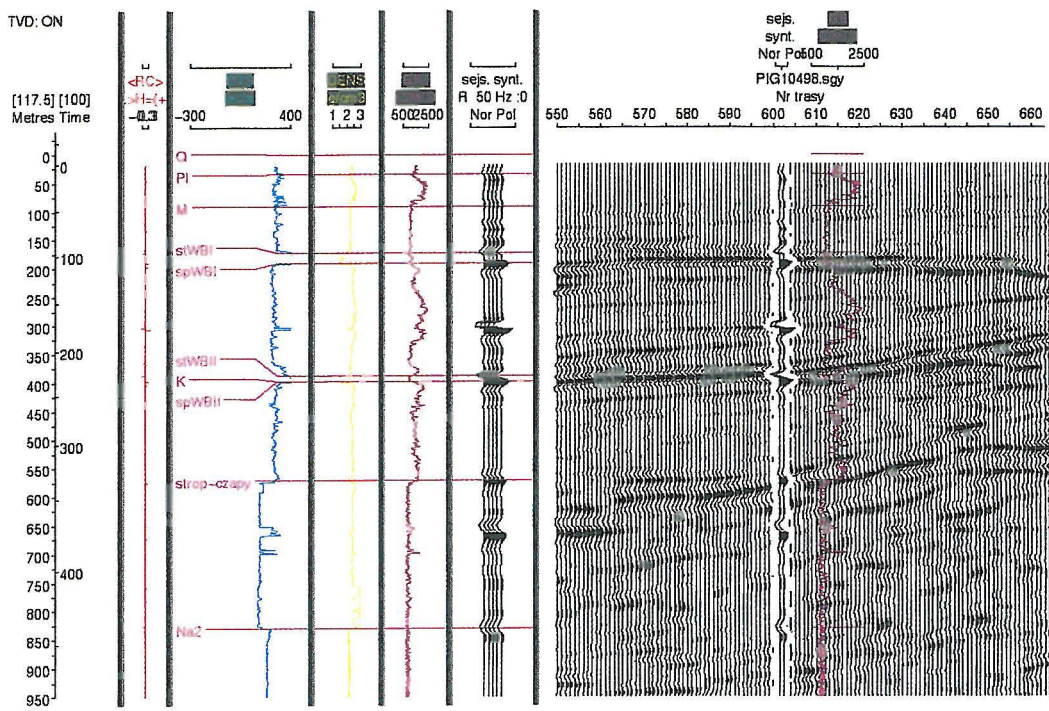
Czwartorzęd jest zbudowany z piasków, glin zwałowych i w niewielkich ilościach, iłów. Sumaryczna miąższość czwartorzędu waha się od 26 do 90 m. Trzeciorzęd, występujący na całym obszarze, da się podzielić na dwa kompleksy. Górny zbudowany jest głównie z iłów z wkładkami węgla brunatnego o maksymalnie czterometrowej miąższości. W kompleksie dolnym zwiększa się ilość piasków i piaskowców, a lokalnie pojawiają się iłowce i mułowce. W spażu, w obniżeniach, daje się śledzić przewarstwienia węgla brunatnych, co zaznacza się obniżeniem oporów rzeczywistych, zalegających tam serii osadów. Miąższość osadów trzeciorzędowych waha się w granicach 100–210 m. Kreda jest zbudowana głównie z piaskowców i margli, a niekiedy z piasków. Na obszarze wysadu osiąga ona miąższość od 0 do kilkudziesięciu metrów. Można przypuszczać, że miejscami kreda została przebita przez wysad. Istnieje też możliwość, że jej miąższość jest tak niewielka, że metoda geoelektryczna nie jest w stanie śledzić tych osadów. Na zewnątrz wysadów miąższość kredy wzrasta do kilkuset metrów. Na przekrojach geoelektrycznych widać nieciągłości, prawdopodobnie tektoniczne, w obrębie otworów kredowych. Według metody geoelektrycznej otwory czapy wysadu mają miąższość od 145 do 295 m. Śledzi się liczne nieciągłości wywołane tektoniką struktury. Z tektoniką jest związana także, w pewnym stopniu, zmienność litologiczna. Czapa jest zbudowana głównie z gipsów i anhydrytów. W jej składzie napotkać można także ility, piaskowce, wapienie oraz brekcje. Dużą zmienność litologiczną obserwuje się w strefach brzeżnych, co może potwierdzać ich tektoniczne zaangażowanie. Stosunkowo spokojny charakter budowy ma zachodnia część wysadu. Część środkowa i wschodnia jest porożcinana uskokiemi biegnącymi przez czapę i otwory kredy, a nawet wchodzącymi w trzeciorzęd. W obrębie

otworów czapy uwagę zwraca nietypowo niska wartość oporów właściwych skał. Wynika to zapewne z wysokiego zasolenia tych osadów, wywołanego obecnością soli w osadach czapy, bądź jej nasyceniem solankami.

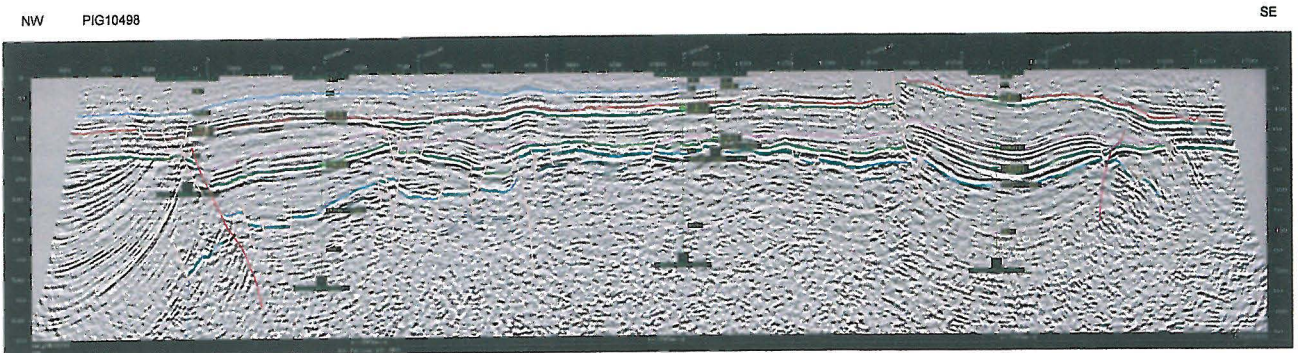
**Dane grawimetryczne.** Do interpretacji obrazu grawimetrycznego użyto mapy anomalii lokalnych o promieniu  $r = 1000$  i  $3000$  m (fig. 8). Powstały one przez odjęcie od mapy anomalii Bouguera map anomalii regionalnych przy uśrednieniu dla wyżej podanych promieni. Mapa pierwsza ilustruje efekty od stropu czapy i osadów nadległych, druga zaś od wysadu wraz z czapą i od otworów przykrywających. Analizę prowadzono w oparciu o rozkład siły ciężkości oraz informacje pochodzące z archiwalnych otworów wiertniczych. Na mapie anomalii lokalnych o promieniu  $r = 1000$  m obserwuje się dwie silne anomalie dodatnie, rozdzielone łukiem anomalii ujemnych, otoczone anomaliami ujemnymi. Na mapie anomalii lokalnych o promieniu  $r = 3000$  m anomalie te także się zaznaczają, lecz są ze sobą połączone. Według informacji z otworów wiertniczych w miejscach występowania anomalii dodatnich strop czapy zalega najpłycej, a jej miąższość jest największa. Tak dzieje się w otworach: Damasławek IG-2, Damasławek IG-5, Damasławek IG-9, Damasławek Geo-13 i Damasławek Geo-1, a także w Damasławek Geo-11, chociaż czapa w tym ostatnim nie została przewiercona. W otworach leżących w anomaliiach ujemnych, strop czapy występuje na większych głębokościach, a jej miąższość jest także mniejsza. Na obszarze anomalii dodatniej, leżącej we wschodniej części wysadu, sytuacja się nieco komplikuje. Jak wynika z analizy wierceń, granica wysadu przebiega prawdopodobnie przez środek anomalii. Można przypuszczać, że osady kredy nie różnią się w tym miejscu pod względem gęstościowym od osadów budujących czapę, na co mogą wskazywać profile otworów Damasławek Geo-3, Damasławek Geo-14 i Damasławek Geo-1. Badania geofizyki otworowej potwierdzają, że gipsy czapy i piaskowce kredowe mają bardzo podobne gęstości. Niestety otwory wiertnicze są usytuowane w taki sposób, że nie dają jednoznacznego rozwiązania tego problemu. Z analizy profili wierceń i obrazu grawimetrycznego wynika, że granice wysadu mają często charakter tektoniczny. Taką genezę granic sugerują otwory Damasławek Geo-13 i Damasławek Geo-14. Rozkład anomalii lokalnych wskazuje, że wiele uskokiów w części środkowej dzieli strukturę na fragment zachodni, mniej spękany, i wschodni, wewnętrznie potrzaskany. W części zachodniej jedynie wiercenia Damasławek IG-5, Damasławek IG-1 i Damasławek IG-2 wskazują na obecność nieciągłości tektonicznych. W dodatniej anomalii, leżącej na wschodzie, prawie we wszystkich otworach obserwuje się zaangażowanie tektoniczne.

Modelowanie grawimetryczne przeprowadzone zostało przy pomocy programu GravMag (Pedley i in., 1995). Polegało ono na skonstruowaniu wstępnego przekroju geologicznego w oparciu o wersję głębokościową zinterpretowanych profili sejsmicznych, przypisaniu poszczególnym wydzieleniom gęstości oraz obliczeniu krzywej grawimetrycznej, która powinna być taka sama lub zbliżona do krzywej grawimetrycznej odczytanej z mapy anomalii lokalnych, w tym przypadku dla promienia  $r = 3000$  m (ryc. 9). Zaznaczono w nich strefy dyslokacji tektonicznych i granice sejsmiczne utożsamiane z granicami stratygraficznymi. Na przekrojach umieszczono profile archiwalnych otworów wiertniczych, które pozwoliły

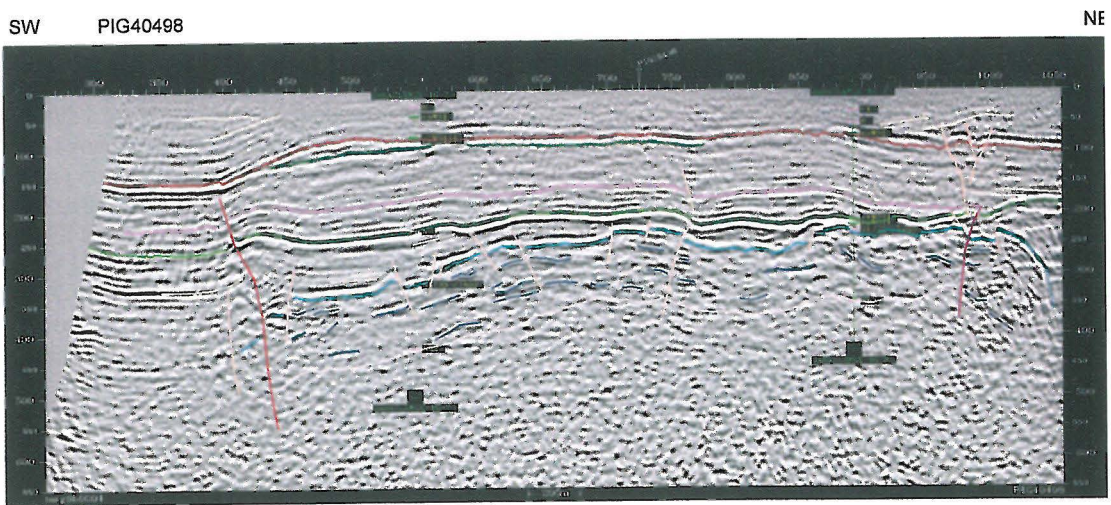




Ryc. 5. Korelacja danych otworowych i profilu sejsmicznego, otwór Damasławek IG-1. RC — rozkład współczynników odbicia, DTS — syntetyczna krzywa akustyczna, DENS — syntetyczna krzywa gęstościowa, GR — krzywa naturalnego promieniowania gamma  
 Fig. 5. Correlation of well and seismic data, well Damasławek IG-1. RC — reflection coefficients, DTS — synthetic sonic log, DENS — synthetic density log, GR — natural ray gamma log

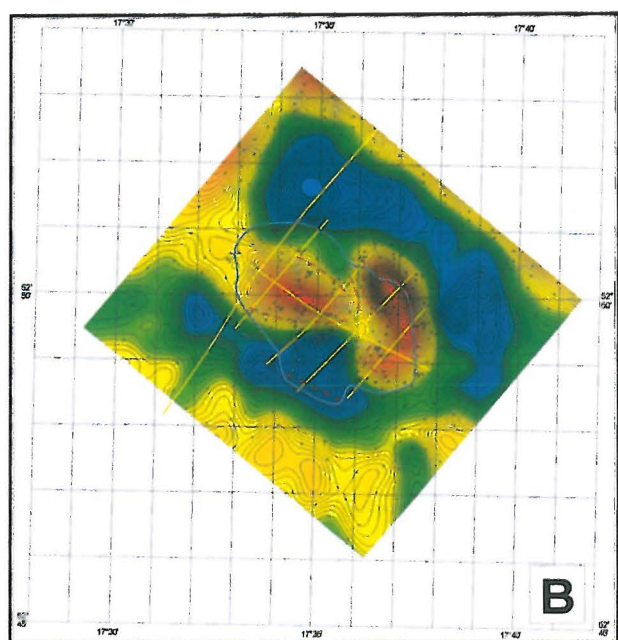
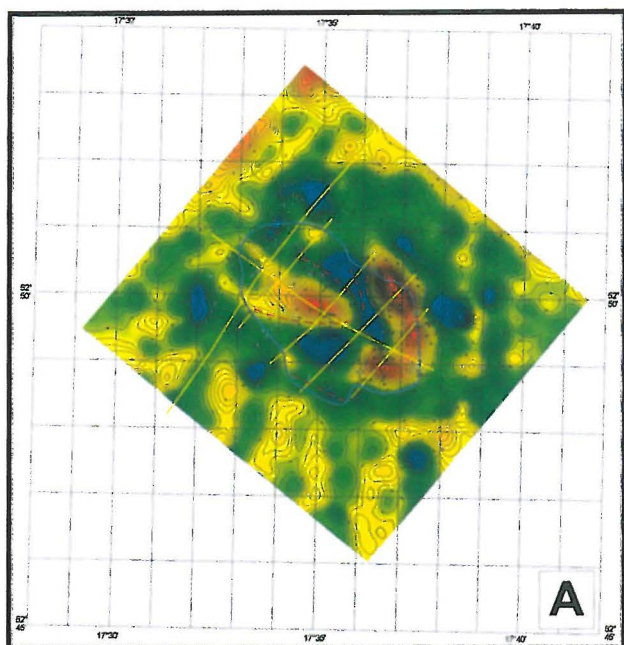


Ryc. 6. Zinterpretowany czasowy profil sejsmiczny PIG10498. Opis poszczególnych horyzontów sejsmicznych patrz tekst  
 Fig. 6. Interpreted time seismic profile PIG10498. See text for explanation of particular seismic horizons



Ryc. 7. Zinterpretowany czasowy profil sejsmiczny PIG40498. Opis poszczególnych horyzontów sejsmicznych patrz tekst  
 Fig. 7. Interpreted time seismic profile PIG40498. Interpreted time seismic profile PIG10498. See text for explanation of particular seismic horizons





- profile sejsmiczne — dyslokacje tektoniczne
- seismic profiles tectonic dislocations
- zarys wysadu wg. danych grawimetrycznych
- contour of diapir according to gravity data

Ryc. 8. Mapa grawimetryczna anomalii lokalnych dla  $R=1000$  m (A) i  $3000$  m (B)

Fig. 8. Residual gravity anomalies for  $R=1000$  m (A) and  $3000$  m (B)

wypełnić przestrzeń między granicami sejsmicznymi treścią litologiczną. Gęstości dla poszczególnych wydzieli litologicznych przyjęto z krzywych syntetycznych uzyskanych z pomiarów geofizyki otworowej, lub na podstawie wcześniejszych prac studialnych z północno-zachodniej Polski (Królikowski i in., 1988). Modelowanie potwierdziło obecność stref dyslokacji tektonicznych i głębokość zalegania horyzontów sejsmicznych. Kompleks czwartorzędowy udało się rozdzielić na strefę występowania glin zwałowych, glin piaszczystych, piasków i piasków zailonych. W trzeciorzędzie wydzielono dwa kompleksy: górny

ilasto-piaszczysty i dolny piaszczysto-ilasty. Prócz nich zidentyfikowano pokłady węgla brunatnych oraz wkładki ilowców i mułowców.

W kompleksie osadów kredowych wydzielono strefę występowania piaskowców i strefę zalegania piaskowców marglistych i margli. W obrębie utworów czapy anhydryto-gipsowej wyznaczono strefę występowania gipsów z łałami, gipsów z anhydrytami oraz anhydrytów, być może z niewielką domieszką gipsów. Sól kamienną ujęto jako jednolity kompleks o jednakowej gęstości. Słuszność podanego podziału potwierdza duża zgodność krzywych grawimetrycznych, obliczonych dla zestawionych modeli, z krzywymi pomiarowymi odczytanymi z mapy anomalii lokalnych o promieniu  $r = 3000$  m (ryc. 9). Można stwierdzić, że wyniki modelowań grawimetrycznych potwierdziły interpretację danych sejsmicznych i umożliwiły określenie zmienności litologicznej wzdłuż wydzielonych warstw sejsmicznych.

#### Geofizyczno-geologiczny model budowy czapy wysadu solnego „Damasławek” i jego nadkładu

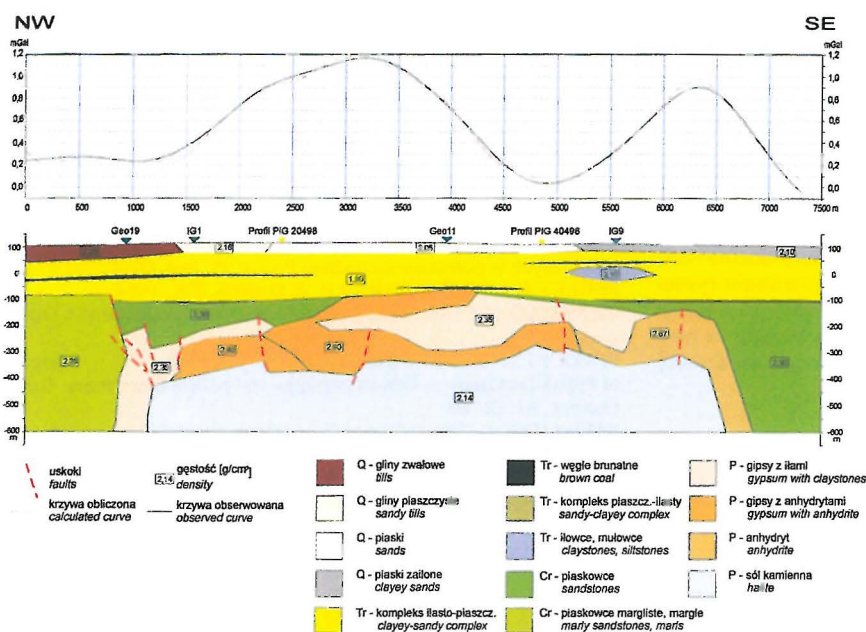
W poprzednich rozdziałach omówiono zasadnicze elementy interpretacji tektonicznej pomierzonych i archiwalnych danych geofizycznych. Poniżej przedstawiono oparty na niej model ewolucji stropu wysadu solnego „Damasławek” i jego nadkładu.

**Neogeńska i czwartorzędowa ruchliwość wysadu.** Stwierdzone w nadkładzie wysadu górne wyklinowania refleksów w obrębie kredy na oligoceńskiej powierzchni erozyjnej świadczą o wspólnych deformacjach czapy wysadu razem z pokrywą kredową. Deformacje te powstały przed sedymentacją cienkiej pokrywy piasków oligocenu, osadzonych na wyrównanej powierzchni erozyjnej.

Sedymentacja dolnego kompleksu miocenińskiego rozpoczęła się obniżaniem wysadu. W ten sposób została stworzona przestrzeń dla depozycji osadów klastycznych z węglami, których obecny zasięg tylko lokalnie wykracza poza ramy wysadu. Prawidłowością jest, że w trakcie sedymentacji dolnego kompleksu miocenińskiego znacznie mniejszej subsydencji ulegała osiowa strefa wysadu. Podczas sedymentacji górnego kompleksu miocenińskiego subsydencji podlegał obszar zarówno nad jak i poza wysadem, przy czym szybciej obniżał się obszar ponad wysadem. W trakcie sedymentacji najwyższych warstw kompleksu miocenińskiego obniżanie wysadu ustało i nastąpiło wyrównanie tempa subsydencji na całym obszarze. Sumaryczne obniżenie wysadu w miocenie względem terenów otaczających ocenia się na 70 do 110 m (bez uwzględnienia kompaktacji osadu).

Po okresie subsydencji nastąpiła inwersja ruchu wysadu solnego i pojawiła się stała tendencja do jego wynoszenia. Mimo, iż końcowemu podniesieniu uległ cały obszar ponad wysadem, to stopień inwersji i czas jej trwania dla różnych fragmentów wysadu były odmienne. Przed rozpoczęciem sedymentacji ilów pstrych, były wynoszone — w formie antyklin naduskokowych — fragmenty SW obrzeżenia wysadu. Podczas depozycji ilów pstrych wynoszone były już większe partie wysadu, co manifestuje się spadkiem miąższości tego ogniwa ponad dużymi fragmentami wysadu. W kolejnym etapie inwersji (na przełomie pliocenu i czwartorzędu), wyraźnie uaktywniła się NW oraz SW krawędź wysadu. Całkowita inwersja wysadu w stosunku do jego otoczenia wyniosła od 60 m do 90 m, osiągając maksymalną wartość 100 m (bez uwzględnienia kompaktacji). Morfologiczne wyniesienie ponad wysadem





Ryc. 9. Wynik modelowania grawimetrycznego dla sejsmicznego profilu PIG10498  
Fig. 9. Results of gravity modelling along the seismic profile PIG10498

Damasławka, widoczne na mapie hipsometrycznej powierzchni terenu, sugeruje, że może się on podnosić również współcześnie.

**Tektonika czapy wysadu i jej nadkładu.** W poszczególnych fazach ruchliwości wysadu powstawały zespoły struktur deformacyjnych. Przed neogenem powstały niższej rangi uskoki tnące strop czapy, z których większość nie została reaktywowana w trzeciorzędzie. Z etapem subsyduencji ponad wysadem są związane uskoki i fleksury, tnące całą czapę i wygasające synsedymacyjnie w sekwencji miocenijskiej. Z kolei w fazie najmłodszej i współczesnej inwersji wysadu towarzyszyło powstanie fleksur i uskoczków, tnących całą czapę i sekwencję miocenijską.

Strefy uskoczkowe, przebijające całą czapę i propagujące się w stropie soli, mogą stanowić potencjalne drogi migracji descenzyjnej wód słodkich z poziomów trzecio- i czwartorzędowych, stwarzając zagrożenie dla planowanego składowiska niebezpiecznych odpadów. Największym zagrożeniem są najmłodsze uskoki, związane z fazą inwersji, które wskutek ich współczesnej reaktywacji mogły spowodować powstanie niezasklepionych jeszcze zniszczeń kruchych w górnych partiach wysadu solnego. Podwyższoną drożność hydrauliczną mogą wykazywać również strefy największych gradientów subsyduencji i inwersji wysadu, w obrębie których ugięcia fleksuralne czapy sprzyjają jej spękaniu. Ponieważ nie powodują one prawdopodobnie spękania kruchej stropowej warstwy soli, odkształcanej w ich podłożu podatnie, stanowią mniejsze zagrożenie dla składowiska niż strefy uskoczkowe.

Zasięg ruchliwej części wysadu zaznacza się w utworach miocenijskich dyslokacją brzezną o owalnym kształcie, okalającą strefy największej subsyduencji. Uskok ten akomoduje pionowe przemieszczenia wysadu względem jego otoczenia. Mimo, iż dyslokacja brzeźna ma genezę halokinetyczną, to, jak się wydaje, kinematyka wielokrotnych reaktywacji tego uskoku zależna jest od regionalnych czynników tektonicznych. Wszystkie strefy dyslokacyjne obrzeżające wysad kontynuują się najprawdopodobniej w

głęb i kruszą czapę wysadu oraz deformują zewnętrzne ściany słupa soli.

Na obrzeżeniach śródmioceńskiego wyniesienia środkowej części wysadu występują ugięcia fleksuralne i uskoki, o sumarycznym pionowym zrzucie rzędu 80 m. Strefy te były szczególnie aktywne w fazie subsyduencji ponad wysadem, zatem związane z nimi uskoki tnące czapę wysadu powinny być już zmineralizowane.

Wyznaczono ponadto dwie główne strefy dyslokacyjne tnące wysad w poprzek. Od NW jest to dyslokacja pionowa lub odwrócona, która była akomodowana synsedymacyjnie w miocenie. Ponieważ dyslokacja ta nie została reaktywowana w fazie inwersji, zatem ewentualne kruche zniszczenia w obrębie wysadu z nią związane powinny być już zasklepione rekrytalizującą solą.

Drugą strefą tnącą wysad od strony SE jest uskok odwrócony o zrzucie ok. 60 m, związany z późną fazą inwersji wysadu, który deformuje również utwory czwartorzędowe. Dyslokacja ta rozciąga najprawdopodobniej całą czapę wysadu i wygasa w obrębie soli. Młoda aktywność tej strefy sugeruje występowanie kruchych zniszczeń nawet w obrębie soli i potencjalnych dróg infiltracji wód słodkich.

Dane sejsmiczne pokazały ponadto znaczne zmiany głębokości zalegania czapy oraz jej miąższości. W morfologii stropu czapy zaznacza się linijne podniesienie w części osiowej wysadu (tzw. „wyniesienie centralne”) oraz ciąg mniej regularnych wyniesień wzdłuż NE krawędzi wysadu. Maksyma miąższości czapy pokrywają się generalnie z obszarami lokalnych wyniesień jej stropu oraz wyniesień zwieczadła soli kamiennych (cyklotemu PZ2).

## Podsumowanie

Celem zrealizowanych prac badawczych było opracowanie wiarygodnego modelu budowy geologicznej stropowej części wysadu solnego „Damasławek” wraz z jego nadkładem. Zastosowanie nowoczesnych metod pomiarowych i zaawansowanego komputerowego przetwarzania danych, a przede wszystkim — zintegrowanej interpretacji geofizyczno-geologicznej, pozwoliło na uzyskanie wyników o wysokiej dokładności i wiarygodności. Podsumowując uzyskane wyniki można stwierdzić, że sejsmika refleksyjna, będąca od lat podstawowym narzędziem badawczym w trakcie poszukiwań naftowych, w wersji wysokorozdzielczej doskonale nadaje się do badań płytzych. Pomierzone dane pozwoliły na precyzyjne zobrazowanie tektoniki nadkładu wysadu solnego, oraz na określenie wielu szczegółów budowy wewnętrznej serii trzeciorzędowych. Zintegrowana interpretacja sejsmostratygraficzno-tektoniczna pozwoliła na opracowanie wiarygodnego modelu ewolucji badanego wysadu. Można sądzić, iż badania sejsmiczne w wersji płytkich badań wysokorozdzielczych znajdują szerokie zastosowanie w

takich dziedzinach jak np. górnictwo węgla brunatnego, kartografia geologiczna, hydrogeologia czy neotektonika.

Niniejsze opracowanie zostało wykonane na zlecenie Państwowej Agencji Atomistyki w ramach realizacji Strategicznego Programu Rządowego *Gospodarka odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym*. Autorzy składają podziękowania Pracownikom Zakładu Geofizyka-Toruń za owocną współpracę w trakcie realizacji badań sejsmicznych, często wykraczającą poza ramy zlecenia. Inż. Z. Żółtowskiemu i inż. W. Józwiakowi dziękujemy za pomoc w przygotowaniu rysunków, prof. C. Królikowskiemu za cenne uwagi dotyczące badań grawimetrycznych. Prof. K. Pietsch (AGH) dziękujemy za wnikliwą recenzję artykułu i liczne uwagi, które pomogły opracować jego ostateczny kształt.

## Literatura

DADLEZ R., IWANOW A., LESZCZYŃSKI K. & MAREK S. 1998 — Mapa tektoniczna kompleksu cechsztyńskiego– mezozoicznego. Wyd. Kartograf. Polskiej Agencji Ekologicznej.  
DADLEZ R. & MAREK S. 1974 — Ogólne rysy tektoniki kompleksu cechsztyńskiego–mezozoicznego w centralnej i północno-zachodniej Polsce. Biul. Inst. Geol., 274: 11–140.  
GARLICKI A. (red.) 1997 — Uzupełniające rozpoznanie wysadu Damasławek. Etap I. Arch. Państwowej Agencji Atomistyki.  
GARLICKI A. (red.) 1998 — Uzupełniające rozpoznanie wysadu Damasławek. Etap II. Arch. Państwowej Agencji Atomistyki.  
HAN D., NUR A. & MORGAN D. 1986 — Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. Geophysics, 51: 2093–2107.

JAGODZIŃSKA B. & KALITIUK R. 1999 — Dokumentacja badań geoelektrycznych temat: Rozpoznanie budowy wewnętrznej czapy gipsowo-anhydrytowej wysadu solnego Damasławek. CAG Państw. Inst. Geol., 971/99.  
KORNOWSKA I. 1983 — Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennnej w wysadzie solnym Damasławek, kat. rozpoznania C<sub>2</sub>, gmina Żnin, woj. bydgoskie. Przedsięb. Geol. w Warszawie, CAG Państw. Inst. Geol., 14611 CUG  
KRÓLIKOWSKI CZ., BRONOWSKA E., BUJNOWSKI W., DĄBROWSKI A., GROBELNY A., JASIŃSKI Z. & TWAROGOWSKI J. 1988 — Rozkład gęstości utworów permsko-mezozoicznych w północno-zachodniej Polsce. Pr. Inst. Geol., 74: 1–114.  
PEDLEY R. C., R. C., BUSBY J.P. & DABEK Z.K. 1994 — GRAVMAG v1.5 User Manual. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.  
PIWOCKI M. & ZIEMBIŃSKA-TWORZYDŁO M. 1997 — Neogene of Polish Lowlands — lithostratigraphy and pollen-spore zones. Geol. Quarter., 41: 21–40.  
SZEWCZYK J. 1994 — System baz danych dla głębokich otworów badawczych. Prz. Geol., 42: 662–667.  
SZEWCZYK J. 1998 — Syntetyczne profilowania gęstości oraz prędkości akustycznych w systemie GEOFLOG. [W]: Najnowsze osiągnięcia metodyczno-interpretacyjne w geofizyce wiertniczej. Mater. Konf. Nauk. AGH i PGNiG, Koninki: 335–345.  
TARKA R. 1992 — Tektonika wybranych złóż soli w Polsce na podstawie badań mezostrukturalnych. Pr. Inst. Geol., 137: 5–39.  
WASIAK J. & OKULUS H. 1961 — Opracowanie półszczegółowych badań grawimetrycznych wysadu solnego w Damasławku. CAG Państw. Inst. Geol., 3725/164 z. 21.  
ZIRNGST M. 1996 — The development of the Gorleben salt dome (NW Germany) based on quantitative analysis of peripheral sinks. [W]: Alsop G.I., Blundell D.J., Davison I. (red.), Salt Tectonics. Geol. Soc. Spec. Publ., 100: 203–226.