

Michał STEFANIUK¹, Cezary OSTROWSKI², Marek SADA², Adam CYGAL¹

ZASTOSOWANIE BADAŃ GEOFIZYCZNYCH DO ROZPOZNAWANIA WARUNKÓW GEOLOGICZNYCH OTOCZENIA ŻŁOŻA HYDROGEOTERMALNEGO W MASYWIE KRYSZALICZNYM W REJONIE ŁĄDKA-ZDROJU

STRESZCZENIE

Rejon Łądką Zdroju jest od kilkuset lat znany z występowania i wykorzystywania ciepłych źródeł. Źłoże wód geotermalnych występuje tutaj w specyficznych warunkach geologicznych charakterystycznych dla obszaru sudeckiego. Ma ono charakter szczelinowy i występuje w warunkach naporowych. Rozwój Uzdrowiska spowodował potrzebę lepszego rozpoznania złoża hydrogeotermalnego i jego geologicznego otoczenia. W ramach zrealizowanego programu badań wykonane zostały również badania geofizyczne zorientowane na rozpoznanie ogólnych warunków geologicznych złoża i jego otoczenia. Zastosowane zostały metody: magnetyczna, grawimetryczna i geotermiczna, profilowania VLF, sondowania i profilowania elektrooporowe oraz ciągłe profilowania magnetotelluryczne. W ramach prezentowanej pracy wykonany został przegląd wcześniejszych badań geofizycznych oraz wykonano reinterpretację danych magnetotellurycznych z włączeniem interpretacji danych grawimetrycznych. Reinterpretacja obejmowała przegląd prac pomiarowych, weryfikację procedur i wyników przetwarzania danych pomiarowych oraz została zweryfikowana i rozszerzona interpretacja krzywych sondowań w tym inwersyjne modelowania dwuwymiarowe. Badania te pozwoliły na wyinterpretowanie stref uskokowych, wykrycie anomalii temperaturowych i w bardzo ograniczonym stopniu rozpoznanie przestrzenne szczelinowych poziomów wodonośnych.

SŁOWA KLUCZOWE

Geotermia, Sudety, Łądek Zdrój, badania geofizyczne, magnetotelluryka, masyw krystaliczny

* * *

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

² Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych sp. z o.o., ul. Jagiellońska 76, 03-301 Warszawa.

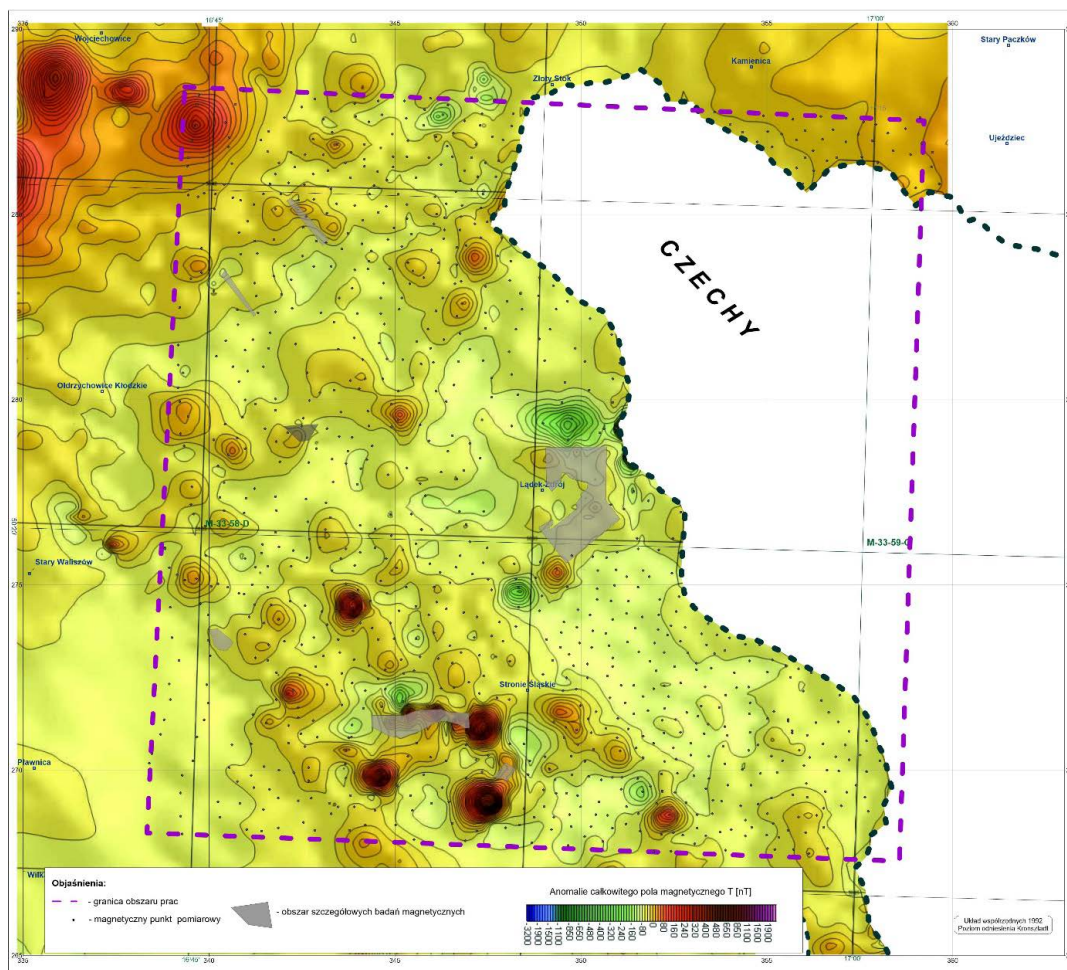
WPROWADZENIE

Złoże wód geotermalnych w rejonie Łądka-Zdroju występuje w specyficznych warunkach geologicznych, charakterystycznych dla obszaru sudeckiego, natomiast zasadniczo różnych od spotykanych w pozostałych regionach Polski. Ma ono charakter szczelinowy i wypełnia zeszcelinowane utwory krystaliczne tzw. metamorfiku (krystaliniku) Łądka-Śnieżnika. Wspomniane wody występują głównie w utworach mezometamorficznej i polimetamorficznej formacji strońskiej, zbudowanej z łupków łyszczykowych z wkładkami marmurów i paragnejsów. Po części złoże obejmuje również infrakrustalną (prawdopodobnie katametamorficzną i częściowo ultrametamorficzną) formację gieraltowską, zbudowaną w tym rejonie głównie z gnejsów. Ujęte i eksploatowane horyzonty wodonośne mają charakter naporowy, co powoduje, że dotychczasowa eksploatacja zarówno źródeł powierzchniowych, jak też jednego otworu wiertniczego (o głębokości ok. 700 m p.p.t.) ma charakter samowypływów. Rejon Łądka-Zdroju jest od kilkuset lat znany z występowania i wykorzystywania źródeł wód termalnych. Stopniowy rozwój Uzdrowiska spowodował rosnące zainteresowanie złożem geotermalnym, w szczególności zwiększeniem wydajności ujęć. W ramach szerokiego zakresu badań geologicznych, hydrogeologicznych, geochemicznych, izotopowych, radiometrycznych itp. wykonane zostały również badania geofizyczne zorientowane na rozpoznanie ogólnych warunków geologicznych złoża i jego otoczenia. Zastosowane zostały metody: magnetyczna, grawimetryczna i geotermiczna, profilowania VLF, sondowania i profilowania elektrooporowe oraz ciągle profilowania magnetotelluryczne. W ramach międzynarodowego projektu pt. „Energia geotermalna: podstawa niskoemisyjnego ciepłownictwa, poprawy warunków życia i zrównoważonego rozwoju – wstępne studia dla wybranych obszarów w Polsce” wykonano szczegółową reinterpretację danych magnetotellurycznych z włączeniem interpretacji danych grawimetrycznych. W ramach prac reinterpretacyjnych wykonany został przegląd prac pomiarowych, weryfikacja procedur i wyników przetwarzania danych pomiarowych oraz została zweryfikowana i rozszerzona interpretacja krzywych sondowań. Wykonano ponadto wielowariantowe inwersyjne modelowanie dwuwymiarowe. Badania powyższe pozwoliły na wyinterpretowanie stref uskoko- wych, wykrycie anomalii temperaturowych i w bardzo ograniczonym stopniu rozpoznanie przestrzenne szczelinowych poziomów wodonośnych.

1. PRZEGLĄD BADAŃ GEOFIZYCZNYCH WYKONANYCH W REJONIE ŁĄDKA ZDROJU

Do podstawowych badań geofizycznych wykonanych w rejonie Łądka Zdroju należy zaliczyć badania z wykorzystaniem pól potencjałowych, czyli magnetometrii i grawimetrii. Pomijając prace o znaczeniu historycznym, pierwsze badania magnetometryczne ΔT o charakterze półszczegółowym i częściowo szczegółowym, wykonane zostały pod koniec lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Zostały one przedstawione łącznie z podsumowaniem

prac wcześniejszych, w dokumentacji zbiorczej (Jagodzińska i in. 1969). Wyniki badań magnetycznych posłużyły do rozpoznania tektoniki obszaru. Potwierdziły występowanie i przebieg znanych wcześniej uskoków oraz zasugerowały istnienie dyslokacji wcześniej nieznanych. Badania powyższe zostały uzupełnione i ponownie przetworzone w latach 2005–2007 w ramach półszczegółowych badań magnetometrycznych obszaru sudeckiego (Kosobudzka i Wrzeszcz 2007, rys. 1).

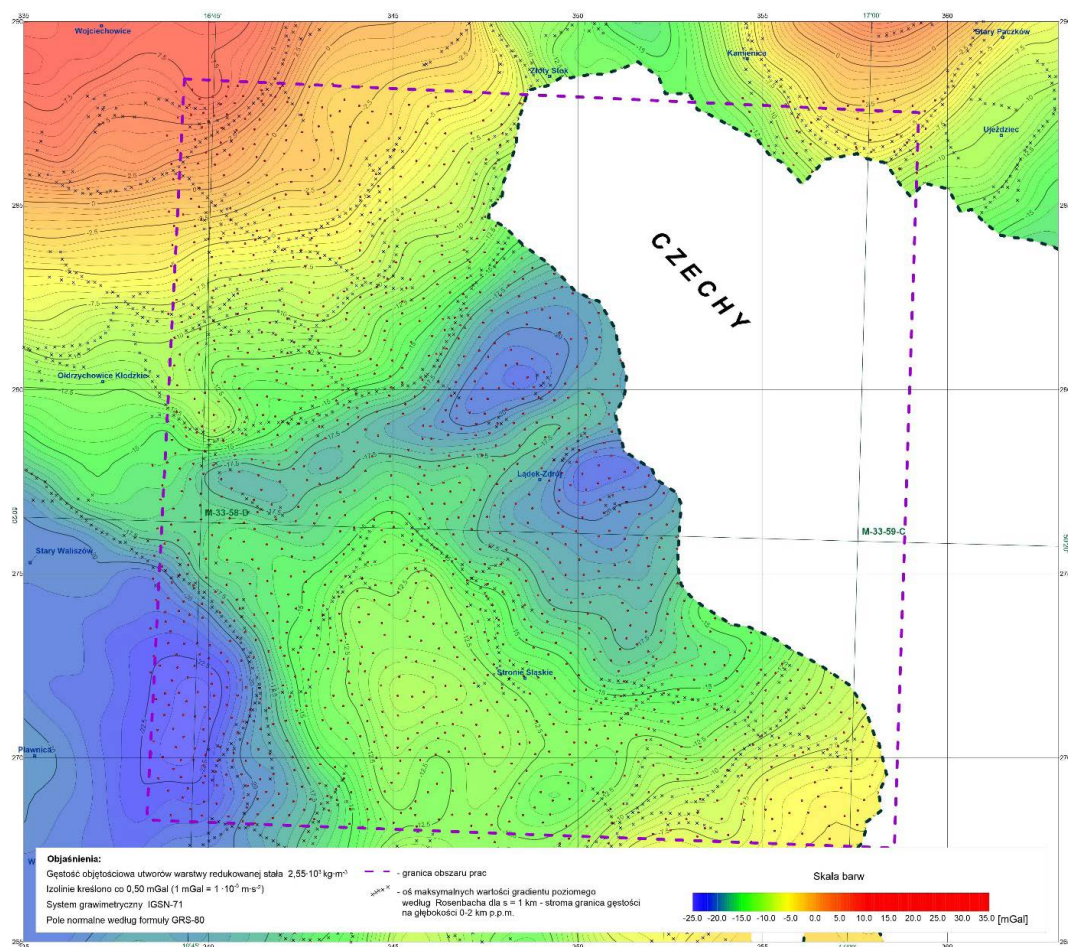


Rys. 1. Mapa anomalii całkowitego pola magnetycznego T dla rejonu Lądek Zdrój (opracowane na podstawie danych wg Kosobudzka i Wrzeszcz 2007)

Fig. 1. The map of total magnetic field anomalies T for Lądek Zdrój area (prepared based on measurement data according to Kosobudzka and Wrzeszcz 2007)

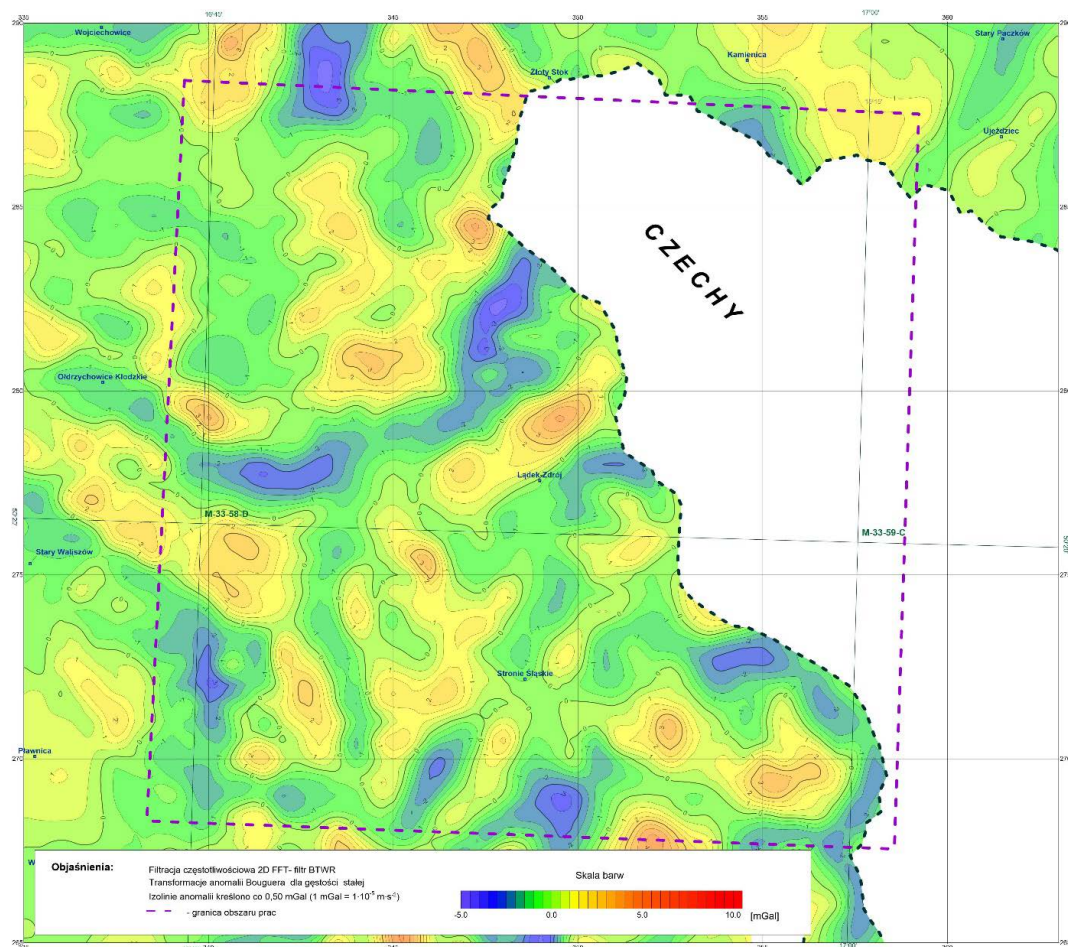
Badania grawimetryczne wykonane w rejonie sudeckim miały charakter regionalny lub półszczegółowy. Pierwsze tego typu prace, pomijając badania o znaczeniu historycznym,

wykonane zostały w roku 1966 (Okulus 1968). Kolejne prace pomiarowe wykonano w latach 1971 i 1973 (Cieśla i Margul 1972; Okulus i in. 1974). Niewielkie zagęszczenie prac pomiarowych nie pozwala na wykorzystanie tych danych do szczegółowych analiz złożowych. W sensie ogólnym dostrzegalna jest zbieżność rozkładu anomalii pola siły ciężkości z mapami wychodni jednostek geologicznych, różniących się wykształceniem litologicznym, a tym samym gęstościami skał (rys. 2). Bardziej wyraziście powyższa zależność widoczna jest na mapie anomalii rezydualnych odniesionych do poziomu 0–1 km p.p.t. (rys. 3).



Rys. 2. Mapa anomalii pola siły ciężkości w redukcji Bouguera w rejonie Lądka-Zdroju (opracowane na podstawie danych zawartych w dokumentacjach pomiarowych)

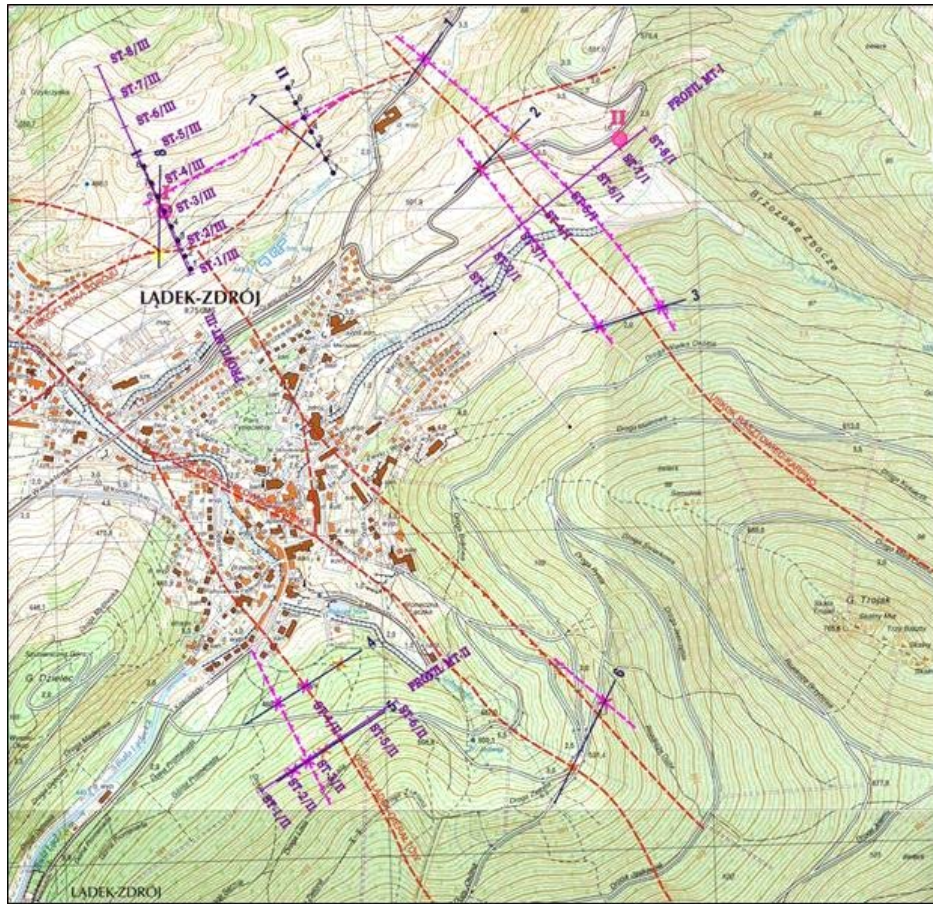
Fig. 2. The map of Bouguer's anomalies of the gravity field in the Lądek-Zdrój area (prepared based on data included in measurement reports)





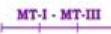





Rys. 3. Mapa anomalii rezydualnych pola siły ciężkości w rejonie Lądka-Zdroju (odniesionych do zakresu głębokości 0–1 km p.p.t.)

Fig. 3. The map of residual anomalies of the gravity field in the Lądek-Zdrój area (related to the depth range 0–1 km b.t.l.)

Przedmiotem szczególnej uwagi w niniejszej pracy są badania geoelektryczne wykonane w rejonie Lądka-Zdroju. Pierwsze takie badania w postaci ciągów sondowań elektrooporowych (SGE – sondowania geoelektryczne elektrooporowe), stanowiące uzupełnienie półszeregów badań magnetycznych, wykonane zostały pod koniec lat sześćdziesiątych i miały na celu rozpoznanie elementów tektoniki (Jagodzińska i in. 1969; Fistek i in. 1975). Kolejna seria sondowań elektrooporowych uzupełniona profilowaniem elektromagnetycznym VLF (ang. *Very Low Frequency*) wykonana została dopiero w 2005 r. po około trzydziestu latach (Farbisz 2005; rys. 4). Uzupełnieniem i konsekwencją wcześniejszych prac geoelektrycznych były badania z wykorzystaniem metody ciągłych profilowań magnetotelurycznych, wykonane w 2008 roku (Farbisz i Wojdyła 2008).



Objaśnienia:

-  - Profile radiofalowe VLF i sondowania geoelektryczne – elektrooporowe wykonane w 2005 r. w ramach wstępnego rozpoznania warunków występowania wód geotermalnych w rejonie Łądka Zdroju.
-  - Przekroje geoelektryczne opracowane na podstawie pomiarów SGE zamieszczone w sprawozdaniu z badań 2005r.
-  - Profile ze stanowiskami pomiarowymi CPMT wykonane w 2008 r. – linie głębokich przekrojów geoelektrycznych.
-  - Uskoki wg szkicu tektonicznego okolic Łądka – Zdroju J. Gierwelańca.
-  - Strefy anomalii zarejestrowane na profilach VLF z 2005 r. – I, II, i III rzędu.
-  - Przebiegi głównych uskokuów wg korelacji stref anomalii VLF.
-  - Uskoki o głębokich założeniach tektonicznych z oznaczeniem kierunku zapadania i strefa o charakterze nasunięcia związana z uskokiem Łądka – Zdroju wg interpretacji przekrojów magnetotellurycznych.
-  - Optymalne lokalizacje głębokich wierceń dla potrzeb ujęcia wód geotermalnych.

Rys. 4. Lokalizacja badań geoelektrycznych na tle mapy topograficznej, skala 1:50 000 (wg Farbisz i Wojdyła 2008, zmienione)

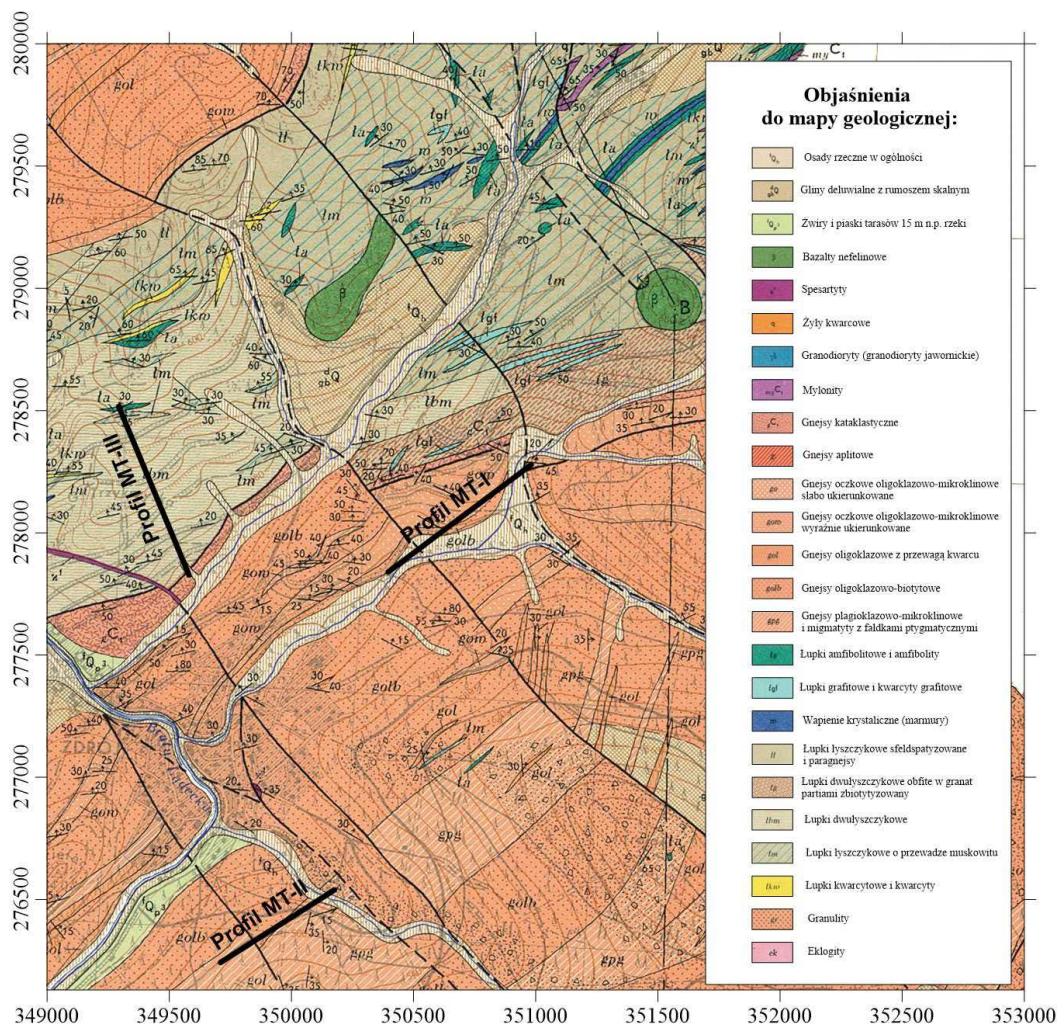
Fig. 4. Location of geoelectrical survey at the background of topographic map, scale 1:50 000 (according to Farbisz i Wojdyła 2008, changed)

Profilowania metodą VLF (radiofalową) wykorzystano do weryfikacji przebiegu i określenia charakteru stref tektonicznych rozważanych jako potencjalne drogi prowadzenia wód geotermalnych. Na podstawie tych prac zweryfikowano przebiegi i określono charakter głównych uskokiów przedstawianych na szkicach tektonicznych z tego rejonu (Gierwielaniec 1968). Stwierdzono, że wszystkie przebadane uskoki o kierunkach NW – SE, znalazły potwierdzenie w wynikach pomiarów przez zarejestrowanie wartości anomalnych (Farbisz 2005). Pomierzona została ponadto anomalia, którą można wiązać z uskokiem wcześniej nieznanym. Z punktu widzenia poszukiwania wód termalnych za najbardziej obiecujące uznane zostały uskoki Łądko – Gierałtowa i Rasztowca – Karpna (Łądko-Bielic, wg Cymermana 2004).

Badania z zastosowaniem metody sondowań elektrooporowych (SGE) wykorzystano dla rozpoznania perspektywicznych stref uskokiowych do głębokości rzędu 250–300 m p.p.t. Wykonanie badań z wykorzystaniem metody ciągłego profilowania magnetotellurycznego (CPMT) w roku 2008 było uzupełnieniem wcześniejszych prac geoelektrycznych o badania geofizyczne o większym zasięgu głębokościowym (do głębokości 2–3 km) (Farbisz i Wojdyła 2008). Wykonano prace wzdłuż trzech profili o sumarycznej długości 1,9 km zlokalizowanych poprzecznie do wybranych odcinków stref tektonicznych, w miejscach o dobrych warunkach pomiarowych.

Profile pomiarowe oznaczone zostały kolejno: MT-I o długości 0,7 km – w strefie uskoku (uskoków) Rasztowiec – Karpno, MT-II o długości 0,5 km – w strefie uskoku (uskoków) Łądek – Gierałtów oraz MT-III o długości 0,7 km – w strefie uskoku (nasunięcia) Łądko-Zdroju (rys. 4, 5). Akwizycja danych magnetotellurycznych wykonana została z zastosowaniem systemu 2000.net kanadyjskiej firmy Phoenix Geophysics Limited, w wariantcie wysokoczęstotliwościowym zwanym, od pasma rejestrowanego pola naturalnego, metodą audiomagnetotelluryczną (AMT, Goldstein, Strangway 1975, Stefaniuk i in. 2011, 2008). W celu eliminacji wpływu zakłóceń elektromagnetycznych pomiary wykonywane były dwupunktowo z tzw. zdalnym punktem odniesienia (punkt referencyjny), na którym zarejestrowane zostały składowe elektryczne i magnetyczne (rys. 6, Gamble i in. 1979).

Synchroniczne rejestracje na punktach polowym i referencyjnym dostarczyły danych wejściowych do przetwarzania. Wyniki badań przedstawione zostały w postaci pseudo2D przekrojów głębokościowych oporności opracowanych na podstawie inwersji 1D wg algorytmu Occama (Constable i in. 1987). Kontrasty opornościowe w warunkach geologicznych rejonu Łądko-Zdroju powiązane zostały ze zróżnicowaniem litologicznym serii skalnych, wysokooporowych gnejsów i nizejoporowych łupków metamorficznych oraz zjawiskami tektonicznymi. Typowym objawem zjawisk tektonicznych jest obniżenie wartości oporności elektrycznej związane z procesami spękania i wietrzenia skał, krążenia wód podziemnych (w tym geotermalnych) i często występowaniem mineralizacji rudnych (Stefaniuk i in. 2011, 2017). Wyeksponowane zostały odcinki o intensywnym zeszcelinowaniu stref uskokiowych powiązane z anomalnie obniżonymi wartościami oporności o wysokim prawdopodobieństwie występowania wód geotermalnych, szczególnie na większych głębokościach. Wyniki tych badań posłużyły do wyznaczenia dwóch lokalizacji głębokich wierceń dla potrzeb ujęcia wód geotermalnych (Farbisz i Wojdyła 2008; Ciężkowski i in. 2016).

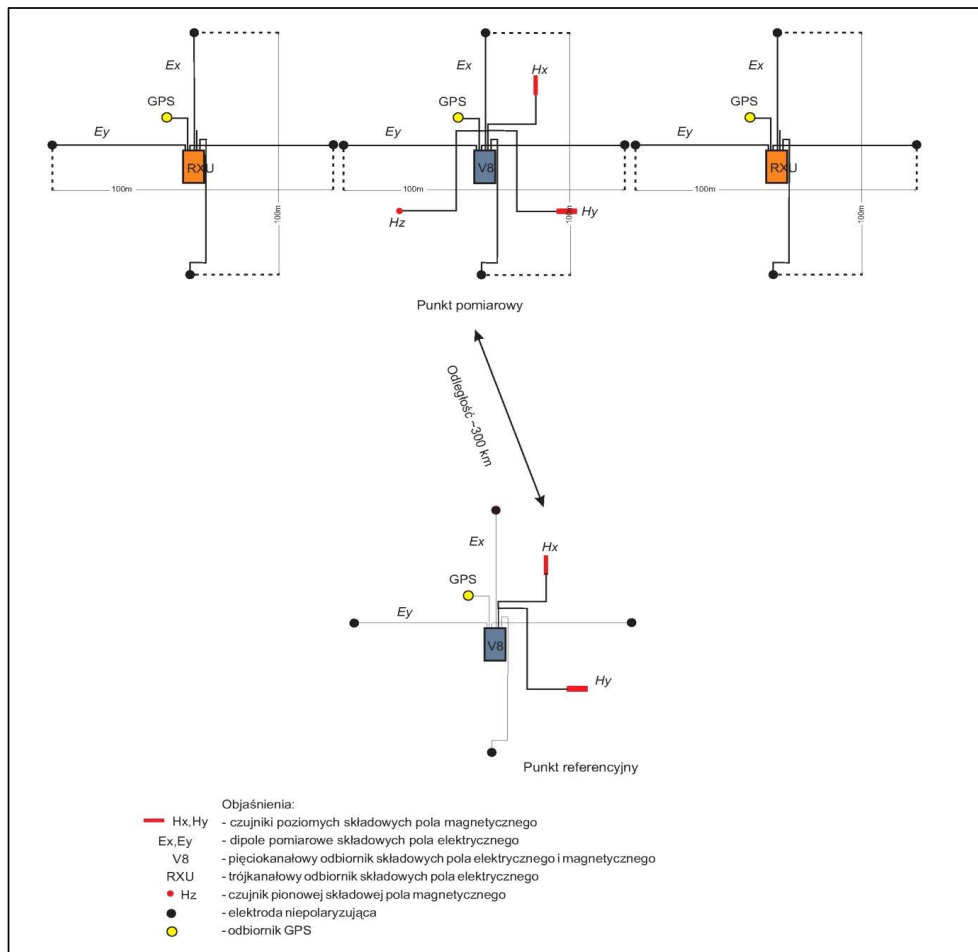


Rys. 5. Lokalizacja profili magnetotellurycznych w rejonie Lądka-Zdroju na tle mapy geologicznej Polski (skala 1: 25 000, Arkusz Lądek-Zdrój).

Fig. 5. Location of magnetotelluric profiles in the Lądek-Zdrój area against the background of Geological Map of Poland (scale 1: 25 000, Lądek-Zdrój sheet).

2. REINTERPRETACJA BADAŃ MAGNETOTELLURYCZNYCH

W ramach prac reinterpretacyjnych wykonany został przegląd prac pomiarowych, weryfikacja procedur i wyników przetwarzania danych pomiarowych oraz została zweryfikowana i rozszerzona interpretacja krzywych sondowań. Wcześniejszą jednowymiarową inwersję selektywnie dobranych pod względem orientacji układu pomiarowego krzywych sondowań rozszerzono o analizę zależności wyników inwersji 1D danych magnetotellurycznych od

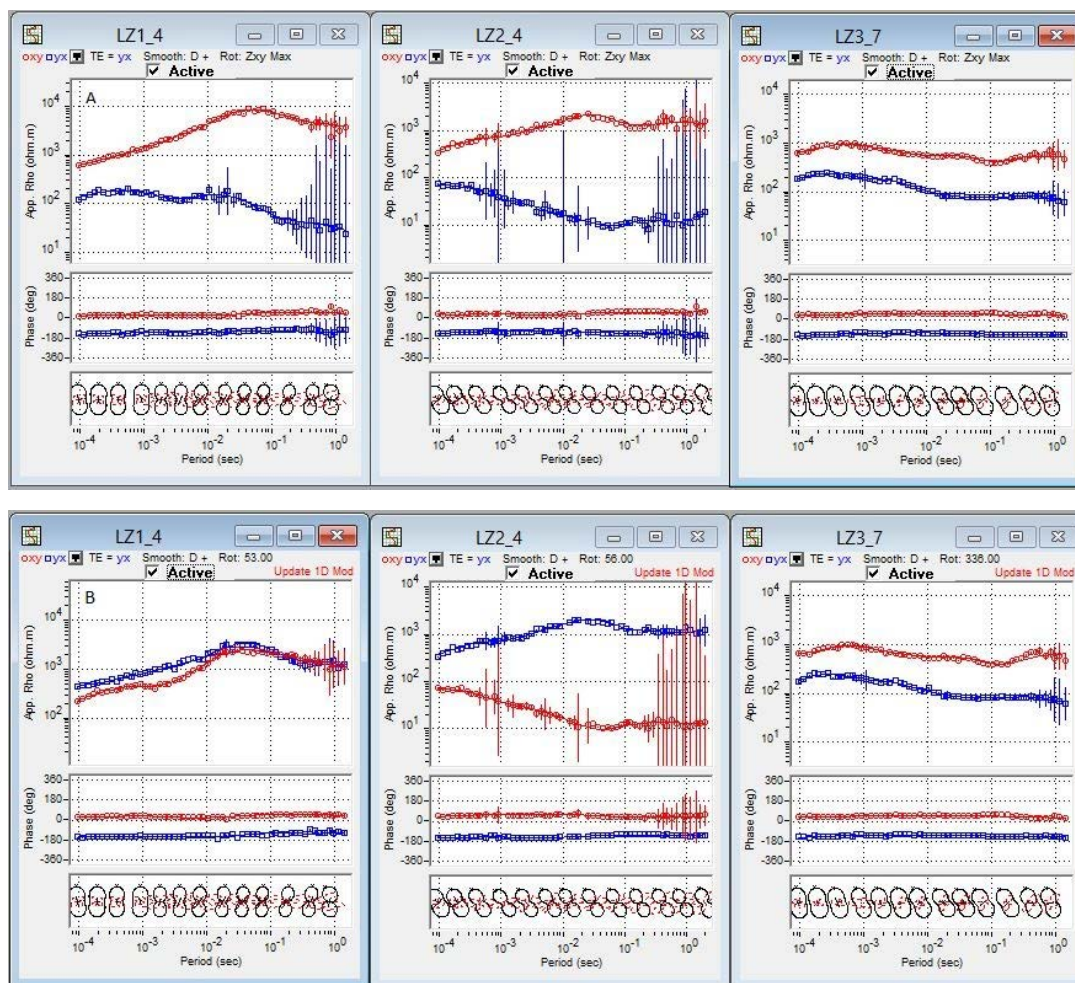


Rys. 6. Schemat układu pomiarowego AMT/MT w wersji profilowań ciągłych

Fig. 6. The outline of AMT/MT array for continuous profiling version

orientacji układu pomiarowego względem rozciągłości struktur geologicznych. Wykonano ponadto wielowariantowe inwersyjne modelowania dwuwymiarowe.

Zarejestrowane przebiegi czasowe były przedmiotem processingu numerycznego. Zarówno w przypadku processingu pierwotnego (w 2008 roku), jak też reprocessingu wykorzystane zostały procedury referencyjne typu *robust* zaimplementowane do oprogramowania SSMT2000 firmy Phoenix Geophysics Ltd. Robust processing to statystyczna, iteracyjna procedura obliczania składowych tensora impedancji i pozostałych parametrów magneto-tellurycznych oparta na metodzie najmniejszych kwadratów. Wynikiem przetwarzania danych jest estymacja składowych tensora impedancji, które posłużyły do obliczenia krzywych sondowań (amplitudowych i fazowych) a także wyznaczenia diagramów kierunkowych impedancji i parametrów skośności tensora impedancji (ang. *skew*, Simpson i Bahr 2005;



Rys. 7. Przykładowe krzywe sondowań magnetotellurycznych: A – dla rotacji układu pomiarowego do kierunku Zxy Max, B – dla orientacji pomiarowej układu współrzędnych

Fig. 7. Examples of magnetotelluric sounding curves: A – rotated to Z max, Z min directions, B – for measurement array orientation

Sims i in. 1971). Rysunek 7 przedstawia przykładowe krzywe magnetotelluryczne z różnych profili i dla różnej orientacji układu pomiarowego. Widoczne rozbieżności w kształcie krzywych pomiarowych jak i różny przebieg krzywych o orientacji „xy” względem „yx”, świadczy o dużym skomplikowaniu budowy geologicznej w rejonie badań. Jest to z punktu widzenia geoelektrycznego ośrodek dwu- i trójwymiarowy. Taki wniosek potwierdza układ diagramów kierunkowych impedancji widocznych w dolnych częściach rysunków.

Krzywe sondowań i diagramy kierunkowe impedancji były przedmiotem reinterpretacji z wykorzystaniem procedur interpretacyjnych zawartych w oprogramowaniu WinGLink fir-

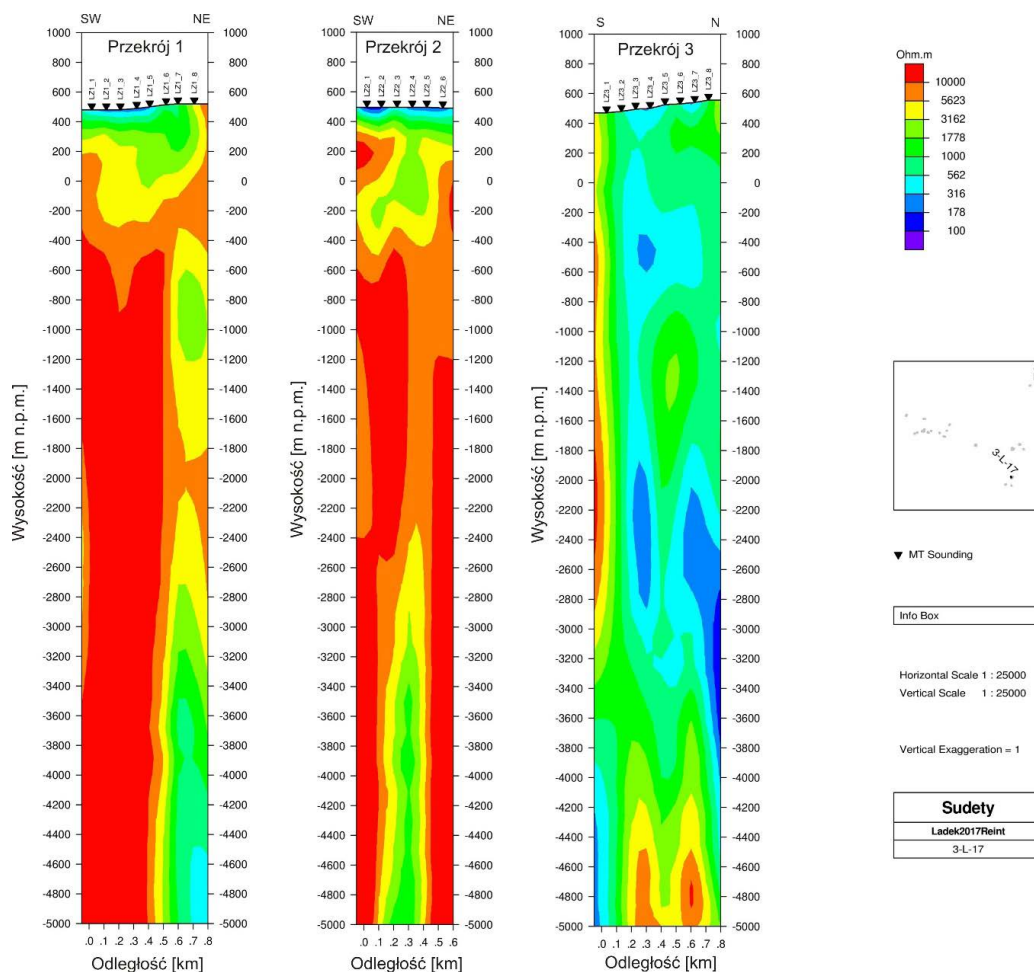
my Geosystem srl. Wstępem do interpretacji ilościowej była jakościowa analiza wyników przetwarzania danych pomiarowych. Miała ona na celu prześledzenie zmienności kształtu krzywych wzdłuż profili, wyznaczenie stref o wysokim poziomie zakłóceń – a więc obszarów niższej wiarygodności interpretacji, określenie zasięgu głębokościowego dla metody AMT, zdefiniowanie charakteru (1D, 2D, 3D) ośrodka geoelektrycznego.

3. ILOŚCIOWA INTERPRETACJA JEDNOWYMIAROWA KRZYWYCH SONDOWAŃ

Interpretacja 1D wykonana została za pomocą inwersyjnego algorytmu Occama, który polega na komputerowej aproksymacji jednowymiarowego rozkładu oporności w ośrodku geologicznym na podstawie amplitudowych i fazowych krzywych sondowań (Constable i in. 1987). Podstawowym założeniem tej metody jest dążenie do uzyskania maksymalnie płynnego rozwiązania. W rezultacie rozkład oporności w ośrodku geologicznym jest zgeneralizowany i pozbawiony wyraźnych kontrastów. Niewątpliwą zaletą metody jest jej pełna automatyzacja. Ingerencja interpretatora sprowadza się do przygotowania danych, wprowadzenia ilości warstw oraz określenia interwału głębokościowego interpretacji. Rysunek 8 przedstawia przekroje geoelektryczne 1D według algorytmu Occama. Uzyskany obraz elektromagnetyczny wzdłuż tego samego przekroju dla polaryzacji elektrycznej TE i magnetycznej TM (krzywe zrotowane odpowiednio do kierunków Z_{min} i Z_{max}) jest wyraźnie różny, co jest związane wysokim stopniem skomplikowania budowy geologicznej. Przekroje opornościowe na podstawie inwersji 1D posłużyły jako wstępne modele startowe do inwersji 2D.

4. ILOŚCIOWA INTERPRETACJA DWUWYMIAROWA

Interpretację dwuwymiarową wykonano z wykorzystaniem algorytmu NLCG polegającego na iteracyjnym dopasowaniu dwuwymiarowego ośrodka geoelektrycznego do krzywych pomiarowych amplitudowych i fazowych, z wykorzystaniem procedury minimalizacyjnej nieliniowych gradientów sprzężonych (Rodi i Mackie 2001). Funkcja błędu opisująca sumaryczną rozbieżność pomiędzy danymi empirycznymi i obliczonymi teoretycznie dla modelu, jest minimalizowana w kolejnych krokach iteracyjnych, prowadzących do stopniowej modyfikacji modelu startowego. W swoim założeniu metoda NLCG dąży do modelu wygładzonego. Rozwiązanie zagadnienia inwersji jest wieloznaczne, tzn. istnieje wiele różnych modeli, które można dopasować do danych empirycznych z zadowalającą dokładnością. W tej sytuacji istotne dla prawidłowego wykorzystania programu jest odpowiednie narzucenie więzów urealnających uzyskane rozwiązanie oraz odpowiednich warunków początkowych w postaci modelu startowego. Wprowadzenie modelu bliskiego rzeczywistości ogranicza zakres zmienności jego parametrów w procesie minimalizacji i prowadzi na ogół do dobrych rozwiązań. W rejonie badań nie ma otworów wiertniczych, na podstawie których możliwe byłoby skonstruowanie modelu startowego, więc do jego budowy wykorzystano przekroje z inwersji 1D.



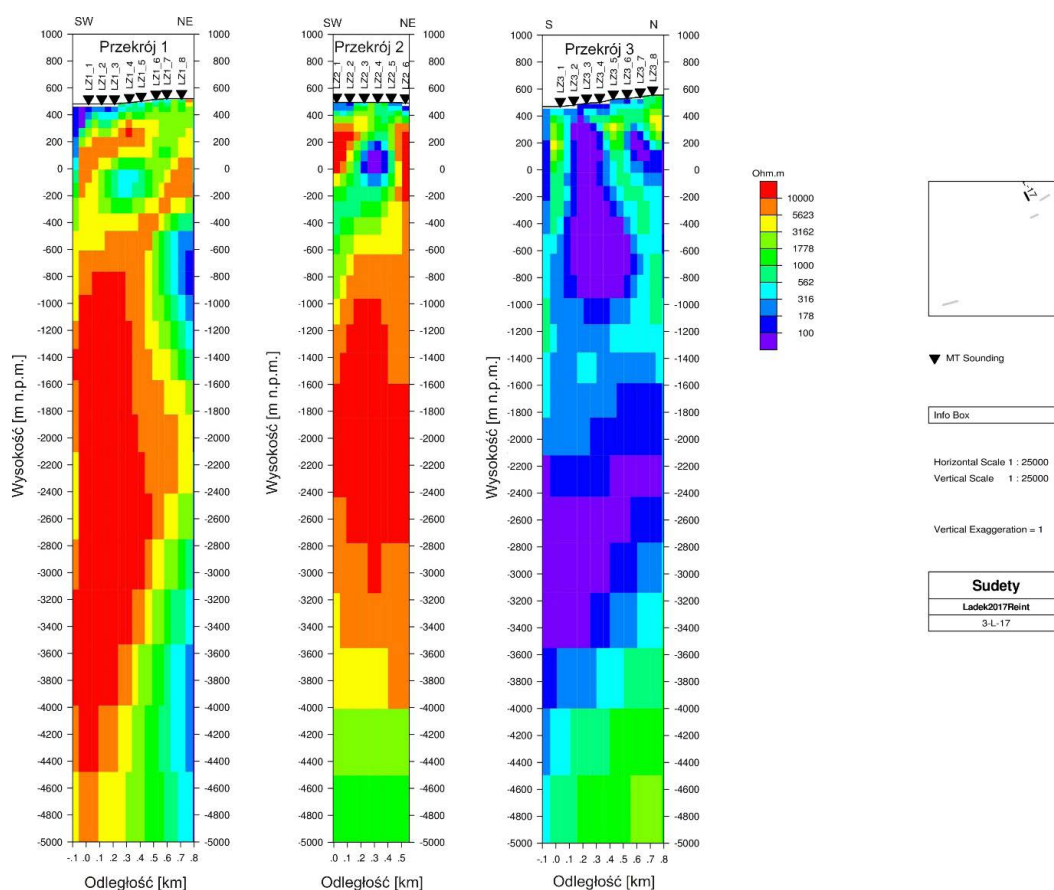
Rys. 8. Rozkład oporności wzdłuż profili na podstawie inwersji 1D według algorytmu Occama dla polaryzacji magnetycznej TM

Fig. 8. Resistivity distribution along profiles based on 1D Occam inversion for magnetic (TM) polarization.

Obliczenia dla wszystkich przekrojów wykonano równocześnie dla polaryzacji elektrycznej TE, magnetycznej TM oraz parametru tipper. Wykorzystano krzywe pomiarowe po rotacji tensora impedancji do kierunku $Z_{xy} \max$, w zakresie częstotliwości od 10400 Hz do 1 Hz (pasmo AMT). Wykorzystany został także algorytm usuwania zakłócającego wpływu niejednorodności przypowierzchniowych.

Z przekrojów geoelektrycznych 2D wynika, że wzdłuż profilu 3 występują zupełnie inne skały niż wzdłuż profili 1 i 2. Przekroje 1 i 2 charakteryzują się wysokimi wartościami oporności, w obrębie których występują anomalie o obniżonej oporności (rys. 9). W przekroju nr 1 występują trzy takie anomalie: w środkowej części przekroju na poziomach 100–200 m n.p.m. i w części końcowej na poziomach 500–1200 m n.p.m. oraz od 3 do 5 km p.p.m. Strefa

o obniżonych wartościach oporności występuje także na w środkowej części przekroju 2 na poziomie od 200 do -200 m n.p.m. Z punktu widzenia badań geotermalnych interesujące wydają się być wspomniane anomalie na przekrojach 1 i 2 oraz rejon profilu 3, gdzie dominują skały o niższych opornościach. Nie jest jednak wykluczone, że anomalie opisane na profilu 1 i 2 są rezultatem wpływu trójwymiarowości ośrodka geologicznego na inwersję 2D. Wyjaśnienie tych wątpliwości byłoby możliwe po wykonaniu dodatkowych profili magnetotellurycznych o azymucie zbliżonym do profilu 3, ale zdecydowanie dłuższych, obejmujących swoim zasięgiem zarówno obszar o obniżonych opornościach leżący na północ od miejscowości Łądek, jak i strefę skał wysokooporowych występującą na południe od tej miejscowości. Jeszcze lepszym rozwiązaniem byłoby wykonanie magnetotellurycznego zdjęcia 3D.



Rys. 9. Rozkład oporności wzdłuż profili na podstawie inwersji 2D NLCG, krzywe zrotowane do orientacji Z_{max} i Z_{min}

Fig. 9. Resistivity distribution along profiles based on 2D NLCG inversion. Curves rotated to Z_{max} and Z_{min}

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zestaw prac geofizycznych wykonanych w rejonie Łądka-Zdroju pozwolił na wyinterpretowanie stref uskokowych, wykrycie anomalii temperaturowych i w bardzo ograniczonym stopniu rozpoznanie przestrzenne szczelinowych poziomów wodonośnych. Wyniki interpretacji sondowań magnetotellurycznych wskazują na obecność przynajmniej dwu poziomów (raczej stref) zeszcelinowanych i wypełnionych wodami mineralnymi (geotermalnymi). Nie można przesądzić, czy rozdziela ją te poziomy warstwa o podwyższonej oporności nie jest przecięta szczelinami zapewniającymi łączność hydrauliczną pomiędzy nimi ani też nie można dokonać oceny ilościowej takiego połączenia. Skromny zakres danych magnetotellurycznych nie pozwala na ocenę przestrzennego rozkładu poziomów wodonośnych i potencjalnej warstwy izolującej. Przedstawione analizy wskazują że rozpoznanie strefy przypowierzchniowej łądeckiego złoża hydrogeotermalnego jest względnie dobre, natomiast informacje o jego części głębszej są fragmentaryczne i niepewne. Dla rozpoznania głębszej budowy geologicznej otoczenia złoża niezbędne będzie wykonanie magnetotellurycznego zdjęcia 3D lub szeregu wydłużonych profili ciągłych przecinających obszar złoża i wychodnie formacji otaczających. Dla pełnego obrazu geofizycznego wskazane będzie także wykonanie nowoczesnego, powierzchniowego zdjęcia geotermicznego oraz uzupełnienie zdjęcia magnetycznego i grawimetrycznego.



Artykuł opracowano i opublikowano w ramach Projektu EOG „Energia geotermalna – podstawa niskoemisyjnego ciepłownictwa, poprawy warunków życia i zrównoważonego rozwoju – wstępne studia dla wybranych obszarów w Polsce” dofinansowanego ze środków Mechanizmu Finansowego EOG 2009–2014 w ramach Funduszu Współpracy Dwustronnej na poziomie Programu PL04 „Oszczędzanie energii i promowanie odnawialnych źródeł energii” (Umowa nr 173/2017/Wn50/OA-XN-05/D). Realizatorzy Projektu: Konsorcjum Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN (beneficjent), AGH Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie i Politechniki Wrocławskiej we współpracy z partnerami z krajów Darczyńców: National Energy Authority (Islandia) oraz Christian Michelsen Research AS (Norwegia), a także z zespołem Europejskiej Rady Energii Geotermalnej, ekspertami i przedstawicielami wybranych miast: Konstantynowa Łódzkiego, Poddębic, Sochaczewa, Łądka-Zdroju.

LITERATURA

Ciężkowski i in. 2016 – Ciężkowski, W., Marszałek, H. i Wąsik, M. 2016. *Projekt robót geologicznych poszukiwania wód termalnych otworem LZT-1 w Łądku-Zdroju.*

- Constable i in. 1987 – Constable, S.C., Parker, R.L. i Constable, C.G. 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics* 52, s. 289–300.
- Cymerman, Z. 2004. *Tectonic map of the Sudetes and the fore-sudetic block, 1:200 000*. PIG.
- Farbisz, J. 2005. *Sprawozdanie z badań geofizycznych wykonanych dla potrzeb rozpoznania warunków występowania wód geotermalnych w rejonie Łądko-Zdroju*.
- Farbisz, J. i Wodyła, M. 2008. *Dokumentacja badań geofizycznych metodą Ciągłego profilowania Magnetotellurycznego (CPMT) wykonanych w rejonie Łądko-Zdroju w celu głębokiego rozpoznania stref tektonicznych dla potrzeb określenia perspektyw występowania wód geotermalnych*.
- Fistek i in. 1975 – Fistek, J., Iwanowski, S., Iciek, A. i Jagodziński, A. 1975. Badania geologiczne, geofizyczne i hydrogeologiczne jako przykład kompleksowego rozwiązania problemu poszukiwań wód leczniczych w uzdrowiskach sudeckich. *Biul. Inf. Geofizyka* nr 1.
- Gamble i in. 1979 – Gamble, T.D., Goubau, W.M. i Clarke, J. 1979. Magnetotellurics with a remote reference. *Geophysics* 44, s. 53–68.
- Gierwielaniec, J. 1968a. *Objaśnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Sudetów 1:25 000, arkusz Łądek-Zdrój*. Warszawa: PIG.
- Goldstein, M.A. i Strangway, D.W. 1975. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source. *Geophysics* 40, s. 669–683.
- Goubau i in. 1978 – Goubau, W.M., Gamble, T.D. i Clarke, J. 1978. Magnetotelluric data analysis: removal of bias. *Geophysics* 43, s. 1157–1166.
- Jagodzińska i in. 1969 – Jagodzińska, B., Jodłowski, S. i Cieśla, E. 1969. *Dokumentacja badań geofizycznych, temat Łądek-Zdrój*. Warszawa: Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych (niepublikowane).
- Rodi, W. i Mackie, R.L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics* 66, 1, s. 174–187.
- Simpson, F. i Bahr, K. 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press, s. 1–254.
- Sims i in. 1971 – Sims, W.E, Bostick, F.X. Jr. i Smith, H.W. 1971. The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data. *Geophysics* 36, s. 938–942.
- Stefaniuk i in. 2008 – Stefaniuk, M., Czerwiński, T., Klityński, W. i Wojdyła, M. 2008. Zastosowanie metody magnetotellurycznych profilowań ciągłych w badaniach strukturalnych. *Kwartalnik AGH Geologia* t. 34, z. 1, s. 43–69.
- Stefaniuk i in. 2017 – Stefaniuk, M., Maćkowski, T. i Sowizdzał, A. 2017. *Geophysical methods in the recognition of geothermal resources – selected problems* (w druku).
- Stefaniuk i in. 2011 – Stefaniuk, M., Farbisz, J., Wojdyła, M. i Sito, Ł. 2011. Badania magnetotelluryczne na Dolnym Śląsku – nowe możliwości wykorzystania metody magnetotellurycznej w geologii strukturalnej, złożowej, poszukiwaniach wód mineralnych i termalnych. [W:] *Mezozoik i kenozoik Dolnego Śląska*. LXXXI zjazd Polskiego Towarzystwa Geologicznego; red. A. Żelaźniewicza, J. Wojewody & W. Ciężkowskiego; Polskie Towarzystwo Geologiczne. Wrocław: WIND, s. 169–193.

THE APPLICATION OF A GEOPHYSICAL SURVEY FOR RECOGNIZING OF GEOLOGICAL CONDITIONS OF THE HYDROGEO THERMAL RESERVOIR VICINITY INSIDE THE CRYSTALLINE MASSIF IN THE ŁĄDEK-ZDRÓJ AREA

ABSTRACT

The Łądek-Zdrój area has been known for several hundred years as a place of occurrence and use of hot springs. A hydrogeothermal reservoir occurs there in specific geological conditions characteristic for Sudetes area. The reservoir is of a fracture type and occurs in artesian conditions. The development of the Health Resort caused the need for the better recognition of the hydrogeothermal reservoir and its geological vicinity. The carried out investigation program included, among others, a geophysical survey for the recognition of general geological conditions of the reservoir and its vicinity. The magnetic, gravity and surface geothermic methods were applied as well as VLF profiling, resistivity profiling and soundings and continuous magnetotelluric profiling. The review of the earlier geophysical surveys and reinterpretation of the magnetotelluric data including gravity data were made within the framework of the presented paper. The reinterpretation works included a review of data acquisition, the verification of procedures and results of data processing as well as verification and an extended interpretation of the sounding curves with use of inverse 2D modeling. As results of the survey tectonic zones were interpreted and temperature anomalies were discovered and, within a limited range, space recognition of the fractured aquifer horizons was made.

KEYWORDS

Geothermics, Sudetes, Łądek-Zdrój, geophysical survey, magnetotellurics, crystalline massif



The paper was prepared and published as part of the EEA Project on “Geothermal energy – a basis for low-emission heating, improving living conditions and sustainable development – preliminary studies for selected areas in Poland”, co-funded by the Financial Mechanism of the European Economic Area (EEA) 2009–2014, as part of the Bilateral Co-operation Fund, at the Level of PL04 Programme “Energy Saving and the Promotion of Renewable Energy Sources” (Agreement No. 173/2017/Wn50/OA-XN-05/D). Project performers: The Consortium of The Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences (Beneficiary), The AGH University of Science and Technology in Kraków, and The Wrocław University of Science and Technology, in co-operation with the Partners from the Donor countries: The National Energy Authority (Iceland) and the Christian Michelsen Research AS (Norway). The Project performers were also European Geothermal Energy Council, experts and representatives of selected towns: Konstantynów Łódzki, Poddębice, Sochaczew, Łądek-Zdrój.