

NAJWAŻNIEJSZE WYNIKI BADAŃ

Otwór Brojce IG 1 jest położony w Polsce północno-zachodniej. W podpermskim planie strukturalnym znajduje się na obszarze platformy paleozoicznej, natomiast w podkenozoicznym – na obszarze antyklinorium środkowopolskiego, w północnej części segmentu pomorskiego. Najwyższa część profilu należy do piętra kenozoicznego i obejmuje jedynie czwartorzędowe osady glacialne. W otworze Brojce IG 1 nie stwierdzono występowania osadów paleogenu i neogenu basenu Niżu Polskiego. Osady nawiercone w otworze Brojce IG 1 tworzyły się w obrębie następujących basenów sedymentacyjnych:

- basenu pomorskiego (utwory dewonu);
- centralnego basenu czerwonego spągowca górnego;
- polskiego basenu cechsztyńskiego;
- mezozoicznego basenu Niżu Polskiego (udokumentowano tylko utwory triasu oraz jury dolnej i środkowej).

Celem wiercenia było zbadanie budowy geologicznej podpermskich utworów w miejscu stwierdzenia wyklinowań refleksów sejsmicznych w podłożu brachyantykliny w obrębie poziomu Z1 i Z2. W miejscu tym na brachyantyklinie utwory podcechsztyńskie występują najpłycej w obrębie całej niecki trzebiatowskiej. Wiercenie miało również na celu wyjaśnienie nagromadzenia gazu ziemnego w utworach czerwonego spągowca i karbonu w strefie pomiędzy złożami Wrzosowo i Gorzysław. Wyniki wiercenia wykazały:

- brak cech zbiornikowych poziomu dolomitu głównego i czerwonego spągowca, a także podścielających perm osadów dewonu górnego i środkowego;
- brak utworów karbonu w południowej części podłoża niecki trzebiatowskiej;
- znaczny upad utworów dewonu górnego i środkowego wynoszący ok. 51°, związany z bliską obecnością uskoku.

Utwory **dewonu**, należące do żywetu i franu, zostały stwierdzone na głęb. 3674,5–4232,5 m (wg miary geofizycznej). Profil Brojce IG 1 jest jedynym profilem z obszaru Pomorza Zachodniego, w którym osady dewonu środkowego i franu zostały zidentyfikowane stosunkowo daleko na południowy zachód od rozpoznanych do tej pory wychodni tego wieku w tym regionie. Nie do końca typowe wykształcenie litologiczne wyróżnionych jednostek litostratygraficzno-facjalnych żywetu i franu w tym profilu w stosunku do ich proksymalnych odpowiedników w północno-wschodniej i wschodniej części obszaru Pomorza Zachodniego,

wynika z bardziej dystalnej pozycji profilu Brojce IG 1 w pomorskim zbiorniku sedymentacyjnym pogranicza żywetu i franu. Litofacje stwierdzone w poszczególnych jednostkach litostratygraficznych rozpoznane w wydzielonych w otworze utworach żywetu i wczesnego franu związane są ze środowiskami: otwarto morskimi, niżepływowym szelfem węglanowo-marglistym (osady formacji wapieni z Sianowa i formacji wapieni z Koczały) i niżepływowym szelfem klastyczno-węglanowym (osady formacji piaskowców kwarcowych z Wyszecborza), a nawet basenem szelfowym w środkowym franie (utwory ogniwa iłowców ze Strzeżewa, należące do formacji z Człuchowa). Badania petrograficzne wykonane na płytkach cienkich (60 sztuk) wykazały obecność iłowców, miejscami mułowców, a także wapieni i margli, sporadycznie piaskowców.

Skały **czerwonego spągowca** przewiercono w interwale głęb. 3609,5–3674,5 m wg miary geofizycznej (wg rdzenia strop czerwonego spągowca nawiercono na głęb. 3608,4 m). Ich profil jest dwudzielny. Część dolną (37,5 m) tworzą wulkanity (głównie przeobrażone tufity i skały wylewne) należące do wielkopolskiej formacji wulkanogenicznej (grupa Odry), natomiast górną (27,5 m) – osady klastyczne (piaskowce i zlepieńce, a podrzędnie mułowce i iłowce) zaliczane do formacji Noteci. Profil wulkanitów zaczyna się od skał piroklastycznych – tufów dacytowych, które w kierunku stropu formacji wielkopolskiej przechodzą w tufy ryolitowe, tufolawy, a w samej górze w skały wylewne o składzie ryolitu. Sedymentologiczna analiza górnej części profilu pokazała, że sukcesję osadową rozpoczynają osady gruboklastyczne (zlepieńce) deponowane w warunkach zalewów warstwowych. Wśród zlepieńców występują przewarstwienia piaskowców i mułowców, w których stwierdzono bioturbacje, poziomy cementacji związanej z inicjalnymi paleoglebami oraz śladami flory. Ku stropowi profilu wzrasta udział piaskowców oraz przewarstwień laminacji mułowcowej, a zlepieńce stają się bardziej drobnoklastyczne. W stropie sekwencji osadowej dominują piaskowce różnoziarniste z przewarstwieniami laminowanych mułowców, reprezentujące sekwencje zalewów warstwowych (*sheetflood*), oraz powodzi (*flashflood*) z okresami stagnacji wody w płytkich okresowych zbiornikach.

Badania petrograficzne utworów klastycznych czerwonego spągowca (26 próbek skał klastycznych, łącznie 45 płytek cienkich) wykazały dominację zlepieńców oraz iłowców i podrzędny udział iłowców i mułowców. Analo-

giczne badania utworów wulkanicznych (15 płytek cienkich) wykazały obecność dwóch rodzajów skał. Pierwsze to silnie zsylikowane wylewne ryolity przechodzące ku spągowi w spieczone tufy (głęb. 3637,3–3642,0 m), a drugie to tufy ryolitowe i ich eluwium (głęb. 3666,0–3671,0 m).

Osady **cechsztynu** w otworze Brojce IG 1 nawiercono na głęb. 2853,0–3609,5 m (wg miary geofizycznej). Obejmuje trzy cyklotemy węglanowo-ewaporatowe: PZ1, PZ2, PZ3 oraz cyklotem terygeniczo-ewaporatowy PZ4, w którym można wydzielić trzy subcyklotemy PZ4a–PZ4c. W trakcie depozycji węglanowej, rozpoczynającej trzy pierwsze cykle, utworzyły się odpowiednio trzy poziomy utworów węglanowych: wapień cechsztyński Ca1, dolomit główny Ca2 i dolomit płytowy Ca3; wszystkie trzy zostały nawiercone również w otworze Brojce IG 1. Osady węglanowe są rozdzielone znacznie bardziej mięszymi utworami ewaporatowymi wykształconymi głównie w facjach siarczanowych (anhydryt) i chlorkowych (sól kamienna – halit) z niewielkim udziałem soli potasowych. Prawie połowa sumarycznej miąższości cechsztynu w omawianym otworze przypada na osady pierwszego cyklotemu (366 m). W rozpatrywanym profilu brakuje fragmentu cyklotemu PZ2, a dokładniej anhydrytu podstawowego A2, co spowodowane jest nieciągłością tektoniczną. Skutkiem tego jest bezpośredni kontakt utworów dolomitu głównego (Ca2) spoczywających pod osadami najstarszej soli kamiennej (Na2).

Osady wapienia cechsztyńskiego (Ca1), o miąższości ok. 8 m, są dość nietypowo wykształcone, gdyż spągowa mikrytowa część profilu ma bardzo małą miąższość (tylko 10 cm). Pozostałą część sekwencji Ca1 tworzy kompleks zróżnicowanych wapieni ziarnistych. Badania mikrofacjalne tych utworów wskazują na dominację onkoidowych packstonów i rzadką obecność greinstonów. Zawierają one nieliczne skamieniałości, głównie bentoniczne otwornice (w tym płożące), małżoraczki, ramienionogi, ślimaki. W stropie Ca1 stwierdzono utwory mikrobialne (stromatolity i biolaminy). Zjawiska diagenetyczne zaobserwowane w omawianych utworach obejmują: cementację w nielicznych greinstonach oraz wtórnych porach (cementy blokowe), nieliczne cementy anhydrytowe i anhydryt zastępujący węglany.

Wykonane w otworze Brojce IG 1 pierwsze badania **cechszyńskiej serii miedzionośnej** (pierwotnie w dokumentacji wynikowej otworu mineralizacja kruszcowa nie została opisana), która poza łupkiem miedzionośnym o miąższości ok. 60 cm, obejmuje w jego spągu najwyższą część czerwonego spągowca, a w stropie – dolną część wapienia cechsztyńskiego, wykazały obecność ubogiej mineralizacji kruszcowej. Stwierdzono przewagę mineralizacji pirytowej nad sfalerytową i galenową (Py>Sph>Gn). Regionalna analiza rozprzestrzenienia mineralizacji kruszcowej na całym obszarze występowania cechsztynu w Polsce pozwoliła na usytuowanie rejonu otworu wiertniczego Brojce IG 1 w obrębie strefy metalicznej o dominacji żelaza, w której przeważa mineralizacja pirytowa nad sfalerytową i ołowiwą, z podrzędnym udziałem mineralizacji miedziowej. Uzyskane wyniki stanowią potwierdzenie wcześniejszych ocen uznających strefę pomorską za negatywną dla poszu-

kiwań cechsztyńskich rud metali o znaczeniu ekonomicznym, zarówno ze względu na niskie koncentracje minerałów kruszcowych, jak i znaczną głębokość zalegania spągu utworów cechsztyńskiej serii miedzionośnej, miejscami przekraczającą 4000 m.

Utwory **triasu** w otworze Brojce IG 1 występują w interwale głęb. 1156,5–2853,5 m (wg miary geofizycznej) i należą do triasu górnego, środkowego i dolnego, a litostratygraficznie do pstrego piaskowca (formacje: bałtycka, pomorska, półczyńska, barwicka), wapienia muszlowego i kajpru. Wykształcone są one w różnych facjach terygeniczych (które dominują), węglanowych i podrzędnie ewaporatowych. W podziale litostratygraficznym triasu zrezygnowano ze stosowania retyku niższego i wyższego, włączając je odpowiednio do kajpru środkowego i górnego, rozszerzając tym samym zasięg kajpru po strop triasu. Sukcesję kajpru górnego zaliczono do warstw wielichowskich. Zrezygnowano z wydzielenia warstw drawnieńskich, włączając je do warstw jarkowskich. Pierwotnie warstwy zbąszyneckie, jarkowskie i drawnieńskie były rozdzielone, jednak w związku z wprowadzoną aktualizacją, nierozdzielone pozostają jedynie warstwy zbąszyneckie i jarkowskie. Ponadto wprowadzono wydzielenie kajpru dolnego jako nadrzędnej jednostki dla warstw sulechowskich, których strop uznano za najlepsze przybliżenie chronostratygraficznej granicy triasu górnego i środkowego. Strop triasu dolnego skorelowano z najlepiej przybliżającym go stropem pstrego piaskowca. W obrębie trzech formacji pstrego piaskowca górnego i środkowego wydzielono dodatkowo mniejsze jednostki w randze ogniwi, bardzo dobrze czytelne w zapisie geofizyki otworowej jak i w nielicznych, pobranych z nich rdzeniach.

Osady **jury** w otworze Brojce IG 1 znajdują się na głęb. 88,5–1156,0 m (wg miary geofizycznej) i obejmują jurę dolną i środkową. Utwory najwyższej jury środkowej oraz jury górnej, a także kredy zostały erozyjnie usunięte podczas inwersji bruzdy śródpolskiej na przełomie kredy i paleogenu. Profil jury dolnej, zarówno chrono- jak i litostratygraficzny, został zrewidowany w stosunku do dokumentacji wynikowej otworu. Osady jury dolnej są wykształcone głównie jako piaskowce, a podrzędnie iłowce i mułowce, powstałe w środowiskach lądowych (rzecznych), deltowych, barierowo-lagunowych i płytkomorskich. W ich obrębie można wyróżnić kilka formacji: zagajską, skłobską, ostrowiecką, łobeską, komorowską, ciechocińską i borucicką. Osady jury górnej są rozwinięte głównie w facjach iłowcowo-mułowcowych z wkładkami piaskowców, zawierające często morską faunę i powstałe głównie w środowiskach morskich. W porównaniu z dokumentacją wynikową przesunięto granicę jury z czwartorzędem ku dołowi z głęb. 31,5 m na 88,5 m. Podstawą była analiza wykształcenia litologicznego najwyższego odcinka profilu oraz porównanie z pobliskimi płytkimi otworami kartograficznymi, a także informacji o licznych występowaniu w próbkach na głęb. 65,0–70,0 m słodkowodnego glonu *Botryococcus*, co sprzeczne jest z morską genezą utworów keloweju.

Najwyższa część profilu nawiercona w otworze Brojce IG 1 to **czwartorzędowe osady glacialne** o miąższości 88,5 m (głęb. 0,0–88,5 m). Jak zaznaczono wyżej, po wykonaniu

rewizji, postanowiono włączyć do osadów czwartorzędowych zalegające na głęb. 31,0–88,5 m, piaski różnoziarniste ze żwirem jasnoszarym, z detrytusem roślinnym, zaliczane wcześniej do jury. Profil czwartorzędu w omawianym otworze obejmuje w dolnej części piaski ze żwirem związane prawdopodobnie ze zlodowaczeniem środkowopolskim. Wyżej występują natomiast mułki i piaski zastoiskowe, przykryte przez gliny zwałowe, których geneza związana jest ze zlodowaczeniem północnopolskim (Wisły).

Badania **paleontologiczne** w otworze Brojce IG 1 prowadzono w bardzo ograniczonym zakresie. Dotyczyły one fauny koralowcowej z dewonu, gdzie stwierdzono występowanie fragmentów koralowców z grupy Tabulata i Rugosa. Przeprowadzono także badania palinologiczne (megaspory) 22 próbek z utworów jury, z których tylko 4 zawierały megaspory należące do trzech zespołów wskazujące na syne-mur/pliensbach i toark. Badania mikropaleontologiczne 3 próbek wykazały zupełny brak mikrofauny.

Badania **materii organicznej** przeprowadzono w utworach jury, permu i dewonu. Materiał organiczny w badanych skałach jest wyjątkowo skąpy. Skały dewonu ze względu na stosunkowo wysoki stopień dojrzałości cechują się obecnością wityrynytu z dodatkiem inertynitu. W skałach jury zostały wyróżnione fragmenty węgla brunatnego reprezentowanego głównie przez huminit. Stopień dojrzałości termicznej określony na podstawie wyników pomiarów refleksyjności materii organicznej jest zróżnicowany. Skały dewonu (4236,26–3726,50 m) cechują się wartościami refleksyjności wityrynytu w przedziale 1,22–1,86%, przy czym najniższe wartości (1,22 i 1,25%) uzyskano tylko dla dwóch próbek, natomiast w pozostałych 24 badanych próbkach VRo wynosi od 1,31% do 1,86%. Pomierzone wartości refleksyjności wityrynytu wskazują na stopień dojrzałości generalnie odpowiadający stadium gazowemu. Wyniki pomiarów refleksyjności huminitu w osadach jury są zawarte w przedziale 0,25–0,65% i wskazują na stadium niedojrzałe. Analiza Rock-Eval 10 próbek, z 13 zbadanych próbek cechsztyńskich (11) i dewońskich (2), wykazała, że zawartość całkowitego węgla organicznego (TOC) jest bardzo mała i wynosi między 0,06% a 0,27%. Podwyższone wartości stwierdzono tylko w trzech próbkach cechsztyńskich 1,10%, 0,77% i 0,72%. Większość próbek cechsztyńskich znajduje się w obrębie tzw. okna ropnego, jednak biorąc pod uwagę zawartość TOC oraz wartości S1 i S2 należy stwierdzić, że nie posiadają one potencjału do generacji węglowodorów.

Badania **bituminów i węglowodorów** z otworu Brojce IG 1 wykonano na próbkach rdzeniowych reprezentujących jednostki stratygraficzne od dewonu do jury dolnej. W interwale jurajskim (3 próbki) stwierdzono ogólnie niską zawartość materii organicznej (do 0,2%), z wyjątkiem jednej próbki czarnego piaskowca (z głęb. 409,0 m), w której odnotowano wartość 1,8% C-org i podwyższoną zawartość bituminów. Ze względu na niską dojrzałość termiczną (0,2–0,3% Ro) cechy te interpretowane są jako efekt migracji węglowodorów. W triasie (11 próbek) zawartość C-org mieści się w zakresie 0,1–0,2%, a bituminów 0,003–0,013%. Zidentyfikowano dominację węglowodorów nasyconych

w próbkach płytszych oraz aromatycznych w głębszych. Skały te nie wykazują potencjału generacyjnego dla węglowodorów. W interwale cechsztyńskim (12 próbek) odnotowano lokalne wzbogacenie materii organicznej i bituminów (np. 1,4% C-org i 0,247% bituminów w próbce z głęb. 3247,0 m), co może wskazywać na obecność skały macierzystej. Dojrzałość termiczna odpowiada górnemu oknu ropnemu. W czerwonym spągowcu (2 próbki) zawartość C-org i bituminów nie przekracza 0,1%, co świadczy o znikomym potencjale generacyjnym i migracyjnym. Dewon (17 próbek) cechuje się niską zawartością materii organicznej (średnio 0,2%) oraz bituminów. Mimo osiągnięcia dojrzałości mieszczącego się w przedziale okna gazu mokrego, warunki generacji i migracji węglowodorów w dewonie były niekorzystne.

Na podstawie jednowymiarowego modelu numerycznego odtworzono **historię pogrzebania** pokrywy osadowej wraz z podłożem krystalicznym w otworze Brojce IG 1. Model uwzględnił główne fazy subsydencji, wypiętrzania oraz zmienność warunków cieplnych na tle historii geologicznej regionu. Do kalibracji modelu wykorzystano dane współczesnych temperatur oraz pomiary refleksyjności wityrynytu. Przyjęto wartości strumienia ciepłego rzędu 45–55 mW/m², a parametry przewodnictwa ciepłego skał określono na podstawie zależności litologicznych. W profilu rozpoznano dwie duże luki stratygraficzne: famen–gżel (z erozją 1200–2500 m) oraz oksford–pliocen (z erozją 1300–1800 m). Historia pogrzebania obejmuje okres od dewonu środkowego (żywet) do czwartorzędu i składa się z sześciu faz: trzech szybkich i dwóch wolniejszych faz pogrzebania oraz dwóch faz wypiętrzania – jednej intensywnej i jednej łagodnej. Maksymalne pogrzebanie spągów jednostek dewonu, permu i triasu dolnego osiągnęło odpowiednio głęb. 4700, 4100 i 3300 m, przy temperaturach sięgających 180°C. W rezultacie, jednostki te osiągnęły dojrzałość termiczną dla generacji węglowodorów. Od najwyższego keloweju do pliocenu trwały łagodne ruchy tektoniczne, które doprowadziły do powstania drugiej dużej luki erozyjnej.

Analiza pomiarów **geofizyki wiertniczej** wykazała brak właściwości kolektorskich w utworach czerwonego spągowca i dolomitu głównego. Natomiast dobre właściwości kolektorskie zaobserwowano w utworach klastycznych jury dolnej. Wyniki te zostały potwierdzone przez opróbowanie wyżej wymienionych horyzontów (zob. niżej) – w otworze nie stwierdzono utworów nasyconych węglowodorami.

Analiza **krzywych średnich prędkości** umożliwiła zlokalizowanie głównych zmian wartości związanych ze zmiennością litologiczną w obrębie wydzieleni stratygraficznych od czwartorzędu do środkowego dewonu. Najwyższy kontrast prędkościowy odnotowano na głęb. 3260,0 m i jest on związany z granicą pomiędzy starszą solą kamienną (Na2) a dolomitem głównym (Ca2) i anhydrytem górnym (Alg). Mniej wyraźne, ale nadal istotne kontrasty prędkościowe, odnotowano także na granicach pomiędzy hettangiem (jura dolna) a kajprem (trias górny), pomiędzy wapieniem muszlowym (trias środkowy) i pstrym piaskowcem (trias dolny) oraz pomiędzy triasem (dolny pstry piaskowiec) i permem (najwyższy cyklotem cechsztyny). Zi-

dentyfikowane granice kompleksów pozwoliły na dowiązanie najwyraźniejszych odbić refleksyjnych na profilach sejsmicznych do odpowiednich jednostek litostratygraficznych.

Interpretacja **profilu sejsmicznego 2D** T0870580, zlokalizowanego w rejonie otworu Brojce IG 1, objęła wykonanie korelacji horyzontów sejsmicznych, związanych ze stropami utworów: górnej, środkowej i dolnej jury; górnego, środkowego i dolnego triasu; górnego i dolnego permu; górnego i dolnego karbonu; górnego i środkowego dewonu oraz identyfikację uskoków. Przed rozpoczęciem interpretacji granic refleksyjnych dane sejsmiczne zostały dowiązane do otworu Brojce IG 1. Analizując budowę geologiczną rejonu zauważono, iż wzdłuż profilu T0870580 występują utwory kredy, górnej jury oraz górnego i dolnego karbonu, których obecności nie stwierdzono w tym otworze. Horyzonty związane z tymi utworami (spąg kredy/strop górnej jury, strop górnego i dolnego karbonu) zidentyfikowano i zinterpretowano na fragmencie profilu T0070582, po uprzednim dowiązaniu go do otworu Sadlno 1, a następnie korelowano je na przekroju T0870580. Na interpretowanym profilu zidentyfikowano liczne uskoki w utworach permu i starszych. Interpretacja danych sejsmicznych 2D pozwoliła na zobrazowanie budowy geologicznej rejonu otworu Brojce IG 1.

Badania **magnetostratygraficzne** wykonane w osadach formacji rewalskiej cechsztynu i formacji bałtyckiej dolnego pstrego piaskowca pozwoliły na wyróżnienie trzech ma-

gnetozon. Dzięki temu możliwa była ich korelacja chronostratygraficzna z analogicznymi utworami z innych miejsc Niżu Polskiego, jak również dowiązanie ich do światowej skali zmian polarności magnetycznej. Dowiązanie to wskazuje, że badana część profilu otworu Brojce IG 1 powstawała w okresie późny czangsing – wczesny olenek. Średnie tempo sedimentacji badanych utworów wynosiło 2,4 cm na 100 lat.

W wyniku **opróbowania** nie stwierdzono występowania węglowodorów w utworach permu, zarówno w poziomie dolomitu głównego, jak i czerwonego spągowca. Utwory te, podobnie jak spoczywające poniżej utwory dewonu górnego i środkowego, nie wykazują właściwości zbiornikowych – są nieprzepuszczalne. Utwory mezozoiku odznaczają się natomiast dobrymi właściwościami zbiornikowymi, zwłaszcza w przypadku dolnej jury, z których uzyskano średni przyptyw solanek 23,6 m³/h. Wszystkie opróbowane poziomy mezozoiku charakteryzują się dobrą przepuszczalnością, a w przypadku utworów górnego pstrego piaskowca (retu) i jury dolnej – wysoką. W żadnym z badanych interwałów nie stwierdzono jednak wyraźnych objawów bitumicznosci. W profilu hydrochemicznym stwierdzono wyraźny wzrost mineralizacji wraz z głębokością oraz ogólny wzrost stężenia chlorków kosztem siarczanów i wodorowęglanów. Niska mineralizacja wód w poziomie dolnej jury wskazuje, iż poziom ten znajduje się w strefie intensywnej wymiany.