

Zastosowanie profilowań geofizycznych w rekonstrukcji warunków pograżenia oraz historii termicznej obszaru – otwór Piła 1/IG 1

Marcin Łojek¹



Application of well logging in the reconstruction of burial conditions and thermal history of the area – the Piła 1/IG 1 borehole. Prz. Geol., 74: 641–646; doi: 10.7306/2026.55

Redaktor prowadzący: Andrzej Gluszyński

Abstract. Reconstruction of burial and thermal histories is a fundamental component of petroleum system analysis, geothermal potential assessment, and tectonic development interpretation. Well logging data enable the quantitative determination of petrophysical parameters necessary for the construction and verification of geological models. This study demonstrates the application of well log interpretation in reconstructing the burial and thermal evolution of the Piła 1/IG 1 borehole. Standard wireline logs, after calibration, were used to determine key petrophysical parameters, including mineral composition, shale volume, porosity, permeability, and total organic carbon (TOC). These parameters served as input for one-dimensional basin modelling performed using PetroMod™ software. Model calibration was carried out by comparing simulated porosity and temperature profiles with measured borehole data. The calibrated model enabled the reconstruction of the burial history, subsidence evolution, thermal maturity, and hydrocarbon generation history.

Keywords: well logging, burial history, thermal history, petroleum systems

Niezbędnym narzędziem umożliwiającym rozciągnięcie punktowych danych na cały profil otworu jest geofizyka otworowa. Pozwala ona określić reprezentatywne właściwości skał w poszczególnych wydzieleniach litologicznych. Profilowania geofizyczne umożliwiają ilościowe wyznaczenie parametrów petrofizycznych niezbędnych do budowy i weryfikacji modeli geologicznych, takich jak skład mineralny, zailenie, porowatość, przepuszczalność, zawartość materii organicznej (TOC) oraz właściwości termiczne skał. Parametry te stanowią zarówno dane wejściowe, jak i dane kalibracyjne modeli odtwarzających historię pograżania, kompaktacji oraz ewolucji termicznej osadów. Celem przedstawionej pracy jest zaprezentowanie zastosowania danych geofizycznych do rekonstrukcji historii geologicznej otworu Piła 1/IG 1.

DANE I METODYKA

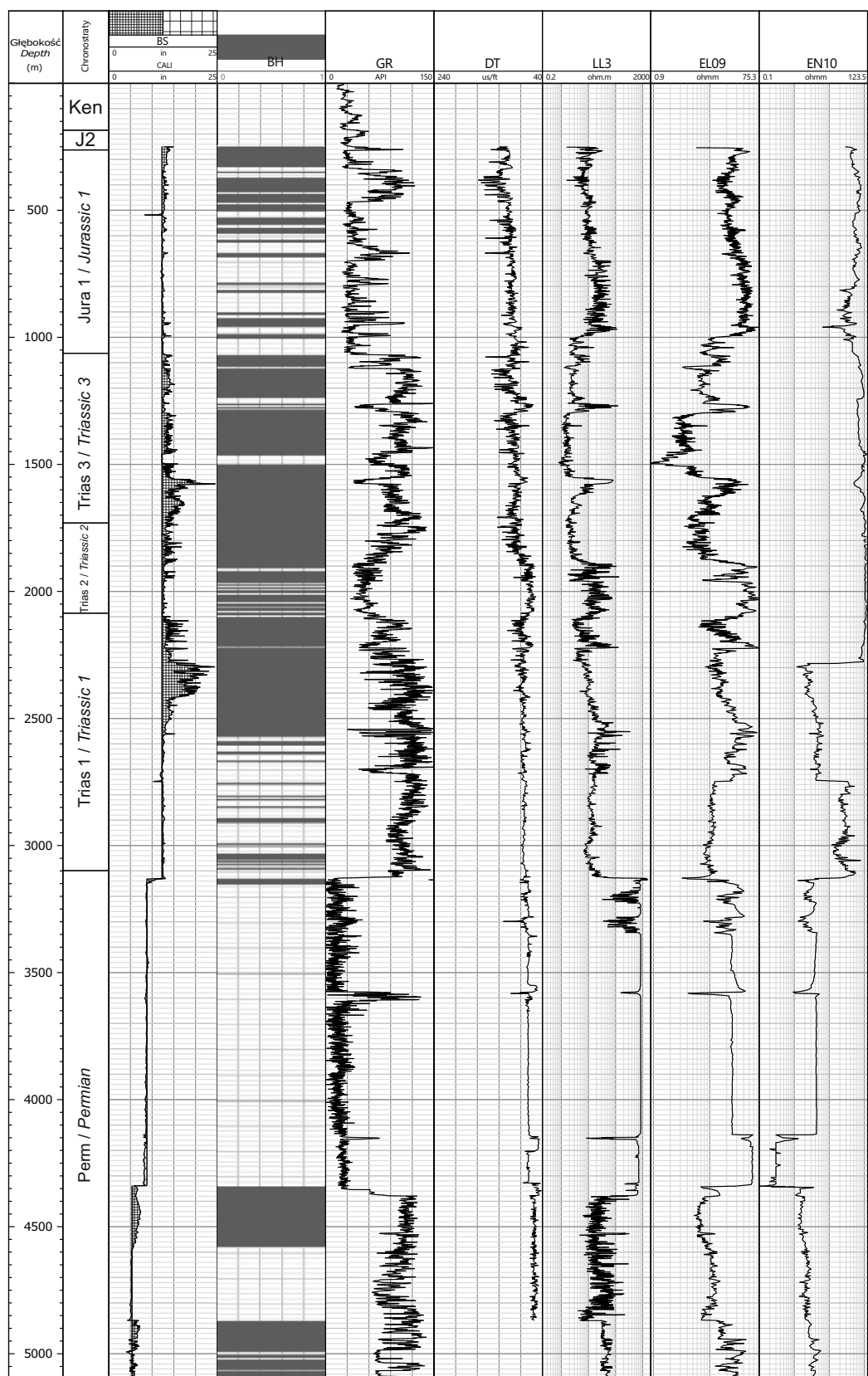
Model historii pograżania wykonano przy użyciu programu PetroMod™ firmy Schlumberger z zastosowaniem metody *forward modeling*. Punktem wyjścia były dane geologiczne i geofizyczne uzyskane z otworu Piła 1/IG 1 (Żelichowski, 1985). Dane karotażowe wykonano sondami produkcji radzieckiej w postaci siedmiu odcinków pomiarowych (Grabowski i in., 2023). Wymagały one ponownego połączenia oraz kalibracji ze względu na wykonanie pomiarów w niestandardowych jednostkach (cpm

– impulsy na minutę). Prace przeprowadzono w środowisku programu Techlog firmy Schlumberger zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Jarzynę i in. (1999) oraz Kiełta (2009). Wyznaczono również odcinki, w których pomiary mogły być niemiernodajne z powodu złego stanu ścian otworu podczas wykonywania pomiarów (*Bad Hole* – BH; ryc. 1). Kalibracja krzywych oraz wyznaczenie odcinków BH umożliwiły ich dalszą analizę ilościową i obliczenie pozostałych niezbędnych parametrów.

Podstawę modelu geologicznego stanowiły dane litologiczne, których weryfikację przeprowadzono na podstawie interpretacji profilowań geofizycznych, m.in. z wykorzystaniem wykresów *cross-plot* oraz obliczeń zailenia (ryc. 2). Wykresy *cross-plot* umożliwiają rozróżnienie piaskowców, wapieni i dolomitów, a w połączeniu z analizą zailenia pozwalają wyznaczyć dominujące litofacje w badanym obszarze.

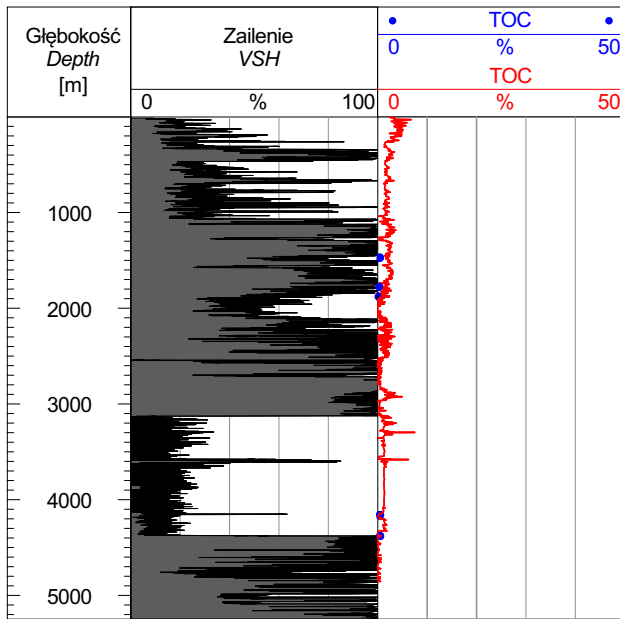
Na podstawie skalibrowanych krzywych obliczono parametry petrofizyczne wykorzystywane jako dane wejściowe modelu. Do obliczenia zailenia wykorzystano profilowanie gamma zgodnie z klasyczną formułą opartą na wartościach granicznych promieniowania gamma dla skał o 0 i 100% zailenia (Rider, 2002). Ustalenie zawartości minerałów ilastych jest kluczowe, ponieważ minerały te, w przeciwieństwie do skał osadowych chemicznych i kwarcowych, ulegają znacznie większej kompaktacji. Przy dużych miąższościach może to istotnie wpływać na rzeczywiste pograżenie skał w przeszłości.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa; mloj@pgi.gov.pl; ORCID ID: 0009-0002-3520-2465



Ryc. 1. Zestawienie krzywych połączonych i znormalizowanych profili geofizycznych w otworze Piła 1/IG 1 wraz z wyliczonymi strefami złego stanu otworu (BH): CALI – profilowanie średnicy; BS – średnica świdra; GR – unormowane profilowanie gamma; DT – profilowanie akustyczne czasu interwałowego; LL3 – sterowane profilowanie oporności; EN10 – potencjałowe profilowanie oporności; EL09 – profilowanie gradientowe oporności; Ken – kenozoik; J2 – jura środkowa; Jura 1 – jura dolna; Trias 3 – trias górny; Trias 2 – trias środkowy; Trias 1 – trias dolny

Fig. 1. Presentation of merged and normalized geophysical well logs available for Piła 1/IG 1 borehole, including calculated borehole washout zones (BH): CALI – caliper; GR – gamma ray log; BS – bit size; LL3 – laterolog; DT – compressional sonic log (interval transit time log); EN10 – normal conventional electrical log; EL09 – lateral conventional electrical log; Ken – Cenozoic; J2 – Middle Jurassic; Jurassic 1 – Lower Jurassic; Triassic 3 – Upper Triassic; Triassic 2 – Middle Triassic; Triassic 1 – Lower Triassic



Ryc. 2. Wyniki interpretacji zailenia i zawartości węgla organicznego (TOC) na podstawie krzywych geofizycznych w otworze Piła 1/IG 1 (Łojek, 2023). Niebieskie kropki – zawartość TOC pomierzona laboratoryjnie, czerwona krzywa – zawartość TOC wyliczona z profilowań geofizycznych

Fig. 2. The results of log interpretation for shaliness (VSH) and total organic carbon (TOC) in the Piła 1/IG 1 borehole (Łojek, 2023). Blue dots – TOC volume measured in the lab, red curve – TOC content calculated from well logs

Zawartość TOC obliczono metodą Passeya i in. (1990). Parametr ten jest niezbędny do prawidłowej oceny potencjału generacyjnego analizowanego obszaru. Porowatość całkowitą obliczono na podstawie profilowania akustycznego (DT), natomiast porowatość efektywną wyznaczono z uwzględnieniem obliczonego wcześniej zailenia zgodnie z równaniem Wylliego i in. (1956), z późniejszymi modyfikacjami (Rider, 2002). Dane te odegrały kluczową rolę podczas rekonstrukcji historii pograżania oraz oszacowania wielkości późniejszej erozji.

Przepuszczalność określono na podstawie relacji porowatości całkowitej i efektywnej z wykorzystaniem formuły Coatesa (Ahmed i in., 1991). Wyniki zweryfikowano danymi laboratoryjnymi rdzeni.

Kalibracja modelu polegała na porównywaniu wyników z pomiarami rzeczywistymi i iteracyjnej korekcie parametrów do uzyskania zgodności.

Istotnym elementem rekonstrukcji było odtworzenie zmian paleobatymetrii. Model opracowano na podstawie danych sedimentologicznych, paleontologicznych oraz regionalnych rekonstrukcji środowisk sedimentacyjnych (Marek, 1988; Matyja, Wierzbowski, 1996; Leszczyński, 1997a, b; Marek, Pajchłowa, 1997; Dadlez i in., 1998; Karnkowski, 1999; Uffmann i in., 2012; Leonowicz, 2015; Machalski, Malchuk, 2019). Uwzględniono także zmiany globalnego poziomu mórz wynikające z krzywych eustatycznych (Haq i in., 1988; Hallam, 1992; Harrison, 2002).

Drugim kluczowym parametrem był paleostrumień ciepły. Współczesny strumień ciepły stanowił punkt wyjścia do rekonstrukcji jego zmian w czasie (Górecki i in., 2006; Szewczyk, Gientka, 2009; Botor i in., 2013). Model

uwzględniał rozwój asymetrycznego basenu ryftowego oraz późniejsze procesy chłodzenia litosfery zgodnie z modelem przedstawionym przez Karnkowskiego (1999).

WYNIKI

Znaczenie profilowań geofizycznych jako źródła danych wejściowych

Stan ścian otworu wskazuje na obniżoną wiarygodność danych, szczególnie w utworach triasu górnego i środkowego oraz w górnej części triasu środkowego (ryc. 1). Pogorszony stan ścian otworu występuje również w utworach czerwonego spągowca. Najlepszy stan ich zachowania stwierdzono w utworach cechsztynu oraz dolnych partiach jury dolnej i triasu dolnego (ryc. 1). W tych odcinkach krzywe geofizyczne najlepiej odzwierciedlają rzeczywiste właściwości skał. W strefach wymię wartości pomiarów mogą być natomiast istotnie zniekształcone przez wpływ płynów znajdujących się w otworze.

Wyniki obliczeń zailenia dla otworu Piła 1/IG 1 przedstawiono na rycinie 2. Bardzo wysokie wartości zailenia występują w utworach triasu, gdzie poza dolną częścią triasu środkowego (wapienia muszlowego) skały wykazują niemal całkowite zailenie. Jednocześnie jest to bardzo miąższy kompleks skalny, który istotnie wpływa na model rzeczywistego pograżenia potencjalnych skał macierzystych karbonu i dolomitu głównego w mezozoiku. Najniższe zailenie stwierdzono w utworach solnych permu (maksymalnie ok. 20%) oraz w utworach jury dolnej, gdzie średnie wartości wynoszą ok. 20%.

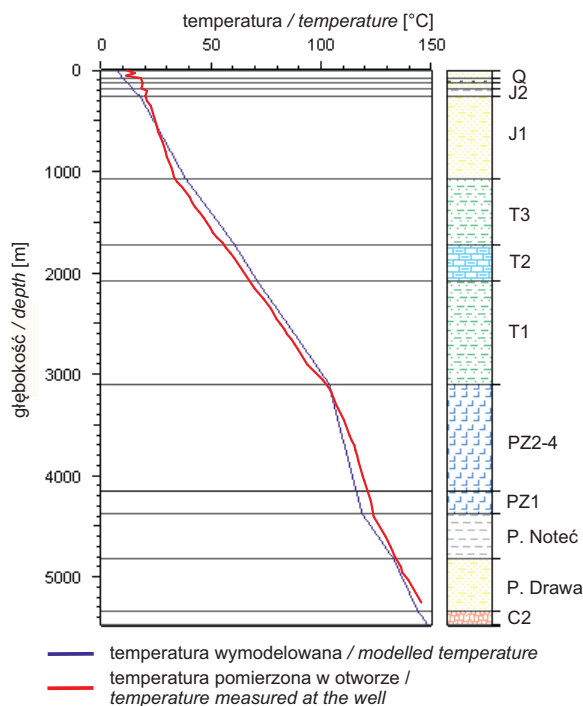
Drugim bardzo istotnym parametrem początkowym, niezbędnym do określenia w warstwach o potencjale generacyjnym, jest całkowita zawartość węgla organicznego (TOC) (ryc. 2). Zawartość materii organicznej w profilu jest bardzo niska, jedynie w górnej części profilu dochodzi do 5%, w miejscach gdzie występują wkładki węgla. W pozostałych częściach profilu nie przekracza 1% (ryc. 2). Średnia w skałach macierzystych wynosi 0,2%.

Wyznaczone wartości składu mineralnego, zailenia i TOC zostały zweryfikowane wynikami badań laboratoryjnych rdzeni wiertniczych (ryc. 2). Pozwoliło to określić reprezentatywne wartości parametrów dla poszczególnych jednostek litostratygraficznych wykorzystywanych następnie w modelowaniu.

Kalibracja modelu

Wiarygodność modelu zweryfikowano z wykorzystaniem pięciu niezależnych zestawów danych: refleksyjności witrynit, ciśnienia, temperatury, porowatości oraz przepuszczalności. Trzy ostatnie parametry, mimo mniejszego znaczenia niż dwa pierwsze, zostały omówione szczegółowo, ponieważ do ich wyznaczenia i weryfikacji niezbędne były dane z profilowań geofizycznych.

Najważniejszym kryterium była zgodność modelowanej refleksyjności witrynit z wynikami badań laboratoryjnych. Pomimo niewielkiej liczby dostępnych pomiarów uzyskano dobrą zgodność przebiegu krzywej modelowej



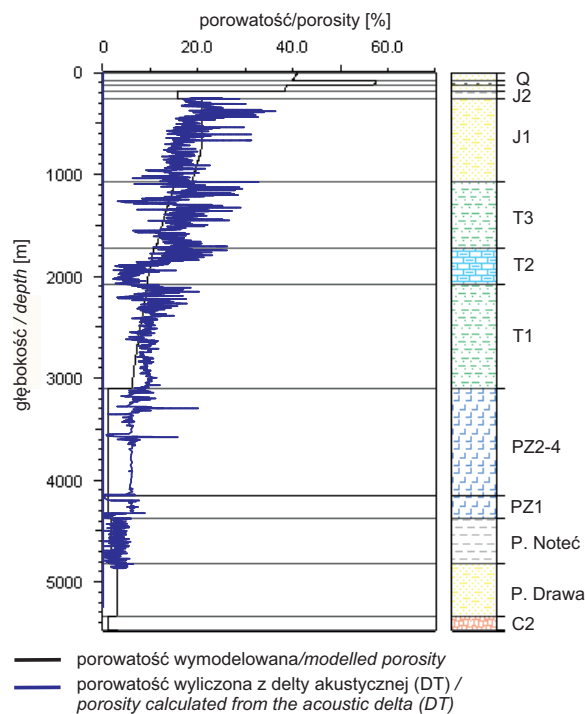
Ryc. 3. Profil temperaturowy dla otworu wiertniczego Piła 1/IG 1 (Łojek, 2023): **Q** – czwartorzęd; **J2** – jura środkowa; **J1** – jura dolna; **T3** – trias górny; **T2** – trias środkowy; **T1** – trias dolny; **PZ2-4** – perm, cechsztyń, cyklotemy PZ2-PZ4; **PZ1** – perm, cechsztyń, cyklotem PZ1; **P. Noteć** – perm, czerwony spągowiec, formacja Noteci; **P. Drawa** – perm, czerwony spągowiec, formacja Drawy; **C2** – karbon górny

Fig. 3. Temperature profile for the Piła 1/IG-1 borehole (Łojek, 2023): **Q** – Quaternary; **J2** – Middle Jurassic; **J1** – Lower Jurassic; **T3** – Upper Triassic; **T2** – Middle Triassic; **T1** – Lower Triassic; **PZ2-4** – Permian Zechstein cyclothems PZ2-PZ4; **PZ1** – Permian Zechstein Cyclothem PZ1; **P. Noteć** – Permian Rotliegend Noteć Formation; **P. Drawa** – Permian Rotliegend Drawa Formation; **C2** – Upper Carboniferous

z maksymalnymi wartościami obserwowanymi w otworze (Łojek, 2023). Niewielkie różnice występowały głównie w utworach triasu i dolomicie głównym, co wynikało z ograniczonej reprezentatywności pojedynczych ziaren wityritu.

Równie korzystne wyniki uzyskano podczas porównania temperatur modelowanych z pomiarami wykonanymi po osiągnięciu równowagi termicznej (ryc. 3). Otrzymana zgodność potwierdziła poprawność przyjętej wartości współczesnego strumienia ciepłego wynoszącej ok. 56 mW/m² oraz przyjętego modelu termicznego. Modele zakładające wyższe wartości strumienia prowadziły do znacznego przeszacowania temperatur oraz stopnia dojrzałości materii organicznej.

Kalibracja porowatości wykazała dobrą zgodność pomiędzy wartościami modelowanymi i obliczonymi na podstawie profilowań akustycznych (ryc. 4). Wyjątek stanowiły utwory solne, dla których metoda oparta na profilu DT zawyża rzeczywistą porowatość. Porowatość potencjalnych skał zbiornikowych w permie jest negatywna (poniżej 5%). Jedyną skałą o potencjalnie zbiornikowym są piaskowce jury dolnej, które nie mają tu potencjału zbiornikowego dla węglowodorów z powodu braku uszczelnie-



Ryc. 4. Profil porowatości dla otworu wiertniczego Piła 1/IG 1 (Łojek, 2023). Objasnienia na rycinie 3

Fig. 4. Porosity profile for the Piła 1/IG 1 borehole (Łojek, 2023). For explanations see Figure 3

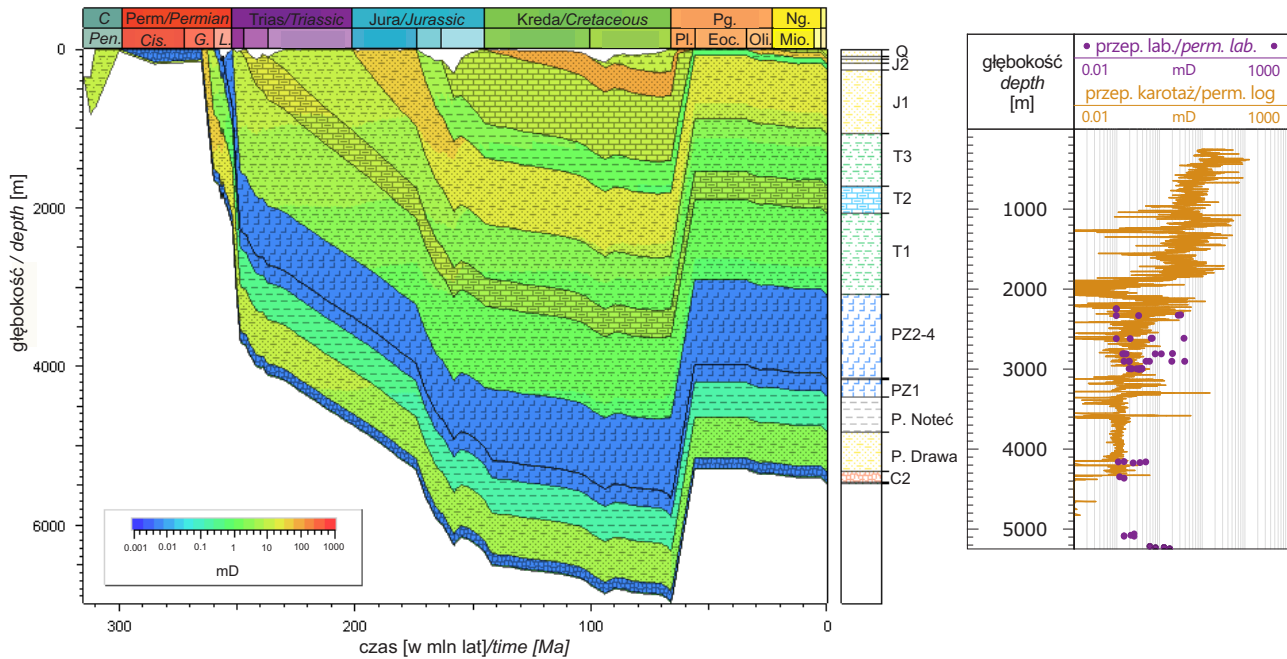
nia i struktury, ale mają duży potencjał jako skała zbiornikowa dla wód termalnych, ponieważ porowatość wynosi tam średnio od 16 do 20% (ryc. 4). Wyniki potwierdziły poprawność założonej wielkości erozji kredowo-paleogeńskiej wynoszącej ok. 1729 m.

Dodatkową weryfikację stanowiło modelowanie przepuszczalności pogrążonych skał. Wartości przepuszczalności wyznaczone na podstawie pomiarów laboratoryjnych oraz profilowań geofizycznych dobrze pokrywają się z wartościami uzyskanymi w modelu (ryc. 5).

Rekonstrukcja pogrążania, historii termicznej i generacji węglowodorów

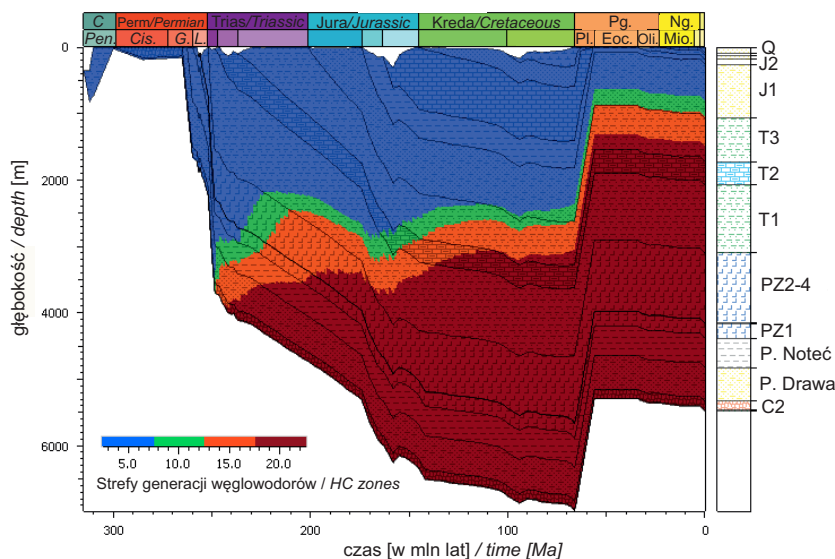
Największe tempo depozycji występowało w czasie sedymentacji utworów czerwonego spągowca oraz podczas sedymentacji utworów triasu dolnego. Największe tempo subsydencji przypadło na czas sedymentacji „formacji ilastej” środkowego pstrego piaskowca. Pod koniec kredy nastąpiła inwersja tektoniczna i erozja osadów mezozoicznych, potwierdzona analizą kompaktacji i porowatości. Subsydencja tektoniczna dominowała w środowym i późnym permie oraz we wczesnym triasie. Po tym okresie przeważała subsydencja obciążeniowa.

Utwory karbonu (w których dominuje kerogen typu III) osiągnęły okno ropne pod koniec permu / we wczesnym triasie. Jeszcze we wczesnym triasie osiągnęły fazę mokrego gazu, a od środkowego triasu – gazu suchego (ryc. 6). W kredzie osiągnęły warunki metagenazy, co tłumaczy wysoką zawartość azotu w próbach otworowych (do 73% objętości). Materia organiczna zgromadzona w do-



Ryc. 5. Przepuszczalność w otworze wiertniczym Piła 1/IG 1 (Łojek, 2023): **przep. lab.** – przepuszczalność pomierzona laboratoryjnie; **przep. kartoż** – przepuszczalność wyliczona z karotaży, pozostałe objaśnienia na rycinie 3

Fig. 5. Permeability in the Piła 1/IG 1 borehole (Łojek, 2023): **perm. lab.** – permeability measured in the laboratory, **perm. log.** – permeability calculated from well logging, for explanations see Figure 3



Ryc. 6. Strefy generacji węglowodorów dla III typu kerogenu w otworze wiertniczym Piła 1/IG 1 (Łojek, 2023). Pozostałe objaśnienia na rycinie 3

Fig. 6. HC zones for type III kerogen in the Piła 1/IG 1 borehole (Łojek, 2023). For explanations see Figure 3

lomicie głównym (głównie kerogen typu II) weszła w okno ropne w triasie środkowym, a fazę generacji gazu suchego osiągnęła na przełomie jury wczesnej i środkowej, unikając przy tym niekorzystnego przegrzania termicznego. Utwory jury środkowej pozostały niedojrzałe (ryc. 6).

Modelowanie przepuszczalności skał wskazuje, że w przypadku braku pułapek strukturalnych w utworach

czerwonego spągowca, generowany gaz od wczesnego triasu przemigrował do stref płytszych (ryc. 5, 6). Utwory dolomitu głównego charakteryzują się słabym potencjałem zbiornikowym ze względu na niekorzystną litologię, małą miąższość oraz brak spękań tektonicznych, co wynika z lokalizacji otworu w skrzydle antykliny.

WNIOSKI

Profilowania geofizyczne stanowią podstawowe narzędzie ilościowej rekonstrukcji historii pograżania i ewolucji termicznej basenów sedimentacyjnych. W otworze Piła 1/IG 1 umożliwiły określenie parametrów petrofizycznych oraz wiarygodną kalibrację modelu.

Integracja danych geofizycznych z modelowaniem basenowym pozwala odtworzyć tempo sedimentacji, subsydencję, historię termiczną oraz procesy generacji i migracji węglowodorów.

Kluczowa była jednoczesna kalibracja na podstawie refleksyjności witryny, temperatur, porowatości i ciśnień, co zwiększyło wiarygodność modelu. Wyliczone parametry petrofizyczne z krzywych geofizycznych dowodzą, że potencjał zbiornikowy w rejonie otworu jest niewielki. Kompleksy piaskowców permu są silnie zailone i uległy silnej kompaktacji, przez co ich parametry porowatości

i przepuszczalności są niezadowalające i oscylują głównie w zakresie kilku procent (ryc. 4) i 0,1–1,0 mD (ryc. 5). Modelowanie paleopogrążenia i generacji węglowodorów sugeruje, że erozja z przełomu mezozoiku i kenozoiku wyniosła ponad 1700 m (ryc. 5, 6).

Profilowania geofizyczne znajdują zastosowanie nie tylko w ocenie potencjału węglowodorowego, ale także w analizach geotermalnych, tektonicznych i rekonstrukcji ewolucji basenów.

Autor składa serdeczne podziękowania anonimowemu Recenzentowi za cenne uwagi i sugestie, które pozwoliły na ulepszenie ostatecznej wersji tekstu.

LITERATURA

- AHMED U., CRARY S.F., COATES G.R. 1991 – Permeability Estimation: The Various Sources and Their Interrelationships. *Journal of Petroleum Technology*, 43 (5): 578–587.
- BOTOR D., PAPIERNIK B., MAĆKOWSKI T., REICHER B., KOSAKOWSKI P., MACHOWSKI G., GÓRECKI W. 2013 – Gas generation in Carboniferous source rocks of the Variscan foreland basin: Implications for a charge history of Rotliegend deposits with natural gases. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 83: 353–383.
- DADLEZ R., MAREK S., POKORSKI J. (red.) 1998 – Atlas paleogeograficzny epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce skala 1 : 2 500 000. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- GÓRECKI W., SZCZEPAŃSKI A., SADURSKI A., HAJTO M., PAPIERNIK B., KUŹNIAK T., KOZDRA T., SOBOŃ J., SZEWCZYK J., SOKOŁOWSKI A., STRZETELSKI W., HAŁADUS A., KANIA J., KURZYDŁOWSKI K.J., GONET A., CAPIK M., SLIWA T., NEY R., KĘPIŃSKA B., KRACH J. 2006 – Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie.
- GRABOWSKI J., WAŚKIEWICZ K., WIERZBOWSKI H. (red.) 2023 – Profile Głębokich Otworów Wiertniczych Państwowego Instytutu Geologicznego, z. 165 – Piła 1/IG 1. Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa.
- HALLAM A. 1992 – Phanerozoic Sea-level. Columbia University Press, New York: 3–266.
- HAQ B.U., HARDENBOL J., VAIL P.R. 1988 – Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea level change. [W:] Wilgus C.K. (red.), *Sea Level Changes: An Integrated Approach*. Special Publication, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 42: 71–108.
- HARRISON C.G.A. 2002 – Power spectrum of sea level change over fifteen decades of frequency. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3 (8).
- JARZYNA J., BAŁA M., ZORSKI T. 1999 – Metody geofizyki otworowej. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- KARNKOWSKI P.H. 1999 – Origin and evolution of the Polish Rotliegend Basin. *Polish Geological Institute, Special Papers*, 3: 1–93.
- KIEŁT M. 2009 – Geofizyka wiertnicza w poszukiwaniu węglowodorów. Strukturalne i sedimentologiczne zastosowanie otworowych profiliowań geofizycznych. Wydawnictwo Adam Marszałek, Toruń.
- LEONOWICZ P. 2015 – Storm-influenced deposition and cyclicity in a shallow-marine mudstone succession – example from the Middle Jurassic ore-bearing clays of the Polish Jura (southern Poland). *Geological Quarterly*, 59 (2): 325–344.
- LESZCZYŃSKI K. 1997a – The Lower Cretaceous depositional architecture and sedimentary cyclicity in the Mid-Polish Trough. *Geological Quarterly*, 41 (4): 509–520.
- LESZCZYŃSKI K. 1997b – The Upper Cretaceous carbonate-dominated sequences of the Polish Lowlands. *Geological Quarterly*, 41 (4): 521–532.
- ŁOJEK M. 2023 – Rekonstrukcja tempa depozycji, warunków pogrzebienia oraz historii termicznej. [W:] Grabowski J., Waśkiewicz K., Wierzbowski H. (red.), *Profile Głębokich Otworów Wiertniczych Państwowego Instytutu Geologicznego*, z. 165 – Piła 1/IG 1: 202–213. Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa.
- MACHAŁSKI M., MALCHYK O. 2019 – Relative bathymetric position of opoka and chalk in the Late Cretaceous European Basin. *Cretaceous Research*, 102: 30–36.
- MAREK S. (red.) 1988 – Mapy paleomiąższości i facji oraz mapy paleotektoniczne epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce. *Kwartalnik Geologiczny*, 32 (1): 1–198.
- MAREK S., PAJCHŁOWA M. (red.) 1997 – Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 153.
- MATYJA B.A., WIERZBOWSKI A. 1996 – Sea-bottom relief and bathymetry of Late Jurassic sponge megafacies in Central Poland. *GeoResearch Forum*, 1/2: 333–340.
- PASSEY Q.R., CREANEY S., KULLA J.B., MORETTI F.J., STROUD J.D. 1990 – A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74 (12): 1777–1794.
- RIDER M.H. 2002 – The geological interpretation of well logs. 2nd Edition. Rider-French Consulting, Sutherland.
- SZEWCZYK J., GIENKA D. 2009 – Terrestrial heat flow density in Poland – a new approach. *Geological Quarterly*, 53 (1): 125–140.
- UFFMANN A.K., LITKE R., RIPPEN D. 2012 – Mineralogy and geochemistry of Mississippian and Lower Pennsylvanian Black Shales at the Northern Margin of the Variscan Mountain Belt (Germany and Belgium). *International Journal of Coal Geology*, 103: 92–108.
- WYLLIE M.R.J., GREGORY A.R., GARDNER L.W. 1956 – Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 21 (1): 41–70.
- ŻELICHOWSKI A.M. (red.) 1985 – Dokumentacja wyników otworu badawczego Piła 1/IG 1. Centralne Archiwum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa, nr inw. 129561.

Praca wpłynęła do redakcji 30.06.2026 r.

Akceptowano do druku 27.07.2026 r.