

Wyniki badań zrealizowanych w otworze Oława GT-1 na tle warunków geotermalnych i hydrogeologicznych rejonu miasta Oława

Maciej Pikuła¹, Tomasz Wróbel¹, Mikołaj Kapuściarek²

Results of research carried out in the Oława GT-1 borehole against the background of geothermal and hydrogeological conditions in the area of the town of Oława. *Prz. Geol.*, 73: 1074–1089; doi: 10.7306/2025.115

Abstract. The article presents the results of hydrogeological research carried out in the Oława GT-1 geothermal well, which was drilled for the needs of the city of Oława within the framework of the project “Prospecting and recognition of geothermal water deposits in the area of the town of Oława”. In addition to the presenting results of the studies, the paper discusses the geothermal and hydrogeological conditions of the Middle and Lower Buntsandstein aquifer of the Oława region.

Keywords: hydrogeology, thermal waters, medicinal waters, Opole Trough, Middle and Lower Buntsandstein aquifer, deep boreholes, Oława GT-1 research and exploitation borehole, hydrogeology, Oława city, pumping test, hydrogeological report, geothermal gradient, thermal conductivity, heat flux density

Opisane w niniejszym artykule prace i roboty geologiczne zostały zrealizowane jako część programu priorytetowego Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) pt. *Udostępnianie wód termalnych w Polsce*. Zadaniem programu jest wykonywanie prac i robót geologicznych związanych z poszukiwaniem i rozpoznawaniem złóż wód termalnych w celu ich udostępnienia. Celem artykułu jest prezentacja wybranych wyników badań wykonanych w otworze Oława GT-1 na tle warunków geotermalnych i hydrogeologicznych rejonu miasta Oława.

Otwór badawczo-eksploatacyjny Oława GT-1 odwiercono w ramach przedsięwzięcia *Poszukiwanie i rozpoznanie złóż wód geotermalnych na terenie miasta Oława*, które zrealizowano na podstawie umowy pomiędzy Gminą Miastem Oława a Narodowym Funduszem Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Inwestycję dofinansowano ze środków NFOŚiGW. Roboty geologiczne zostały wykonane przez *Algeo Sp. z o.o.*, nadzór geologiczny nad wierceniem i badaniami prowadziło *KGHM Cuprum Sp. z o.o.* – Centrum Badawczo-Rozwojowe, prace były również dozorowane przez *Drill-Lab Sp. z o.o.* w Zielonej Górze (Aparatura Kontrolno-Pomiarowa). Wiercenie i badania zrealizowano w latach 2022–2023.

OBSZAR BADAŃ

Otwór Oława GT-1 znajduje się w południowo-zachodniej części miasta Oława, na terenie Miejskiego Zakładu Energetyki Ciepłej-Oława Sp. z o.o. (ryc. 1).

Budowa geologiczna

Wiercenie wykonano w północnym skraju niecki opolskiej, której osady zalegają nad utworami monokliny przedsudeckiej – ryc. 2 (Karnkowski, 2008; Żelaźniewicz i in., 2011; Kędziński, Uchman, 2018). Na południowy zachód

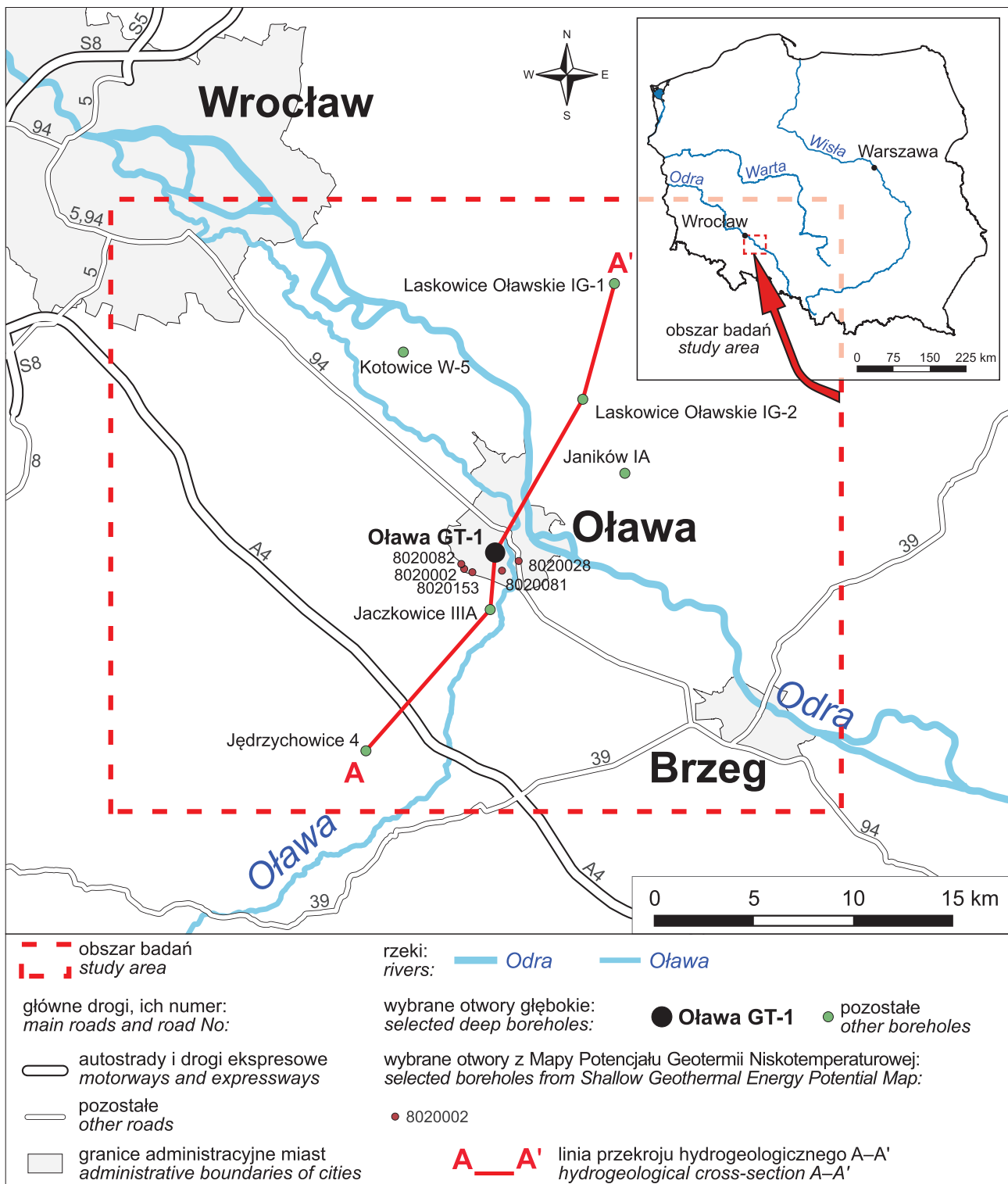
od otworu przebiega strefa uskokuwa środkowej Odry, która oddziela monoklinę od bloku przedsudeckiego (Oberc, 1974; Żelaźniewicz i in., 2011).

Pod osadami permskimi monokliny przedsudeckiej występują starsze skały metamorficzne, należące do krystalicznego podłoża bloku przedsudeckiego. Są to łupki krystaliczne i gnejsy, których miąższość przekracza 1286,90 m (Cwojdzńska-Ruziewicz, 1987, 1990; Michalska, 1992, 2003; Juroszek, Kłapciński; 2002; Winnicka, 2008, 2009; Badura, Cizek, 2021; Winnicka i in., 2013).

Odwiert Oława GT-1 jest zlokalizowany w granicach późnopaleozoicznego Wschodniego Basenu Przedsudeckiego (Narkiewicz i in., 2023). Jest to permski (wczesny–środkowy perm) basen sedymentacyjny o charakterze epikontynentalnym. Basen wypełniają klastyczne osady lądowe czerwonego spągowca dolnego i górnego, które maksymalnie osiągają 957,40 m miąższości w rejonie pomiędzy miastami Oława i Brzeg. Są to głównie osady stożków napływowych, a w najniższej części profilu – osady jeziorno-bagienne. Deponowanie osadów zachodziło w trzech cyklach sedymentacyjnych o pochodzeniu diastroficznym (Kiersnowski, 1983, 1995). Zgodnie z pracą Kiersnowskiego (1995) rozwój basenu możemy podzielić na osiem etapów: I stadium inicjalne (późny karbon), II stadium przebudowy (późny karbon–wczesny perm), III stadium ekstensji i subsydencji (wczesny perm), IV stadium wyciszenia tektonicznego (wczesny perm), V stadium subsydencji i sinistralnych ruchów przesuwczych (wczesny perm), VI stadium wyciszenia tektonicznego (późny perm–wczesny trias), VII stadium postgenetycznych dyslokacji tektonicznych (jura–kreda), VIII stadium reaktywacji starszych dyslokacji tektonicznych (późny paleogen–neogen?). Według przytoczonego opracowania w stadium I i II lokalizacja wykonanego otworu jest poza zasięgiem basenu, na obszarze erodowanym – wyniesieniu będącym źródłem materiału osadowego lub w zasięgu starszych skał osadowych. Później, w IV i V etapie, w czasie dolnego permu (czerwony

¹ KGHM Cuprum – Centrum Badawczo-Rozwojowe, ul. gen. W. Sikorskiego 2–8, 53–659 Wrocław; maciej.pikula@kgmccuprum.com; tomasz.wrobel@kgmccuprum.com; ORCID ID: M. Pikuła – 0000-0002-0102-8449, T. Wróbel – 0009-0009-5574-4422

² Własna działalność gospodarcza, mikolaj.kapuscziarek@gmail.com; ORCID ID: 0009-0005-1174-5360

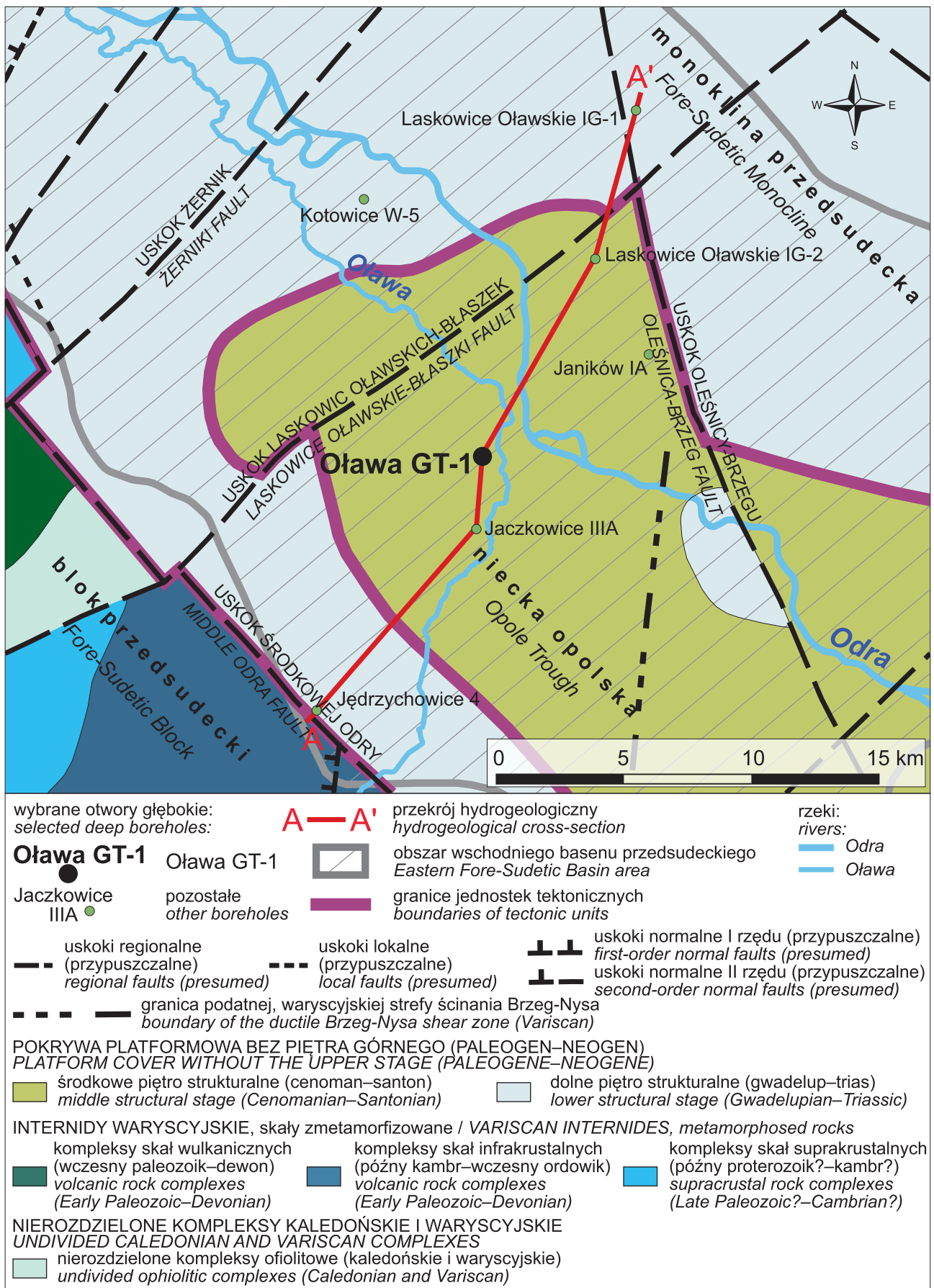


Ryc. 1. Lokalizacja otworu Oława GT-1
Fig. 1. Location of the Oława GT-1 borehole

spągowiec) Otwór Oława GT-1 znajduje się w obrębie systemu stożków aluwialnych. W pobliskich otworach wiertniczych stwierdzane osady permu są wykształcone głównie w postaci brunatnych zlepieńców o szkieletie ziarnowym zbudowanym ze skał metamorficznych, osadowych, kwarcu (Kłapciński, 1993; <https://otworywiertnicze.pgi.gov.pl>).

Osady pstręgo piaskowca środkowego i dolnego na analizowanym obszarze wyklinowują się w rejonie strefy uskokuwej środkowej Odry (ryc. 2), ich miąższość wzrasta

w kierunku północno-wschodnim, maksymalnie osiągając w granicach terenu opracowania ok. 400 m (Cwojdzńska-Ruziewicz, 1987, 1990; Michalska, 1992, 2003; Winnicka, 2008, 2009; Winnicka i in., 2013; Badura, Ciszek, 2021). Utwory pstręgo piaskowca środkowego i dolnego stanowią drobno-, średnio- i gruboziarniste piaskowce arkozowe, rzadziej szarogłazowe, miejscami także piaskowce zlepieńcowate. W obrębie tych utworów występuje warstwowanie przekątne, krzyżowe i poziome (Kłapciński, 1983). Warstwy piaskowate są porozielniane wkładkami



Ryc. 2. Mapa tektoniczna rejonu wykonanych badań (na podstawie: Karnkowskiego, 2008; Cymermana, 2010; Żelaźniewiczza i in., 2011; Mizerskiego, 2014; Narkiewiczza i in., 2023, zmodyfikowane)

Fig. 2. Tectonic map of the research area (based on: Karnkowski, 2008; Cymerman, 2010; Żelaźniewicz et al., 2011; Mizerski, 2014; Narkiewicz et al., 2023, modified)

mułowców lub iłowców. W rejonie Dolnego Śląska, na obszarze położonym na północ od bloku przedsudeckiego, wraz z głębokością w osadach pstrego piaskowca środkowego i dolnego wzrasta zawartość minerałów ilastych, jednocześnie zmniejsza się średnica ziaren budujących szkielet ziarnowy (Kłapciński, 1959; Sokołowski, 1967; Pikuła, Becker, 2023).

Pstry piaskowiec stanowi jednostkę litostratygraficzną, której wiek to przede wszystkim wczesny trias, zaś najstarsza część jego osadów jest zaliczana przez różnych badaczy i w kontekście różnych regionów do wczesnego triasu lub do późnego permu (Bachmann, Kozur, 2004; Nawrocki, 2004; Becker, 2015; Scholze i in., 2017). Stropowe partie pełnego profilu omawianych utworów należą już do triasu środkowego lub sytuują się na granicy triasu dolnego i środkowego (Nawrocki, Becker, 2020a). Wyodrębnianie skał pstrego piaskowca środkowego i dolnego dla profili otworów wiertniczych na omawianym obszarze ma często charakter umowny.

Powyżej osadów pstrego piaskowca środkowego zalegają młodsze utwory triasu: pstrego piaskowca górnego (wapienie, dolomity, margle, anhydryty, gipsy), wapienia muszlowego (dolomity, wapienie) i kajpru (iłowce, dolomity, piaskowce). Ponad osadami triasu, w granicach niecki opolskiej występują osady kredy górnej – margle, wapienie margliste, piaskowce (ryc. 3). Skały mezozoiczne są przykryte osadami kenozoiku: iłami, mułkami, piaskami, węglami brunatnymi i glinami zwałowymi.

Warunki geotermalne

Zgodnie z regionalnym opracowaniem Bruszewskiej (2000), w analizowanym obszarze temperatury skał na głębokości 500 m p.p.t. wahają się od 22 do 28°C, dla głębokości 1000 m p.p.t. – 34–42°C. Dla lokalizacji otworu Oława GT-1 wyinterpolowana wartość temperatury w cytowanym opracowaniu osiąga na głębokości 500 m p.p.t. ok. 26,4°C i 40°C na głębokości 1000 m p.p.t. (ryc. 5). Zgodnie z przytoczonym artykułem wartość gradientu geotermicznego osiąga wartości od powyżej 3,5°C/100 m, w centralnej i wschodniej części obszaru opracowania, do poniżej 2,4°C/100 m na północy i północnym zachodzie, w rejonie wykonanego odwiertu wartość była oceniana na ok. 3,4°C/100 m (ryc. 5).

W opracowaniu Karwasieckiej i Bruszewskiej (1997) przedstawiono statystyczne zestawienie pomiarów przewodności cieplnej skał dla podstawowych litotypów rejonu Dolnego Śląska. Spośród skał przewierconych w otworze Oława GT-1 w ww. zestawieniu znajdują się osady permu, triasu (pstry piaskowiec środkowy i dolny) i paleogenu–neogenu. Dla brekcji permskich uzyskano wartość równą 3,85 W/m°C, dla piaskowców permu 0,62–4,20 W/m°C, średnio 2,48 W/m°C, a dla piaskowców pstrego piaskowca – 1,86–3,00 W/m°C, średnio 2,48 W/m°C. Przewodność cieplną skał neogenu i paleogenu ww. pracy oceniono na 1,70–2,23 W/m°C, średnio 1,88 W/m°C. W rejonie wykonanego odwiertu dla osadów kenozoicznych oszacowano wartość przewodności cieplnej w pięciu otworach z *Mapy Potencjału Geotermii Niskotemperaturowej* (ryc. 1). Wartość tego parametru waha się od 1,53 do 2,12 W/m°C, średnio 1,85 W/m°C (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Geotermia>). W artykule Bruszewskiej (2000) wyznaczono średnią wartość przewodności cieplnej obszaru Dolnego Śląska dla głębokości 75–4240 m p.p.t (średnio 1500 m

p.p.t.), wartość tego parametru w analizowanym obszarze (ryc. 1) waha się od 1,80 do 2,20 W/m°C. Dla lokalizacji odwiertu, zgodnie z cytowaną pracą, uśredniona wartość przewodności cieplnej wynosi ok. 2 W/m°C.

W granicach analizowanego terenu przestrzenny rozkład wartości strumienia ciepłego Ziemi w przeszłości był określany w opracowaniach ogólnopolskich i regionalnych (Bruszevska, 2000; Nawrocki, Becker, 2020b). W *Geological atlas of Poland* (Nawrocki, Becker, 2020b) zaprezentowano dwie wersje map strumienia ciepłego Ziemi, które wykonano za pomocą różnych metodyk, opartych na:

- modelu geofizycznym bazującym na objętości składników skalnych o przyjętej, umownej przewodności cieplnej,
- przewodności cieplnej jako wartości średniej uzyskanej z próbek skalnych z badanego interwału.

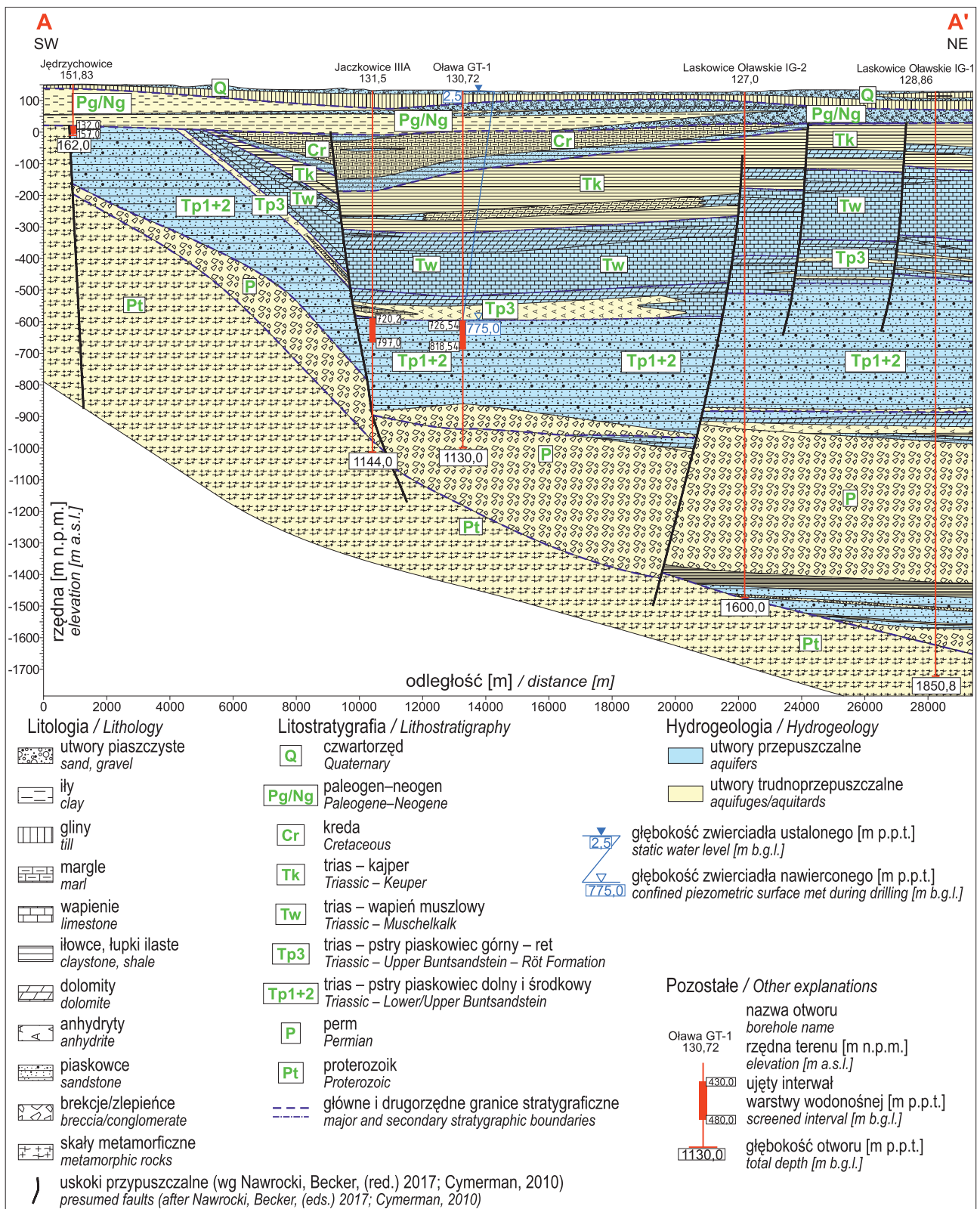
W omawianym rejonie dla pierwszej wersji mapy użytkano wartości strumienia ciepłego Ziemi, które wahają się od ok. 80 mW/m² na południowym zachodzie do ponad 87 mW/m² na północy i północnym wschodzie, w drugiej wersji mapy są to wartości od 67 mW/m² na południowym zachodzie do 74 mW/m² na wschodzie. Dla lokalizacji odwiertu Oława GT-1 wartości te wynoszą odpowiednio ok. 86 mW/m² oraz 71 mW/m² (Nawrocki, Becker, 2020b). Według Bruszewskiej (2000) w obszarze opisywanym w niniejszym artykule wartość tego parametru osiąga najniższe wartości na południowym wschodzie, rzędu 57 mW/m², a najwyższe – ponad 65 mW/m² – w części centralnej i północno-zachodniej (w tym w lokalizacji otworu Oława GT-1). W opracowaniach Karwasieckiej i Bruszewskiej (1997) oraz Bruszewskiej (2000) w najbliższym sąsiedztwie otworu Oława GT-1 omawiane parametry geotermalne określano dla otworów Janików IA, Laskowice Oławskie IG-1 oraz Kotowice W-5 (tab. 3).

Warunki hydrogeologiczne

Na analizowanym obszarze (ryc. 2) wody podziemne o znaczeniu użytkowym występują w osadach czwartorzędowych, paleogeńskich, neogeńskich i kredowych. Głębsze struktury wodonośne nie są poziomami użytkowymi ze względu na znaczną mineralizację oraz niekiedy słabe parametry filtracyjne (Bielecka, 1997a, b; Wojciechowska, 1997a, b; Kieńć, Kuzynków, 2000a, b; Żuk, 2000a, b).

W opisywanym rejonie (ryc. 2, 3) poniżej poziomów użytkowych występują poziomy wodonośne: kajpru, wapienia muszlowego, pstrego piaskowca górnego (ret), pstrego piaskowca środkowego i dolnego, permu (czerwony spagowiec).

Osady pstrego piaskowca środkowego i dolnego (trias dolny), łącznie z osadami pstrego piaskowca górnego – retu (nieujętego w odwiercie), stanowią zbiornik hydrogeotermalny triasu dolnego – ryc. 3 (Górecki, 2006). W profilu osadów dolnotriasowych udział utworów wodonośnych ocenia się jako niewielki, jego sumaryczna miąższość na Niżu Polskim zwykle wynosi od 50 do 200 m (nie uwzględniając rejonu wału kujawskiego, niecki mogileńsko-łódzkiej i niecki pomorskiej). Adekwatnie do zmian składu litologicznego, generalnie wraz z wzrostem głębokości, obserwuje się obniżanie porowatości i przepuszczalności osadów pstrego piaskowca środkowego oraz dolnego (Kłapciński, 1959; Sokołowski, 1967; Pikuła, Becker, 2023; Pikuła i in., 2024).



Ryc. 3. Przekrój hydrogeologiczny na linii Jędrzychowice–Laskowice Oławskie (A–A', zob. ryc. 1)
 Fig. 3. Hydrogeological cross-section along the Jędrzychowice–Laskowice Oławskie line (A–A', see Fig. 1)

Z uwagi na niejednoznaczny podział na osady pstrego piaskowca dolnego i środkowego w profilach otworów wiertniczych w niniejszym artykule przyjęto uproszczone nazewnictwo *poziom wodonośny pstrego piaskowca środkowego i dolnego*.

W rejonie otworu Olawa GT-1 utwory wodonośne pstrego piaskowca środkowego i dolnego zostały zbadane

w odwiertach Jączkowiec IIIA, Janików IA i Jędrzychowice 4 (Bielecka, 1997a, b; Kieńć, Kuzynków, 2000a, b; <https://spd.pgi.gov.pl/map>). W tabeli nr 1 zestawiono podstawowe parametry ujętego poziomu wodonośnego i charakterystykę wyników archiwalnych badań hydrogeologicznych.

Tab. 1. Podstawowe parametry otworów hydrogeologicznych Jaczkowice IIIA, Janików IA i Jędrzychowice 4 (Bielecka, 1997a, b; Kieńć, Kuzynków, 2000a, b; <https://spd.pgi.gov.pl/map>)**Table 1.** Basic parameters of hydrogeological boreholes Jaczkowice IIIA, Janików IA and Jędrzychowice 4 (Bielecka, 1997a, b; Kieńć, Kuzynków, 2000a, b; <https://spd.pgi.gov.pl/map>)

Nazwa otworu <i>Borehole</i>	Odległość od otworu Oława GT-1 [km], kierunek <i>Distance from Oława GT-1 borehole [km], direction</i>	Charakterystyka utworów wodonośnych pstręgo piaskowca środkowego i dolnego <i>Characteristics of the Middle and Lower Buntsandstein aquifer</i>		Litologia osadów pstręgo piaskowca środkowego i dolnego <i>Lithology of the Middle and Lower Buntsandstein aquifer</i>	Parametry próbnego pompowania <i>Parameters of the pumping test</i>	
		Głębokość występowania <i>Depth of occurrence [m p.p.t.] [m b.g.l.]</i>	Miąższość <i>Thickness [m]</i>		Wydajność <i>Discharge [m³/h]</i>	Depresja <i>Drawdown [m]</i>
Jaczkowice IIIA	2,9; S	720,20–1012,80	292,60	piaskowce grubo-, średnio- i drobnoziarniste z wkładkami iłolupku <i>coarse-, medium- and fine-grained sandstones with shale interbeds</i>	13,20	47,80
Janików IA	7,7; ENE	655,00–1010,00	355,00	piaskowce grubo-, średnio- i drobnoziarniste z wkładkami iłolupku lub mułowca <i>coarse-, medium- and fine-grained sandstones with shale or mudstone interbeds</i>	6,60	86,70
Jędrzychowice 4	11,9; SSW	132,00–162,00*	30,00*	piaskowce grubo-, średnio- i drobnoziarniste <i>coarse-, medium- and fine-grained sandstones</i>	39,04	20,10

* – całkowitej miąższości osadów nie przewiercono, podano przewiercony interwał oraz jego miąższość / *the total thickness of the sediments has not been drilled, the interval drilled and its thickness are given.*

Najniższe temperatury w stropie osadów triasu dolnego na terenie Niżu Polskiego rzędu kilkunastu stopni stwierdzono w południowej i południowo-zachodniej jego części (rejon podkenozoicznych wychodni), na północy i północnym zachodzie. Temperatury zmierzone w stropie osadów wzrastają w kierunku niecek: warszawskiej, łódzkiej, szczecińskiej, pomorskiej i miechowskiej oraz wału kujawskiego. W obrębie tych jednostek temperatura w stropie triasu dolnego waha się od 50°C do ponad 100°C, lokalnie osiągając nawet ponad 140°C (Górecki, 2006).

Zakłada się, że zasilanie poziomu wodonośnego pstręgo piaskowca środkowego i dolnego ma miejsce głównie w rejonie jego podkenozoicznych wychodni, wodami pochodzącymi z kenozoicznych struktur wodonośnych (okna hydrogeologiczne o charakterze erozyjno-sedymentacyjnym; Kłapciński, 1983; Kieńć, Kuzynków, 2000a, b; Becker i in., 2006). Na podstawie analizy przekrojów geologicznych i hydrogeologicznych można przyjąć, że jest możliwe również zasilanie omawianego poziomu wodonośnego wodami z wyżejleżących triasowych poziomów wodonośnych poza rejonem wychodni. Zasilanie tymi wodami umożliwia lokalny brak osadów izolujących, przepływ wód może również się odbywać za pośrednictwem stref uskokowych, a także bezpośrednich połączeń hydraulicznych o charakterze tektonicznym (przesunięcie serii osadów względem

siebie i utrata pierwotnej izolacji). W opisanym założeniu omawiamy poziom zasilający wody charakteryzujące się niższą mineralizacją, a także o niższą temperaturą (Pikuła i in., 2024).

METODYKA

Prace wiertnicze

Prace wiertnicze wykonano za pomocą urządzenia CROWN DSS-1000SD-118, podczas wiercenia osiągnięto projektowaną głębokość otworu 1130 m (Krawczyk i in., 2018, 2021; Pikuła i in., 2024). Wiercenie prowadzono metodą mechaniczno-obrotową, głównie jako wiercenie bezrdzeniowe z zastosowaniem świrdrów gryzowych i poborem próbek skalnych w postaci zwiercin. Roboty wykonywane aparatem rdzeniowym umożliwiły pobór próbek rdzenia skalnego dla odcinków: 750,0–768,4 m, 870,0–888,0 m, 1050,0–1059,4 m, 1060–1069,7 m i 1070,0–1087,0 m. W trakcie wiercenia, za pomocą aparatury kontrolno-pomiarowej laboratorium polowego, analizowano parametry: głębokość, prędkość schodzenia koronki, moment obrotowy, obroty świdra, ciśnienie pompy, przepływ płuczki, gęstość płuczki, temperaturę płuczki na wpływie i wypływie oraz procentową zawartość gazów.

Analiza próbek skalnych

W laboratorium polowym wykonano podstawowe badania pobranych próbek skalnych (analizę makro- i mikroskopową, oznaczenie zawartości węglanów), opisano litologię i określono stratygrafię przewierconych skał. W tabeli 2 przedstawiono w syntetycznej formie opis litologii, stratygrafii i zawodnienia utworów przewierconych w otworze Oława GT-1. Dla pobranych próbek skalnych w warunkach laboratoryjnych wykonano: 13 badań petrograficznych, 10 badań palinologicznych oraz 27 badań parametrów fizycznych (przepuszczalność, porowatość, odsączalność).

Badania wody

Podczas próbnych pompowań pobierano próbki wody do badań laboratoryjnych, w celu określenia parametrów fizykochemicznych oraz składu izotopowego, w niniejszej pracy przeanalizowano parametry fizykochemiczne dla trzech próbek wody.

Badania geofizyczne

Otworowe pomiary geofizyczne objęły m.in.:

- krzywiznę otworu PK, średnicę otworu PŚr; profilowanie gamma, profilowanie gęstości, profilowanie neutronowe, profilowanie oporności, badanie *Production Logging* (Matuszczak, Marzec, 2023),
- profilowanie temperatury w stanie ustalonym, cementomierz akustyczny (Fryziak, 2023).

Po osiągnięciu docelowej głębokości w otworze wykonano test *Production Logging*, w celu wyznaczenia stref dopływu wody do odwiertu. Test wykonano na „bosym” otworze przy użyciu zestawu sond pomiarowych. Badania prowadzono w warunkach statycznych oraz dynamicznych przy jednym wydatku produkcyjnym. Wyniki pomiarów zostały przeanalizowane w oprogramowaniu KAPPA Emerald v 2.60.14 przez wykonawcę badań – Geofizykę Toruń S.A. Na podstawie kompleksowej analizy profilowań geofizycznych wykonano interpretację litologiczno-złożową oraz profil geologiczny z otworu Oława GT-1 (Matuszczak, Marzec, 2023).

Pomiary geofizyczne temperatury w otworze w interwale 1–1130 m p.p.t. wykonano w dniu 28.08.2023 r. w stanie ustalonym, badania poprzedzono 47-dniową stójką (Fryziak, 2023; Pikuła i in., 2024). Prace zrealizowała iWS Sp. z o.o. z Zielonej Góry za pomocą aparatury GeoVista.

Interpretacja parametrów geotermalnych

Dane z profilowania temperatury w otworze zinterpretowano w interwale, który znajduje się poniżej punktu inwersji temperatury, w analizowanym przypadku punkt odpowiada wartości T_{min} zmierzonej w odwiercie (Aleksandrowski i in., 2020).

Obliczenia parametrów geotermicznych mają charakter uproszczony, pominięto w nich: kondukcję, konwekcję (w tym pionowe i poziome przewodnictwo cieplne rur i cementu), radiację (Karwasiecka, Bruszevska, 1997; Aleksandrowski i in., 2020). Na podstawie analizowanych pomiarów wykonano termogram i obliczono wartość gradientu geotermicznego (G), zgodnie z wzorem:

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta H} = \frac{T_n - T_0}{H_n - H_0} \quad [1]$$

gdzie:

G – gradient geotermiczny [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$],

ΔT – zmiana temperatury [$^{\circ}\text{C}$],

ΔH – zmiana głębokości [m],

T_n – temperatura końcowa interwału obliczeniowego [$^{\circ}\text{C}$],

T_0 – temperatura początkowa interwału obliczeniowego [$^{\circ}\text{C}$],

H_n – głębokość końcowa interwału obliczeniowego [m],

H_0 – głębokość początkowa interwału obliczeniowego [m] (Kapuściński i in., 1997; Karwasiecka, Bruszevska, 1997; Banks, 2012; Boden, 2016).

Dla skał przewierconych w otworze oszacowano wartość przewodności cieplnej przy zastosowaniu empirycznego modelu średniej geometrycznej (Woodside, Messmer, 1961a, b; Brigaud, Vasseur, 1989; Fuchs i in., 2013, 2015). Obliczenia wykonano na podstawie wyników litologicznej analizy ilościowej badań geofizycznych przeprowadzonych w interwale 179–1125 m z dokładnością co 0,10 m oraz na podstawie danych archiwalnych dla osadów kenozoicznych (Matuszczak, Marzec, 2023; <https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Geotermia>). Metoda szacowania opiera się na wzorach:

$$\lambda_{ma} = \Pi_i^n \lambda_i^{V_i} \quad [2]$$

oraz

$$\lambda = \lambda_{ma}^{1-\phi} \lambda_p^{\phi} \quad [3]$$

gdzie:

λ_{ma} – przewodność cieplna skał suchych [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$],

λ_i – przewodność cieplna skał danego składnika mineralno-litologicznego [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$],

V_i – ułamek objętościowy danego składnika mineralno-litologicznego [–],

λ – przewodność cieplna skały wypełnionej płynem [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$],

λ_p – przewodność cieplna płynu wypełniającego pory w skale [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$],

ϕ – porowatość [–] (Woodside, Messmer, 1961a, b; Brigaud, Vasseur, 1989; Fuchs i in., 2013, 2015).

W przypadku interwału, w którym nie wykonano badań geofizycznych, do obliczeń modelu przyjęto uśrednioną wartość przewodności cieplnej na podstawie danych szankowych z pięciu otworów z *Mapy potencjału geotermii płytkiej* – ryc. 1 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Geotermia>). Dla warstwy osadów kredy górnej, która nie była objęta badaniami geofizycznymi, przyjęto wartość λ analogiczną jak wartość średnia obliczona dla tych osadów objętych wspomnianymi badaniami w otworze Oława GT-1.

Do obliczeń gęstości strumienia cieplnego Ziemi dla otworu Oława GT-1 przyjęto uśrednioną wartość przewodności cieplnej, będącą średnią arytmetyczną poszczególnych wyników uzyskanych w całym profilu analizowanego odwiertu. Oznaczanie przewodności cieplnej przewierconych skał nie było celem projektu prac geologicznych, dlatego

Tab. 2. Zestawienie stratygrafii i litologii skał przewierconych w otworze Oława GT-1, zarejestrowanych temperatur i podział osadów na utwory wodonośne (kolor niebieski) oraz izolujące (kolor czarny)**Table 2.** Summary of stratigraphy and lithology of rocks drilled in the Oława GT-1 borehole, recorded temperatures and division of sediments into water-bearing (blue) and confining (black) formations

Stratygrafia /(jednostki nieformalne) <i>Stratigraphy/(informal units)</i>		Głębokość występowania osadów [m p.p.t.] <i>Depth of sediment occurrence [m b.g.l.]</i>	Litologia <i>Lithology</i>	Zakres zmierzonych temperatur górotworu <i>Range of measured rock mass temperatures [°C]</i>
Czwartorzęd <i>Quaternary</i>		0–10	piasek kwarcowy średnio i gruboziarnisty <i>medium and coarse quartz sand</i>	12,4–18,4
		10–40	gлина / <i>till</i>	
		46–62	piasek kwarcowy średnioziarnisty <i>medium quartz sand</i>	
Neogen <i>Neogene</i>		62–70	ił / <i>clay</i>	12,0–13,6
		70–80	piasek kwarcowy drobno i średnioziarnisty <i>fine and medium quartz sand</i>	
		80–127	ił, mułek / <i>clay, mud</i>	
Kreda górna <i>Upper Cretaceous</i>		127–215	margiel ilasty, wapień marglisty <i>clay marl, marly limestone</i>	13,6–16,6
		215–255	piaskowiec kwarcowy drobno i średnioziarnisty <i>fine and medium quartz sand</i>	
Trias górny <i>Upper Triassic</i>	(Kajper górny <i>Upper Keuper</i>)	255–380	iłowiec dolomityczny, z przewarstwieniami mułowca i wkładkami gipsu i anhydrytu <i>dolomitic claystone, with mudstone interbeds and gypsum and anhydrite inserts</i>	16,6–21,9
		380–409	margiel dolomityczny z wkładkami iłowca dolomitycznego, mułowca i anhydrytu <i>dolomitic marl with interbeds of dolomitic claystone, mudstone and anhydrite</i>	
	(Kajper dolny <i>Lower Keuper</i>)	409–449	iłowiec i mułowiec z wkładkami piaskowca drobnoziarnistego <i>claystone and mudstone with fine-grained sandstone inserts</i>	21,9–23,2
Trias środkowy <i>Middle Triassic</i>	(Wapień muszlowy <i>Muschelkalk</i>)	449–510	dolomit marglisto-wapienny, wapień dolomityczny i wapień marglisty <i>marly calcareous dolomite, dolomitic limestone and marly limestone</i>	23,2–28,4
		510–565	wapień dolomityczny / <i>dolomitic limestone</i>	
		565–650	wapień marglisty z wkładkami margla dolomitycznego <i>marly limestone with dolomitic marl interbeds</i>	
		650–680	dolomit organodetrytyczny i wapień dolomityczny <i>organodetrital dolomite and dolomitic limestone</i>	
Trias dolny <i>Lower Triassic</i>	(Pstry piaskowiec górny (ret) <i>Upper Buntsandstein (Röt Formation)</i>)	680–726	anhydryt z gipsem / <i>anhydrite with gypsum</i>	28,4–29,6
	(Pstry piaskowiec środkowy i dolny <i>Middle and lower Buntsandstein</i>)	726–991	piaskowiec kwarcowy o spoiwie ilastym z wkładkami iłowców i mułowców <i>clay-cemented quartz sandstone with claystone and siltstone interbeds</i>	29,6–35,3
Trias dolny <i>Lower Triassic</i>	(Pstry piaskowiec dolny <i>Lower Buntsandstein</i>)	991–1070	brekcja skał metamorficznych i wylewnych w piaskowcach różnoziarnistych z wkładkami mułowców <i>breccia of metamorphic and extrusive rocks in heterogeneous sandstones with mudstone interbeds</i>	35,3–37,4
Perm <i>Permian</i>	(Czerwony spagowiec <i>Rotliegend</i>)	1070–1087	brekcja skał metamorficznych i wylewnych w piaskowcach różnoziarnistych z wkładkami mułowców <i>breccia of metamorphic and extrusive rocks in heterogeneous sandstones with mudstone interbeds</i>	37,4–39,0
		1087–1130	brekcja skał metamorficznych w piaskowcach <i>breccia of metamorphic rocks in sandstones</i>	

dla otworu Oława GT-1 nie oznaczono tego parametru w warunkach laboratoryjnych, w związku z tym nie ma możliwości weryfikacji wartości λ przyjętych w modelu.

Do obliczeń w empirycznym modelu średniej geometrycznej wartości przewodności cieplnej dla poszczególnych minerałów lub skał zostały przyjęte z innych opracowań

(Chmura, 1968; Kappelmeyer, 1979; Downorowicz, 1983; Plewa, Plewa, 1992; Plewa, 1994; Karwasiecka, Bruszezowska, 1997; Fuchs i in., 2015).

Na podstawie obliczonych wartości gradientu termicznego G oraz uśrednionej przewodności termicznej λ określono wartość gęstości strumienia ciepłego za pomocą wzoru:

$$Q = G\lambda \quad [4]$$

gdzie:

Q – gęstość powierzchniowego strumienia ciepłego Ziemi [mW/m^2],

G – gradient geotermiczny [$^{\circ}\text{C/m}$],

λ – przewodność cieplna górotworu [$\text{W/m}^{\circ}\text{C}$] (Karwasiecka, Bruszezowska, 1997; Kapuściński i in., 1997).

Badania hydrogeologiczne

Po przeprowadzeniu testu *Production Logging*, w celu potwierdzenia negatywnego wyniku testu dla dolnej strefy przewierconych osadów, w odwiercie wykonano próbne pompowanie selektywne, podczas którego w otworze za pomocą pakera ujęto interwał 1015,8–1130,0 m p.p.t. (Kostrz i in., 2009; Pikuła i in., 2024).

W otworze Oława GT-1 trzykrotnie wykonano próbne pompowanie wielostopniowe. Były to pompowania składające się z sześciu stopni o wydajnościach od ok. 20 do ok. 70 m^3/h . Badania prowadzono w warunkach dopływu nieustalonego, ze stabilizacją lustra wody po poszczególnych stopniach pompowania. Pompowanie było wykonane dwukrotnie w interwale 725,0–1130,0 m p.p.t. w otworze „bosym” – przed oraz po realizacji w odwiercie zabiegów intensyfikujących dopływ wody, w celu oceny rezultatów wykonanych czynności. W niniejszym artykule szerzej omówiono próbne pompowanie wykonane po instalacji w odwiercie kolumny filtracyjnej (część robocza filtru 726,54–732,29 i 739,04–818,54 m p.p.t.). W zafiltrowanym odwiercie przeprowadzono próbne pompowanie 6-stopniowe, na podstawie którego kreślono wielkość zasobów eksploatacyjnych ujmowanych wód leczniczych i termalnych.

Podczas próbnych pompowań mierzono położenie zwierciadła w otworze za pomocą elektronicznych czujników ciśnienia z równoczesną transmisją danych, oraz prowadzono pomiary pomocnicze za pomocą manualnej, elektronicznej sondy kontaktowej z sygnałem dźwiękowo-światelnym. Realizowano również inne obserwacje z jednoczesną transmisją danych: wydajności pompowania i podstawowe parametry wody (temperatura w otworze i na wypływie, pH, ORP Redox oraz ciężar właściwy). Wydajność pompowania mierzono przepływomierzem ultradźwiękowym zainstalowanym na wylocie wody z otworu. Własności fizyko-chemiczne wypompowywanej wody kontrolowano za pomocą czujników cyfrowych. W czasie ostatniego stopnia pompowania pobierano próbki wody do analiz laboratoryjnych.

Wyniki próbnego pompowania zinterpretowano w kierunku ustalenia parametrów hydrogeologicznych ujętego poziomu wodonośnego: współczynnika filtracji k , współczynnika przewodności T i współczynnika zasobności S . Analizy wykonano za pomocą metody Theisa (pompowanie) oraz metody Theisa – rozwiązanie Agarwala (stabilizacja) w oprogramowaniu AqiferTest Pro v.10 (Theis, 1935; Agarwal, 1980; Röhrich, 2008).

WYNIKI WYKONANYCH PRAC

Stratygrafia i litologia skał przewierconych w otworze Oława GT-1

W tabeli 2 zestawiono podstawowe cechy stratygraficzne, litologiczne i hydrogeologiczne utworów skalnych przewierconych w otworze Oława GT-1.

W trakcie wiercenia otworu nie odnotowano żadnych utrudnień. Ucieczki płuczki, które stwierdzono, były niewielkie, łącznie wyniosły 16 m^3 i wystąpiły na następujących głębokościach:

- 505,0–520,0 – 6 $\text{m}^3/\text{dobę}$ (wapień muszlowy),
- 693,0 – 6 $\text{m}^3/\text{dobę}$ (pstry piaskowiec górny/ret),
- 726–729,0 – 4 $\text{m}^3/\text{dobę}$ (pstry piaskowiec środkowy).

Uznawane za wodonośne na omawianym obszarze osady kajpru i retu w otworze Oława GT-1 są wykształcone jedynie w postaci osadów niewodonośnych – ilowców, margli i anhydrytów.

Parametry geotermalne

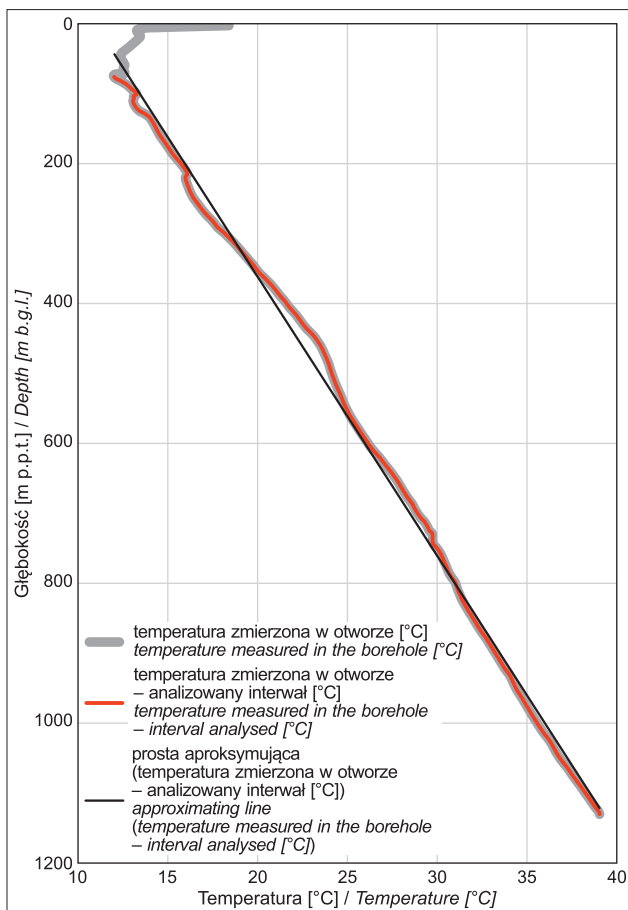
W dniu 28.08.2023 r. w otworze Oława GT-1, po 47-dniowej stójce, wykonano profilowanie temperatury w staniu ustalonym w interwale 0–1130 m. Na głębokości 1130 m stwierdzono temperaturę 39,04 $^{\circ}\text{C}$ – ryc. 4.

Punkt inwersji temperatury określono na głębokości 76,4 m. W analizowanym przypadku punkt ten odpowiada najniższej wartości temperatury zarejestrowanej w odwiercie (Aleksandrowski i in., 2020). Poniżej tego poziomu występuje strefa temperatur zależnych wprost od gradientu geotermicznego. Wzrost temperatury górotworu jest wprost proporcjonalny do lokalnej wartości gradientu geotermicznego (Ryżyński i in., 2023). Obliczenia parametrów geotermicznych wykonano dla odcinka termogramu poniżej ww. punktu w interwale 76,40–1130,00 m p.p.t., gdzie stwierdzono jednoznaczny, stabilny wpływ głębokości na wzrost mierzonej temperatury, a wykres zmierzonych temperatur ma przebieg bardzo zbliżony do prostoliniowego (ryc. 4). Na podstawie zbioru punktów pomiarowych w programie MS Excel za pomocą metody najmniejszych kwadratów wyznaczono prostą aproksymującą, dzięki której określono średnią wartość parametrów geotermicznych dla badanego interwału (ryc. 4). Dla odcinka 76,40–1130,00 m p.p.t. zmiana temperatury jest równa $\Delta T = 27,02^{\circ}\text{C}$ ($T_0 = 12,02^{\circ}\text{C}$, $T_{1130} = 39,04^{\circ}\text{C}$). Dla interwału obliczeniowego o długości $\Delta H = 1053,6$ m średnią wartość gradientu geotermicznego oszacowano na $G = 0,0256^{\circ}\text{C/m} = 2,56^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ – wzór [1].

Na podstawie analizy temperatur zmierzonych w odwiercie zidentyfikowano nieznaczne zakłócenia termogramu, poniżej punktu inwersji temperatury. Zaburzenia najbardziej uwidaczniają się na odcinkach: 216–310 m (maksymalnie wartości o 0,76 $^{\circ}\text{C}$ niższe od wyznaczonej linii trendu liniowego) oraz 350–540 m (wartości maksymalnie 1,03 $^{\circ}\text{C}$ wyższe od linii trendu liniowego).

Wykonane pomiary naniesiono na wycinek mapy temperatur na głębokościach 500 m i 1000 m oraz średniego gradientu temperatury (ryc. 5), która została opracowana dla obszaru Dolnego Śląska (Bruszezowska, 2000).

Na podstawie badań geofizycznych przeprowadzonych w odwiercie ich realizator – Geofizyka Toruń S.A. – wykonał interpretację litologii, porowatości i zawodnienia opró-



Ryc. 4. Termogram otworu Oława GT-1

Fig. 4. Thermogram of the Oława GT-1 borehole

bowanych skał (Baudzis, Kulig, 2023), jej wyniki dla interwału 725–1125 m p.p.t. przedstawiono na rycinie 6. W celu poprawy czytelności prezentowanych danych analizowane parametry są zobrazowane w postaci wartości średnich dla interwałów 5-metrowych, w materiałach źródłowych dane przedstawiono z dokładnością co 0,10 m.

Dla skał przewierconych w otworze określono wartość przewodności cieplnej. Obliczenia wykonano za pomocą empirycznego modelu średniej geometrycznej – wzór [2, 3] (Woodside, Messmer, 1961a, b; Brigaud, Vasseur, 1989; Fuchs i in., 2013, 2015). Kalkulacje oparto na wynikach litologicznej ilościowej badań geofizycznych wykonanych w interwale 179–1125 m (ryc. 6).

Dla utworów poszczególnych jednostek stratygraficznych uzyskano następujące, uśrednione wartości przewodności cieplnej:

- kreda górna (zasięg 127,00–255,00 m, opróbowany interwał 179,00–255,00m) $\lambda = 2,29 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$;
- trias górny – kajper (255,00–449,00 m) $\lambda = 1,50 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$;
- trias środkowy – wapień muszlowy (449,00–680,00 m) $\lambda = 2,29 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$;
- trias dolny – pstry piaskowiec górny (ret) (680,00–726,00 m) $\lambda = 2,37 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$;
- trias dolny – pstry piaskowiec środkowy i dolny (726,00–1070,00 m) $\lambda = 2,37 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$;
- perm (1070,00–1125,00 m) $\lambda = 2,10 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$.

Ze względu na brak precyzyjnych danych litologicznych dla osadów kenozoiku, które umożliwiłyby wyznaczenia wartości λ , w modelu obliczeniowym przyjęto wartość uśrednioną pogładowych wielkości tego parametru

z pięciu otworów (8020002, 8020028, 8020082, 8020153, 80200814) wchodzących w skład *Mapy potencjału geotermii płytkiej*, tj. $\lambda = 1,85 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ – ryc. 1 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Geotermia>).

Uśredniona wartość przewodności cieplnej (λ) dla otworu Oława GT-1 wynosi $2,14 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. Na podstawie G i λ , zgodnie z wzorem [4] określono wartość gęstości strumienia cieplnego: $Q = 54,81 \text{ mW/m}^2$ (tab. 3).

Parametry hydrogeologiczne ujętego poziomu wodonośnego, zatwierdzone zasoby eksploatacyjne wód

Na podstawie badań geofizycznych, opisu próbek skalnych, a także wyników badań laboratoryjnych dokonano wstępnej oceny parametrów hydrogeologicznych utworów pstręgo piaskowca środkowego i dolnego oraz permu. Stwierdzono generalny spadek porowatości analizowanych skał wraz z głębokością w obrębie osadów pstręgo piaskowca, związany ze wzrostem zawartości minerałów ilastych i drobniejszym uziarnieniem. Wskazana zależność jest charakterystyczna dla osadów pstręgo piaskowca środkowego i dolnego na obszarze Dolnego Śląska położonego na północ od bloku przedsudeckiego (Kłapciński, 1959; Sokołowski, 1967; Becker i in., 2006; Pikuła, Becker, 2023).

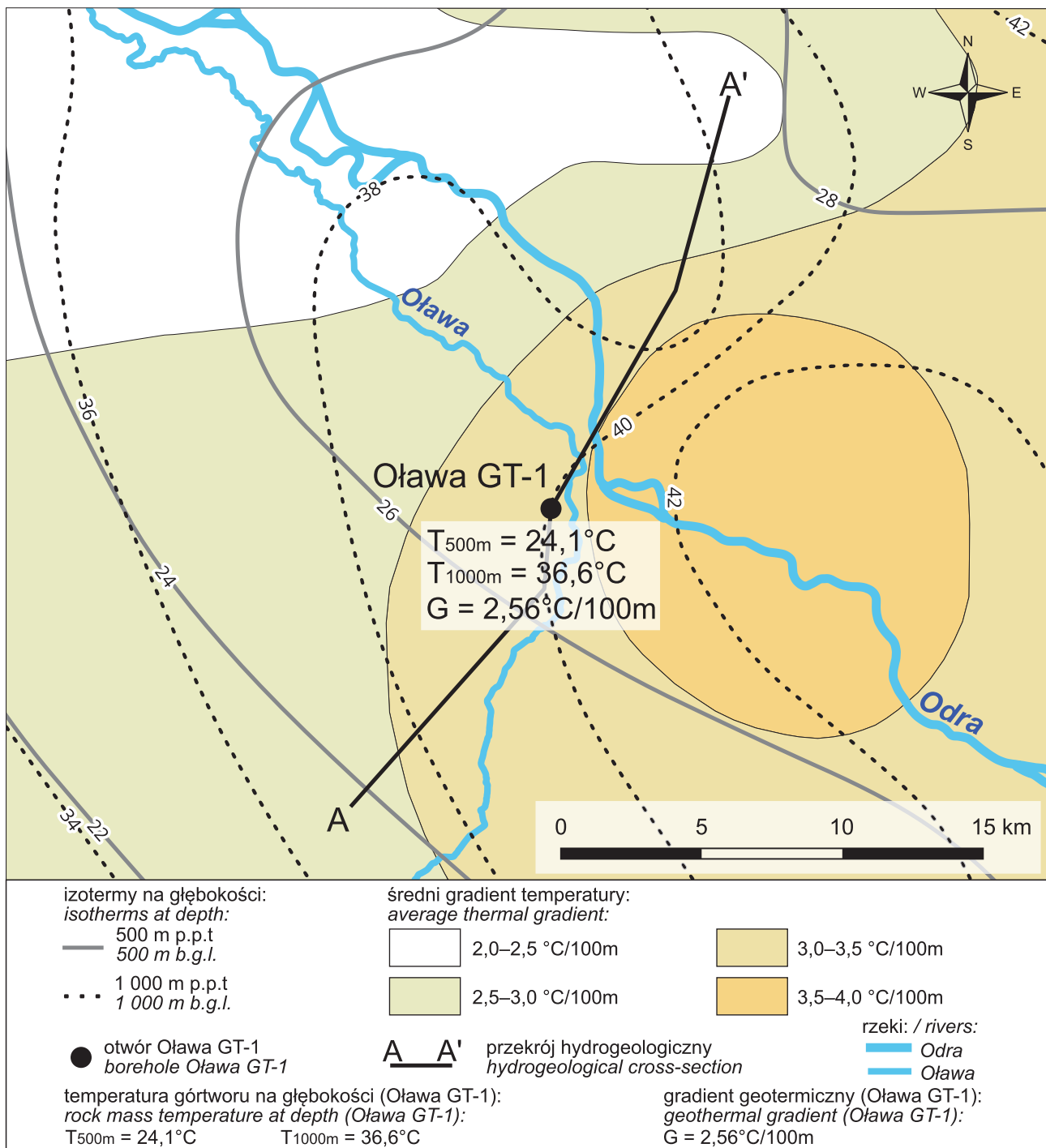
Po zakończeniu wiercenia w interwale 725,0–1080,0 m p.p.t. wykonano test *Production Logging* (Chowdhury i in., 2019). Na podstawie wyniku badania przeprowadzonego z wydatkiem $33 \text{ m}^3/\text{h}$ zidentyfikowano strefę, z której dopływało 98,2% wody, tj. z interwału 725–818 m. Pozostałe 1,8% wody dopływało do otworu z głębokości 818–930 m. Po wykonaniu testu, w celu dodatkowego potwierdzenia wyników badania, w odwiercie przeprowadzono pompowanie selektywne – za pomocą pakera ujęto interwał od 1015,8 do 1130,0 m p.p.t. Badania wykazały znikomy dopływ z ujętego interwału rzędu $0,0007 \text{ m}^3/\text{h}$ przy depresji ok. 30 m, co potwierdza wynik wcześniejszego badania i wskazuje na utwory praktycznie nieprzepuszczalne w ujętym interwale (Head, Epps, 2011). Test *Production Logging* oraz pompowanie selektywne wykonano na „bosym” otworze, przy średnicy otworu 216,0 mm (8 1/2”).

W otworze Oława GT-1 wykonywano próbne pompowania wielostopniowe – sześć stopni pompowania, ze stabilizacją lustra wody w odwiercie po każdym stopniu:

- na otworze „bosym” (przed i po przeprowadzeniu zabiegów intensyfikujących przepływ),
- po zafiltrowaniu otworu (pompowanie właściwe).

Wyniki pompowań wykonanych przed zafiltrowaniem otworu nie udokumentowały istotnego wpływu wykonanych zabiegów na wielkość dopływu wody do odwiertu.

Na podstawie kompletu wykonanych badań, w tym głównie badań geofizycznych i testów hydrogeologicznych, wytypowano strefę o najkorzystniejszych parametrach filtracyjnych. Następnie w otworze Oława GT-1 zainstalowano kolumnę filtracyjną o średnicy zewnętrznej części roboczej 187,0 mm, części czynnej filtru od 726,54 do 818,54 m p.p.t. (w przedziale 732,29–738,04 m p.p.t. rura międzyfiltrowa). W interwale czynnej części filtru zastosowano obsypkę z kulek szklanych o granulacji 2,0–4,0 mm. Po wykonaniu kolumny filtracyjnej i wprowadzeniu obsypki w otworze zrealizowano właściwe, wielostopniowe próbne pompowanie pomiarowe. Na podstawie analizy danych z pompowania oraz stabilizacji zwierciadła wody określono parametry hydrogeologiczne ujętych utworów wodonośnych (metoda Theisa, oraz metoda Theisa – rozwiązanie Agrwala):



Ryc. 5. Temperatury górtworu zmierzone w otworze Oława GT-1 na tle archiwalnych danych geotermalnych z oprac. Bruszewskiej (2000)
Fig. 5. Rock mass temperatures measured in the Oława GT-1 borehole in comparison with archival geothermal data from the study by Bruszevska (2000)

$$k = 3,47 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$T = 3,19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

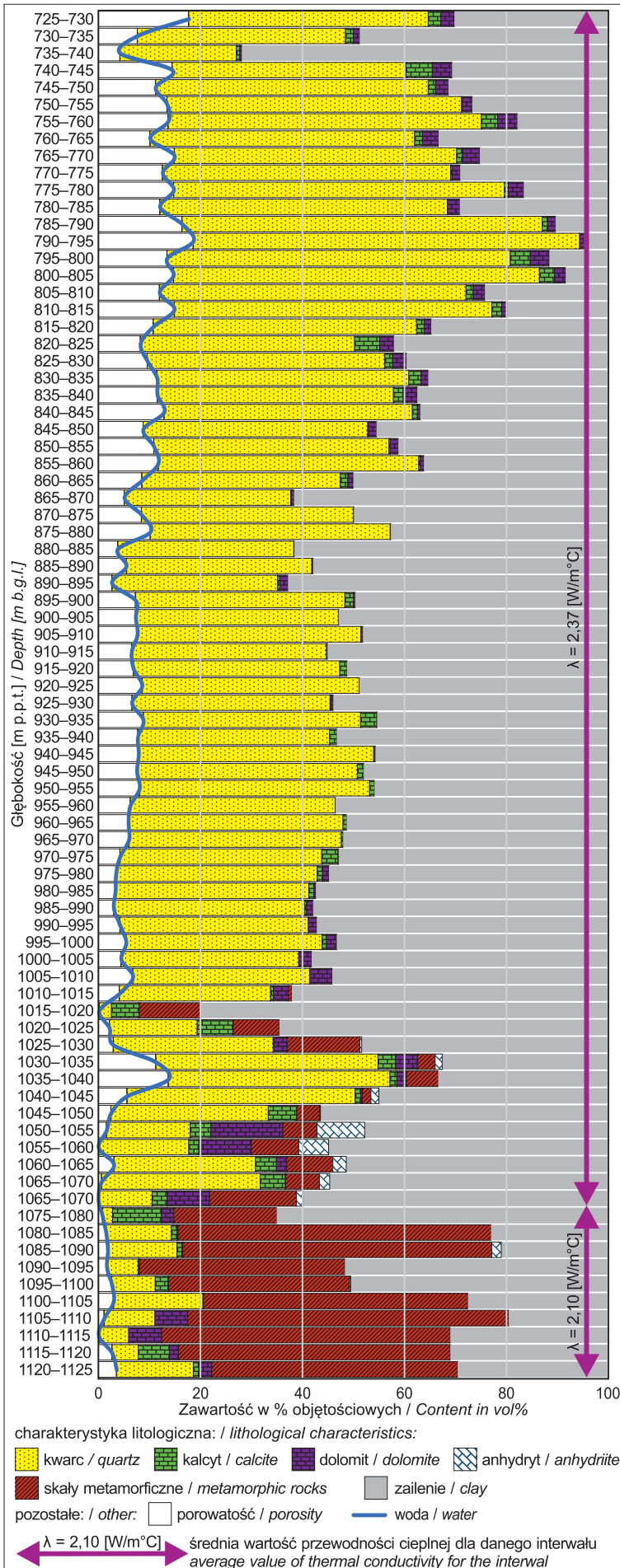
$$S = 2,82 \cdot 10^{-4} \text{ (Theis, 1934; Agarwal, 1980).}$$

Do obliczeń parametrów filtracyjnych przyjęto miąższość warstwy wodonośnej $m = 92$ m, co odpowiada długości interwału, z którego dopływa zasadnicza część wody do otworu (726–818 m).

W otworze Oława GT-1 udokumentowano zasoby eksploatacyjne wód termalnych i leczniczych w ilości zbliżonej do wydajności uzyskanej podczas ostatniego stopnia próbnego pompowania po zafiltrowaniu otworu – zasoby eksploatacyjne $Q_e = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ przy depresji $s = 91,10$ m.

Podstawowe parametry jakościowe złoża: temperatura na wypływie 29°C. Położenie ustabilizowanego zwierciadła wody ujmowanego poziomu w otworze określono na głębokości 2,50 m p.p.t.

Ujmowane wody mają typ chemiczny Cl-SO₄-Na-Ca, mineralizacja wynosi 4868 mg/l (ryc. 8). Mineralizacja wód poziomu wodonośnego pstręgo piaskowca środkowego i dolnego ujętych w rejonie odwiertu Oława GT-1 wzrasta wraz z oddalaniem się od podkenozoicznych wychodni tego wodonośności (ryc. 9). Wody z tego otworu spełniają podstawowe kryteria dla wód termalnych oraz leczniczych, które są określone w Ustawie z dnia 9 czerwca 2011 r. – *Prawo geologiczne i górnicze* w zakresie temperatury oraz



←

Ryc. 6. Wyniki interpretacji litologii, porowatości i zawadnienia skał zbadanych w otworze Oława GT-1, interwał 726–1125 m

Fig. 6. Results of interpretation of lithology, porosity and water content of rocks tested in the Oława GT-1 borehole, interval 726–1125 m

mineralizacji wód (Ustawa, 2011). Zgodnie z Ustawą z dnia 28 lipca 2005 r. o lecznictwie uzdrowiskowym, uzdrowiskach i obszarach ochrony uzdrowiskowej oraz o gminach uzdrowiskowych (Ustawa, 2005) w celu potwierdzenia leczniczych właściwości ujętych wód dodatkowo powinny one zostać ustalone na podstawie badań potwierdzających te właściwości oraz wykluczających negatywne oddziaływanie na organizm ludzki.

Na rycinie 7 przedstawiono wyniki ostatniego (VI) stopnia próbnego pompowania, które wykonano w otworze po jego zafiltrowaniu.

PODSUMOWANIE

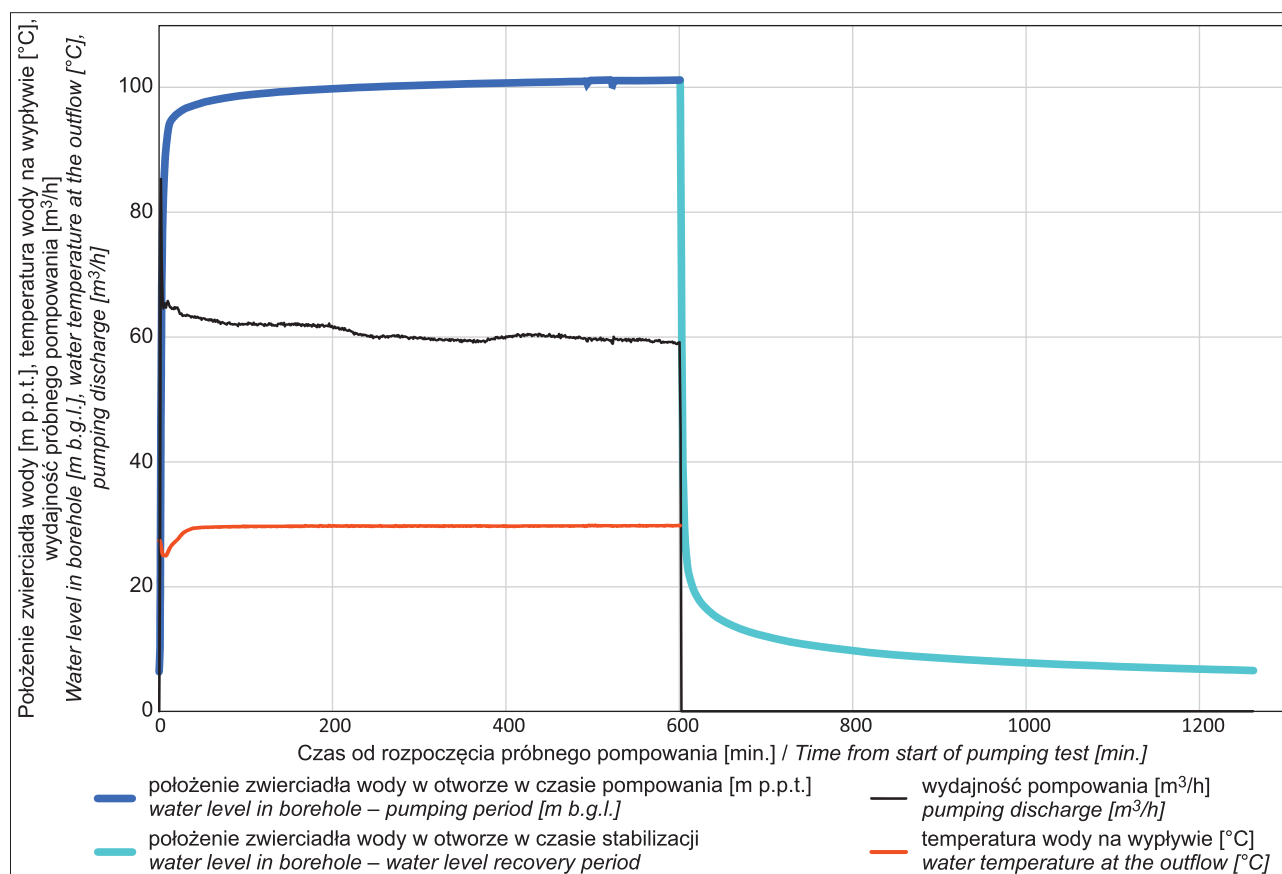
W otworze wykonano profilowanie temperatury w stanie ustalonym, z którego wynika, że poniżej strefy sezonowych zmian temperatury górotworu temperatura wzrasta zgodnie z głębokością i wartością gradientu geotermicznego, jest to przeważnie zależność o charakterze liniowym. Nieznaczne zakłócenia termogramu poniżej punktu inwersji temperatury są najbardziej widoczne na odcinku 216–310 m (wartości niższe od wyznaczonej linii trendu liniowego) oraz 350–540 m (wartości wyższe od przebiegu linii trendu liniowego). Zasięgi występowania tych anomalii w znacznym stopniu pokrywają się ze strefami występowania skał o podwyższonym zawadnieniu, w interwale 215–255 m występują górnokredowe piaskowce, a w zasięgu głębokości 380–680 m stwierdzono triasowe wapienie, dolomity i margle. Zaobserwowane odchylenia zinterpretowano jako przede wszystkim spowodowane bocznym dopływem wód o innej temperaturze.

Na podstawie analizy wyznaczonego odcinka pomiarowego obliczono wartość gradientu geotermicznego $G = 0,0256$ °C/m = 2,56 °C/100 m. Jest to wartość niższa o ok. 0,8 °C/100 m od interpolowanej wielkości tego parametru, którą podano w archiwalnym opracowaniu Bruszewskiej (2000) dla terenu Dolnego Śląska.

W opracowaniu Karwasieckiej i Bruszewskiej (1997) przedstawiono statystyczne zestawienie pomiarów przewodności cieplnej skał dla podstawowych litotypów rejonu Dolnego Śląska. Spośród skał przewierconych w otworze Oława Gt-1 są osady permu, triasu (pstry piaskowiec środkowy i dolny) oraz paleogenu-neogenu. W cytowanej pracy dla brekcji permskich uzyskano wartość równą 3,85 W/m°C, dla piaskowców permu od 0,62 do 4,20, średnio 2,48 W/m°C. Są to wartości wyższe niż uzyskane

Tab. 3. Parametry geotermalne odwiertu Oława GT-1 i wybranych otworów rejonu badań (Karwasiecka, Bruszevska, 1997)**Table 3.** Geothermal parameters of the Oława GT-1 borehole and selected boreholes in the study area (Karwasiecka, Bruszevska, 1997)

Nazwa otworu <i>Borehole</i>	Strumień ciepły Ziemi <i>Earth's heat flow</i> [mW/m ²]	Przewodność cieplna <i>Thermal conductivity</i> [W/m°C]
Janików IA	70,67	1,72
Laskowice Oławskie IG-1	60,00	2,66
Kotowice W-5	66,32	2,38
Oława GT-1	54,81	2,14

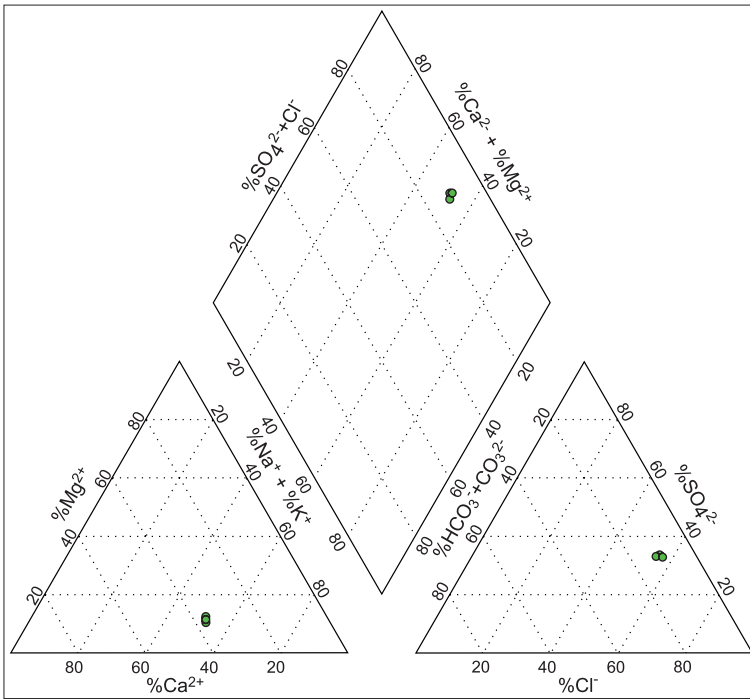
**Ryc. 7.** VI stopień próbnego pompowania w otworze Oława GT-1 – wykres położenia lustra wody, wydajności pompowania i temperatury wody na wypływie**Fig. 7.** Sixth stage of the test pumping in the Oława GT-1 borehole – graph of the water level, pumping discharge and water temperature at the well's water outflow

w wyniku przeprowadzonej analizy danych geofizycznych z odwiertu Oława GT-1. Dla piaskowców pstrego piaskowca są to wartości od 1,86 do 3,00, średnio 2,48 W/m°C, jest to wartość zbliżona do uzyskanej na podstawie obliczeń wykonanych dla opisywanego odwiertu. Przyjęte w modelu obliczeniowym wartości λ dla osadów kenozoicznych z *Mapy potencjału geotermii płytkiej*, tj. $\lambda = 1,85$ W/m°C, są porównywalne do wartości uśrednionej tego parametru $\lambda = 1,88$ W/m°C utworów paleogenu-neogenu Dolnego Śląska o litologii podobnej do osadów stwierdzonych w odwiercie Oława GT-1 – przewaga glin i ilów (Karwasiecka, Bruszevska, 1997).

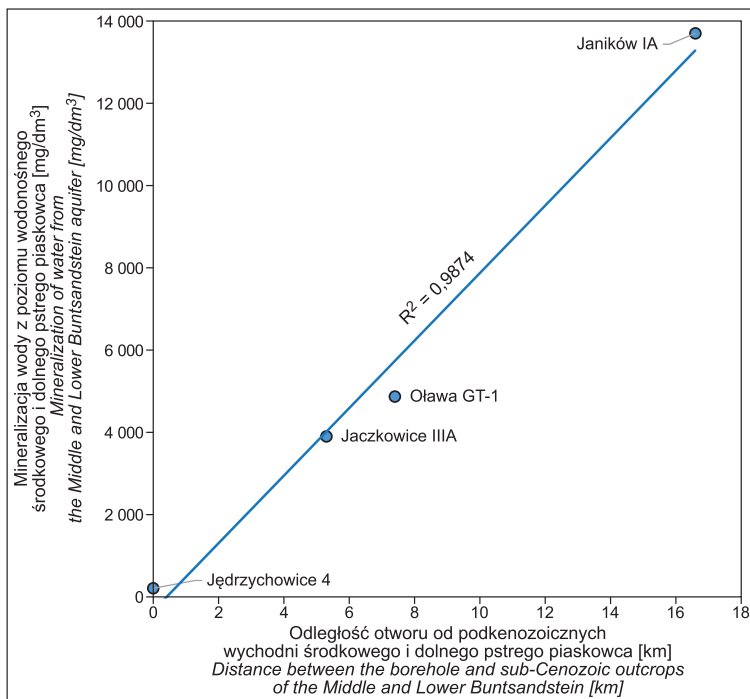
Na podstawie znanych wartości gradientu termicznego oraz przewodności cieplnej dla omawianej lokalizacji obliczono gęstość strumienia ciepłego $Q = 54,30$ mW/m². W odniesieniu do danych z wcześniejszych opracowań, uzyskana w otworze Oława GT-1 wartość jest niższa o ok.

11 mW/m² w porównaniu do omawianej lokalizacji w pracach Karwasieckiej i Bruszevskiej (1997) oraz Bruszevskiej (2000) i niższa o 17–32 mW/m² w zestawieniu lokalizacji odwiertu z pracami o charakterze ogólnopolskim, zależnie od zastosowanej metodyki w cytowanej pracy (Nawrocki, Becker, 2020b). W pracy Karwasieckiej i Bruszevskiej (1997) mapę strumienia ciepłego dla Dolnego Śląska wykonano na podstawie danych z 51 otworów wiertniczych.

Różnice wartości parametrów geotermalnych obliczonych dla odwiertu Oława GT-1 i wartości z ww. opracowania regionalnego wynikają przede wszystkim z niewielkiego i nierównomiernego stopnia rozpoznania omawianego obszaru przed wykonaniem badań w otworze Oława GT-1 (Bruszevska, 2000). W rejonie odwiertu Oława GT-1 spośród wspomnianych wcześniej otworów najbliższą znajdują się: Janików IA (7,7 km na ENE), Laskowice Oławskie 1



Ryc. 8. Diagram Pipera dla próbek wód pobranych z poziomu wodonośnego pstręgo piaskowca środkowego i dolnego ujętego w otworze Oława GT-1
Fig. 8. Piper diagram for water samples taken from the Middle and Lower Buntsandstein aquifer tapped in the Oława GT-1 borehole



Ryc. 9. Zależność mineralizacji wód poziomu wodonośnego pstręgo piaskowca środkowego i dolnego i odległości od podkenozoicznych wychodni tego poziomu wodonośnego
Fig. 9. Relationship between the mineralization of the water of the Middle and Lower Buntsandstein aquifer and the distance from the sub-Cenozoic outcrops of this aquifer

(14,8 km na NNE) i Kotowice W-5 (11,1 km na NNW) – ryc. 1. Pozostałe otwory analizowane w opracowaniu Bruszeńskiej (2000) są położone w odległości ponad 20 km od wykonanego otworu (tab. 3). Szczególnie brak jest głębokich odwiertów z badaniami temperatury w kierunku

S i SW, spośród których najbliższy jest zlokalizowany w odległości 48,5 km na S (poza analizowanym obszarem).

Uzyskana wartość strumienia ciepłego Ziemi Q w otworze Oława GT-1 jest iloczynem gradientu temperatury oraz przewodności cieplnej λ – zgodnie z wzorem [1]. Autorzy przyjmują, że obliczona wartość gradientu temperatury jest w pełni wiarygodna – parametr wyznaczono na podstawie danych wysokiej jakości, pochodzących z pomiarów zrealizowanych po 47-dniowej stójce, przy zalecanym minimum 10–12 dni (Szewczyk, 2001). Druga z wymienionych cech, która ma równie istotny wpływ na szacowaną wartość Q , została wyznaczona metodą pośrednią, na podstawie empirycznego modelu średniej geometrycznej, bazującego na wynikach interpretacji badań geofizycznych. Stosownie do założeń projektu robót geologicznych, w ramach wykonanych badań nie oznaczano bezpośrednio wartości λ przewierconych skał. Uśredniona wartość uzyskana na podstawie analizy danych geofizycznych dla otworu Oława GT-1 – $\lambda = 2,14 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, jest w znacznym stopniu zgodna z ogólnym obrazem przestrzennej zmienności tego parametru w rejonie badań ($\lambda \approx 2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) z wcześniejszego opracowania (Bruszeńska, 2000).

Badania hydrogeologiczne w podobnie wykształconym pod względem litologicznym poziomie wodonośnym pstręgo piaskowca środkowego i dolnego, o zbliżonej skali badań, prowadzono na terenie monokliny przedsudeckiej w rejonie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM; Pikuła, Becker, 2023; Pikuła i in., 2023). Zgodnie z przyjętą schematyzacją, wartość obliczonego współczynnika filtracji dla otworu Oława GT-1 charakteryzuje strefę o podwyższonych parametrach filtracyjnych, z której następuje większość dopływu wody do otworu, natomiast w cytowanych pracach Pikuły i Beckera (2023) oraz Pikuły i in. (2023) w obliczeniach przyjęto schemat zakładający dopływ z omawianych poziomów wodonośnych dla ich pełnego profilu. W związku z odmienną schematyzacją warunków hydrogeologicznych dla omawianych wyników oraz przytoczonych danych archiwalnych porównano parametr, którego obliczana wartość na podstawie próbnych pompowań jest niezależna od przyjętej miąższości warstwy wodonośnej – współczynnik przewodności $T \text{ m}^2/\text{s}$. W pracach Pikuły i Beckera (2023) oraz Pikuły i in. (2023), a także dla odwiertu Oława GT-1 uzyskano zbliżone wartości T . Dla próbnego pompowania hydrowęzłowego prowadzonego z wydajnością 60 oraz 80 m^3/h uzyskano średnią wartość T od $1,82 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ do $2,00 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Pikuła i in., 2023). Dla drugiego przypadku – analizy danych hydrogeologicznych z okresu odwadniania szybu R-XI z wydajnością 115,6 m^3/h – oszacowana wartość przewodności wyniosła od $1,70 \cdot 10^{-4}$ do $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Na podstawie badań wykonanych w otworze Oława GT-1 uzyskano wartość $T = 3,19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników badań wykonanych w otworze Oława GT-1 określono parametry geotermalne górotworu w lokalizacji omawianego odwiertu: temperatura górotworu, gradient termiczny, przewodność cieplna, gęstość strumienia ciepłego. W oparciu o uzyskane wyniki dokonano weryfikacji wymienionych wielkości, które w lokalizacji wiercenia były dotychczas przyjmowane na podstawie interpretacji badań wykonanych w sąsiednich, niekiedy odległych otworach archiwalnych (Bruszevska, 2000; Nawrocki, Becker, 2020b). W porównaniu do opracowań archiwalnych uzyskano zbliżone wartości przewodności cieplnej przewierconych i wyraźnie niższe wartości gradientu geotermicznego oraz gęstości strumienia ciepłego Ziemi.

Ujęty poziom wodonośny wyodrębniony w stropowych partiach profilu pstręgo piaskowca dolnego i środkowego wykazuje podobne parametry filtracyjne również na obszarach oddalonych ok. 100 km na północny zachód od analizowanej lokalizacji, w rejonie LGOM.

W odwiercie Oława GT-1 udokumentowano zasoby eksploatacyjne wód termalnych i leczniczych $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ przy depresji $s = 91,10 \text{ m}$, o temperaturze wody na wypływie 29°C (Pikuła i in., 2024).

Inwestor zakłada wykorzystywanie ujętych wód do celów energetycznych za pomocą ciepłowni geotermalnej opartej na sprężarkowych pompach ciepła. Ze względu na mineralizację wody wynoszącą $4\ 868 \text{ mg/l}$, potencjalna eksploatacja wód termalnych z tego złoża może się odbywać w systemie dwuotworowym lub wielootworowym, z wykorzystaniem istniejącego otworu Oława GT-1 i jednego lub kilku otworów chłonnych (Noga, 2023a, b).

Autorzy pragną wyrazić wdzięczność władzom i pracownikom Urzędu Miejskiego w Oławie oraz władzom i pracownikom należącego do miasta Oława Miejskiego Zakładu Energetyki Ciepłej Oława Sp. z o.o. za efektywną współpracę podczas realizacji prac geologicznych oraz umożliwienie opracowania niniejszego artykułu. Składamy podziękowania recenzentowi artykułu, prof. dr. hab. Jerzemu Nawrockiemu za cenne uwagi, które wpłynęły na końcową formę prezentowanej pracy.

LITERATURA

AGARWAL R.G. 1980 – A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and other test data. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro. ALEKSANDROWSKI P., CHUDZIK L., DĄBROWSKI M., FIGUŁA J., GŁUSZYŃSKI A., JASIŃSKIE Ł., KLONOWSKI M., KRAWCZYK J., NASIŁOWSKI R., OLKOWICZ M., OSTROWSKI S., ROSOWIECKA O., SADA M., SMAJDOR Ł., TRZECIAK M. 2020 – Młode strefy tektoniczne a warunki geotermalne w Sudetach w świetle badań geochronologicznych, strukturalnych i termometrycznych – etap II (raport końcowy). Centralne Archiwum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa, nr inw. 9548/2021. BACHMANN G.H., KOZUR H.W. 2004 – The Germanic Triassic: correlations with the international chronostratigraphic scale, numerical ages and Milankovitch cyclicity. *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*, 26: 17–62. BADURA J., CISZEK D. 2021 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Wrocław (764). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa. BANKS D. 2012 – An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling. John Wiley & Sons. BAUDZIS A., KULIG A. 2023 – Opracowanie wyników pomiarów geofizycznych interpretacja litologiczno-złożowa otwór: Oława GT-1 interwał: 725,0–1130,0 m. [W:] Pikuła M., Kapuściarek M., Kaczorek K., Wróbel T., Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód leczniczych i termalnych Oława GT-1, miejscowość Oława, gm. Oława, pow. oławski, woj. dolnośląskie. Centralne Archi-

wum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa, nr inw. 12335/2024. BECKER A. 2015 – Ambiguities in conchostracan biostratigraphy: a case study of the Permian-Triassic boundary. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 85. BECKER R., MARKIEWICZ A., KALISZ M., KRZYWAŃSKI Z., SZUMILAS S., WŁOCH A. 2006 – Charakter kontaktów między poziomami wodonośnymi w obszarze miedzionośnym południowej części monokliny przedsudeckiej w aspekcie oceny zagrożeń wodnych kopalń KGHM Polska Miedź S.A. [W:] X Warsztaty Górnicze „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, Tomaszowice k. Krakowa, 12–14 czerwca 2006: 43–56. BIELECKA H. 1997a – Mapa Hydrogeologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Oława (802). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa. BIELECKA H. 1997b – Objasnienia do Mapy Hydrogeologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Oława (802). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa. BODEN D.R. 2016 – Geologic fundamentals of geothermal energy. CRC Press. BRIGAUD F., VASSEUR G. 1989 – Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks. *Geophysical Journal International*, 98 (3): 525–542. BRUSZEWSKA B. 2000 – Warunki geotermiczne Dolnego Śląska. *Przegląd Geologiczny*, 48 (7): 639–643. CHMURA K. 1968 – Przewodność cieplna skał i węgla górnośląskiego karbonu. *Gliwice: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo*, 190. CHOWDHURY M.S., TANJIL H.A., AKTER S., AMIN M.A., PAL S.K. 2019 – Production Logging and its Implementation: A Technical Review. *International Journal of Petroleum and Petrochemical Engineering*, 5 (2): 42–51. CWOJDZIŃSKA-RUZIEWICZ K. 1987 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Laskowice Oławskie (765). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa. CWOJDZIŃSKA-RUZIEWICZ K. 1990 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Laskowice Oławskie (765). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa. CWOJDZIŃSKI S., ŻELAŻNIEWICZ A. 1995 – Podłoże krystaliczne Bloku Przedsudeckiego. [W:] Przewodnik 66. Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego, 21–24.11.1995 r., Wrocław: 11–28. CYMERMAN Z. 2010 – Mapa tektoniczna Sudetów i bloku przedsudeckiego. Tectonic map of the Sudetes and the Fore-Sudetic Block 1 : 200 000, 2nd edition, modified. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa. DOWNOROWICZ S. 1983 – Geotermika złoża rud miedzi monokliny przedsudeckiej. *Prace Instytutu Geologicznego*, 106: 1–88. FRYZIAK T. 2023 – Orzeczenie geofizyczne z otworu Oława GT-1. [W:] Pikuła M., Kapuściarek M., Kaczorek K., Wróbel T., Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód leczniczych i termalnych Oława GT-1, miejscowość Oława, gm. Oława, pow. oławski, woj. dolnośląskie. Centralne Archiwum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa, nr inw. 12335/2024. FUCHS S., BALLING N., FÖRSTER A. 2015 – Calculation of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of sedimentary rocks using petrophysical well logs. *Geophysical Journal International*, 203 (3): 1977–2000. FUCHS S., SCHÜTZ F., FÖRSTER H.-J., FÖRSTER A. 2013 – Evaluation of common mixing models for calculating bulk thermal conductivity of sedimentary rocks: Correction charts and new conversion equations. *Geothermics*, 47: 40–52. GÓRECKI W. (red.) 2006 – Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Polskim – formacje mezozoiku. Ministerstwo Środowiska, ZSE AGH, Kraków. HEAD K.H., EPPS R.J. 2011 – Manual of Soil Laboratory Testing – Volume II: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Whittles Publishing. <https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Geotermia> <https://otworywiertnicze.pgi.gov.pl> <https://spd.pgi.gov.pl/map> JUROSZEK C., KLAPCZYŃSKI J. 2002 – Skały metamorficzne w otworze Jaczkowice IIIA (okolice Oławy, metamorfik środkowej Odry). *Prace geologiczno-mineralogiczne*, 72. KAPPELMAYER O. 1979 – Implications of heat flow studies for geothermal energy prospects. [W:] *Terrestrial Heat Flow in Europe*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 126–135. KAPUŚCZYŃSKI J., NAGY S., DŁUGOSZ P., BIERNAT H., BENTKOWSKI A., ZAWISZA L., MACUDA J., BUJAKOWSKA K. 1997 – Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód termalnych i energii geotermalnej oraz sposoby odprowadzania wód zużytych. *Poradnik metodyczny*. Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, Warszawa. KARNKOWSKI H. 2008 – Regionalizacja tektoniczna Polski – Niż Polski. *Przegląd Geologiczny* 56 (10): 895–903. KARWASIECKA M., BRUSZEWSKA B. 1997 – Gęstość powierzchniowego strumienia ciepłego Ziemi na obszarze Polski. Centralne Archi-

- wum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa, nr inw. 21/98.
- KĘDZIERSKI M., UCHMAN A. 2018 – Sesja terenowa D: epikratoniczne osady kredy opolskiej: przykład basenu sedimentacyjnego w warunkach klimatu supercieplarnianego. [W:] Polska Konferencja Sedymologiczna POKOS 7, Góra św. Anny, 4–7 czerwca 2018 r. Materiały konferencyjne, 51–59. Polskie Towarzystwo Geologiczne.
- KIENĆ D., KUZYŃKÓW H. 2000a – Mapa Hydrogeologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Domaniów (801). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- KIENĆ D., KUZYŃKÓW H. 2000b – Objasnienia do Mapy Hydrogeologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Domaniów (801). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- KIERSNOWSKI H. 1983 – Rozwój sedimentacji utworów klastycznych późnego paleozoiku w okolicach Brzegu. *Przegląd Geologiczny* 31 (8/9): 475–479.
- KIERSNOWSKI H. 1995 – Geneza i rozwój późnopaleozoicznego wschodniego basenu przedsudeckiego. [W:] Cwojdziniński S. i in. (red.), *Geologia i Ochrona Środowiska Bloku Przedsudeckiego*. Materiały sesji LXVI Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego, Wrocław 21–24.09.1995 r. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, wyd. spec., 19–35.
- KŁAPCZIŃSKI J. 1983 – Perspektywy uzyskania wód podziemnych między Wrocławiem a Brzegiem dla miasta Wrocławia. *Mat. II Symp. Współczesne problemy hydrogeologii regionalnej*. Wydawnictwa Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław: 390–403.
- KŁAPCZIŃSKI J. 1993 – Litostratygrafia profili głębokich otworów wiertniczych Wrocławia i obszarów przyległych. *Acta Universitatis Wratislaviensis, Prace Geologiczno-Mineralogiczne*, 41. Wydawnictwa Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- KŁAPCZIŃSKI J. 1959 – Trias na północny-wschód od wału przedsudeckiego. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 28: 361–399.
- KOSTRZ J., MITKA J., SYPEK C. 2009 – Nowe metody wykonywania badań hydrogeologicznych w otworach badawczych. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 5: 78–80.
- KRAWCZYK J., JAROSZ M., PAWELEC K., MANIECKA A., ZIMNY J., BIELIK S., SZCZOTKA K., SZYMICZEK J., STRUŚ M. 2018 – Projekt robót geologicznych na wykonanie otworu badawczo-eksploatacyjnego Oława GT-1 dla ujęcia wód geotermalnych w Oławie dla celów energetycznych. *Przedsiębiorstwo Geologiczne S. A. w Krakowie, Polska Geotermalna Asocjacja im. Prof. J. Sokołowskiego* (niepublikowane).
- KRAWCZYK J., MANIECKA A., ZIMNY J., BIELIK S., SZCZOTKA K., SZYMICZEK J. 2021 – Dodatek do projektu robót geologicznych na wykonanie otworu badawczo-eksploatacyjnego Oława GT-1 dla ujęcia wód geotermalnych w Oławie dla celów energetycznych. *Przedsiębiorstwo Geologiczne S.A. w Krakowie* (niepublikowane).
- MATUSZCZAK B., MARZEC D. 2023 – Opracowanie badań geofizyki wiertniczej otwór: Oława GT-1. [W:] Piķuła M., Kapuściarek M., Kaczorek K., Wróbel T., *Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód leczniczych i termalnych Oława GT-1, miejscowość Oława, gm. Oława, pow. oławski, woj. dolnośląskie*. Centralne Archiwum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa, nr inw. 12335/2024.
- MICHALSKA E. 1992 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Oława (802). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- MICHALSKA E. 2003 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Oława (802). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- MIZERSKI W. 2014 – *Geologia Polski*. Wydaw. Nauk. PWN, Warszawa.
- NARKIEWICZ M., BECKER A., JASIONOWSKI M. (red.) 2023 – *Katalog basenów sedimentacyjnych Polski*. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego, 207.
- NAWROCKI J. 2004 – The Permian-Triassic boundary in the Central European Basin: magnetostratigraphic constraints. *Terra Nova*, 16 (3): 139–145.
- NAWROCKI J., BECKER A. 2020a – Buntsandstein magnetostratigraphy in Poland: new data from the Brześć Kujawski IG-1 borehole. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 90: 435–446.
- NAWROCKI J., BECKER A. (red.) 2020b – *Geological atlas of Poland*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- NOGA B. 2023a – Aspekty techniczne, geologiczne i formalno-prawne pozyskiwania wód termalnych. *Instal*, 2: 20–26.
- NOGA B. 2023b – Przegląd konstrukcji dubletów geotermalnych wykonanych na terenie Polski. *Instal*, 12: 4–8.
- OBERC J. 1974 – *Zarys tektoniki Opolszczyzny*. [W:] *Przewodnik XLVI Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, Opole: 55–68.
- PACZYŃSKI B., SADURSKI A. (red.) 2007 – *Hydrogeologia regionalna Polski, t. II, Wody mineralne, lecznicze, i termalne oraz kopalniane*. Charakterystyka hydrogeologiczna regionów wodnych. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- PIKUŁA M., BECKER R. 2023 – Interpretacja pomiarów wykonywanych w piezometrach sieci monitoringowej zakładu górniczego w celu określania parametrów filtracyjnych poziomu wodonośnego na podstawie danych z okresu odwadniania szybu R-XI KGHM Polska Miedź SA. *Przegląd Geologiczny*, 71 (10): 503–512.
- PIKUŁA M., KAPUŚCIAREK M., KACZOREK K., WRÓBEL T. 2024 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód leczniczych i termalnych Oława GT-1, miejscowość Oława, gm. Oława, pow. oławski, woj. dolnośląskie. KGHM CUPRUM Sp. z o.o. CBR Wrocław. Centralne Archiwum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa, nr inw. 12335/2024.
- PIKUŁA M., CHUDY K., WORSZA-KOZAK M., CZOPM. 2023 – Scale effect on hydraulic properties of pore-fissure deep rock formations and its importance for the mining shaft-sinking process. *Energies*, 16 (5), 2263.
- PLEWA M., PLEWA S. 1992 – *Petrofizyka*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- PLEWA S. 1994 – *Rozkład parametrów geotermalnych na obszarze Polski*. Wydaw. Centrum Podstawowych Problemów Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- RÖHRICH T. 2008 – *AquiferTest v.4.2 User's Manual*. Schlumberger Water Services.
- RZYŃSKI G., KOZDRÓJ W., SZLASA M. (red.) 2023 – *Instrukcja wykonywania map potencjału i uwarunkowań środowiskowych geotermii niskotemperaturowej*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- SCHOLZE F., WANG X., KIRSCHER U., KRAFT J., SCHNEIDER J.W., GÖTZ A.E., JOACHIMSKI M.M., BACHTADSED V. 2017 – A multi-stratigraphic approach to pinpoint the Permian-Triassic boundary in continental deposits: the Zechstein-Lower Buntsandstein transition in Germany. *Global and Planetary Change*, 152: 129–151.
- SOKOŁOWSKI J. 1967 – Charakterystyka geologiczna i strukturalna obszaru przedsudeckiego. *Geologia Sudetica*, 3 (1): 297–367.
- SZEWCYK J. 2001 – Estymacja gęstości strumienia ciepłego metodą modelowań właściwości termicznych ośrodka. *Przegląd Geologiczny*, 49 (11): 1083–1088.
- THEIS C.V. 1935 – The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *EOS, Trans American Geophysical Union*, 16 (2): 519–524.
- USTAWA, 2005 – Ustawa z dnia 28 lipca 2005 r. o lecznictwie uzdrowiskowym, uzdrowiskach i obszarach ochrony uzdrowiskowej oraz o gminach uzdrowiskowych. *Dz.U. z 2025 r. poz. 1135*.
- USTAWA, 2011 – Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. – Prawo geologiczne i górnicze. *Dz.U. z 2024 r. poz. 1290*.
- WINNICKA G. 2009 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Domaniów (801). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- WINNICKA G., BADURA J., CISZEK D. 2013 – *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Wrocław (764)*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- WINNICKA G. 2008 – *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Domaniów (801)*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- WOJCIECHOWSKA R. 1997a – *Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Laskowice Oławskie (765)*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- WOJCIECHOWSKA R. 1997b – *Objasnienia do Mapy Hydrogeologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Laskowice Oławskie (765)*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- WOODSIDE W.M.J.H., MESSMER J.H. 1961a – Thermal conductivity of porous media. I. Unconsolidated sands. *Journal of Applied Physics*, 32 (9): 1688–1699.
- WOODSIDE W.M.J.H., MESSMER J.H. 1961b – Thermal conductivity of porous media. II. Unconsolidated sands. *Journal of Applied Physics*, 32 (9): 1698–1706.
- ŻELAZNIEWICZ A., ALEKSANDROWSKI P., BUŁA Z., KARKOWSKI P.H., KONON A., ŚLACZKA A., ŻABA J., ŻYTKO K. 2011 – *Regionalizacja tektoniczna Polski*. Komitet Nauk Geologicznych PAN.
- ŻUK U. 2000a – *Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Wrocław (764)*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- ŻUK U. 2000b – *Objasnienia do Mapy Hydrogeologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Wrocław (764)*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 4.08.2025 r.
Akceptowano do druku 22.09.2025 r.