

Ćwiczenie 1

Profilowanie temperatury jako metoda oceny potencjału cieplnego górotworu (Sonda NIMO-T)

Zawartość

Wstęp.....	1
Opis badania.....	1
Interpretacja wyników.....	3
Literatura.....	7

Wstęp

Badania zmiany temperatury wraz z głębokością w otworach wiertniczych przeprowadza się głównie przy użyciu metod geofizycznych. Istnieje także wiele urządzeń do pomiaru temperatury w otworach, zarówno głębokich, jak i płytkich. Jednym z rodzajów otworów wiertniczych jakimi są otworowe wymienniki ciepła profilowanie naturalnej temperatury można wykonać przy użyciu sondy NIMO-T.

Sonda NIMO-T (Non-wired Immersible Measuring Object for Temperature) to mała, lekka, bezprzewodowa sonda, składająca się z rejestratorów ciśnienia i temperatury, a także z zaprogramowanego mikroprocesora. Wszystko zostało umieszczone w zamkniętej metalowej, wodoszczelnej rurze, która wytrzymuje ciśnienie do 110 barów. Sam czujnik ma długość około 235 mm, średnicę 23 mm i masę 99,8 g.

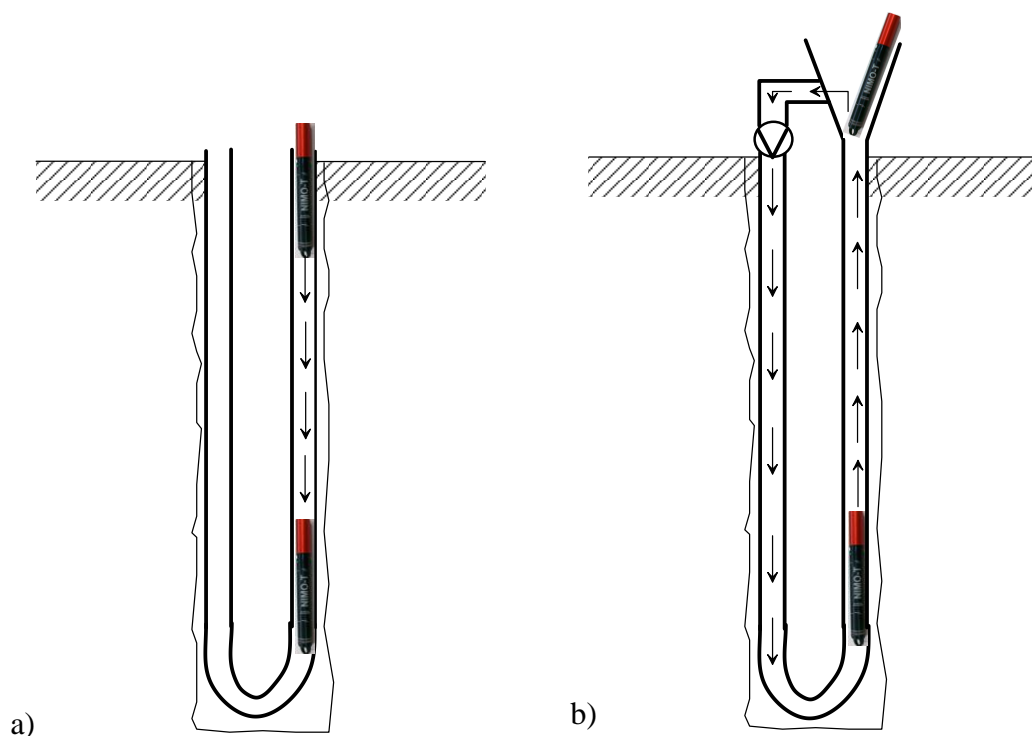
Opis badania

Sonda montowana jest na kablu o określonej długości (długość kabla zależy przede wszystkim od głębokości otworowego wymiennika ciepła), który podczas zapuszczania do otworu zapisuje dane dotyczące ciśnienia i temperatury. Dane są przechowywane w pamięci loggера, który po podłączeniu do komputera przesyła je celem ich analizy. Sonda NIMO-T jest cięższa od wody, co pozwala na opadanie jej ze stałą prędkością około $0,2-0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na dno otworu. Prędkość jej opadania może być regulowana (Śliwa i in. 2016, Rohner i in. 2005).

Na rys. 1 pokazano sondę NIMO-T. Na rys. 2 przedstawiono alternatywną metodę pomiaru. Logger może być swobodnie wrzucony do U-rurki. Opada na dno z prędkością zależną od zastosowanego obciążenia. Mierzy i rejestruje temperaturę i ciśnienie co 2 sekundy.



Rys. 1. Non-wired Immersible Measuring Object for Temperature (NIMO-T) logger



Rys. 2. Poruszanie się NIMO-T w U-rurce: a) swobodne opadanie przyrządu w nośniku ciepła
b) wypływanie przyrządu dzięki pompowaniu

Tabela 1. Zakres i dokładność pomiarów NIMO-T

Wielkość	Wartość	Jednostka
Zakres temperatury	od -5 do +50	°C
Zakres ciśnienia	od 0 do 40	bar
Maksymalna głębokość pomiaru	400	m
Maksymalne ciśnienie testowe	110	bar
Dokładność profilowania temperatury (w zakresie od +5° do +25°C)	+/- 0.0015	°C, temperatura względna (różnica temperatur, ΔT)
	+/- 0.1	°C, wartość temperatury
Dokładność profilowania ciśnienia	+/- 0.02	bar, ciśnienie względne (różnica ciśnień, Δp)
	+/- 0.1	bar, wartość ciśnienia

Za pomocą profilowania naturalnej temperatury w otworowych wymiennikach ciepła możliwe jest wyznaczenie przewodności cieplnej λ skał z wykorzystaniem prawa Fouriera oraz wyznaczenie gradientów temperatury określonego interwału skał. Prawo Fouriera podaje nam informacje o tym, że gęstość kondukcyjnego strumienia ciepła jest wprost proporcjonalna do gradientu temperatury oraz zdolności przewodzenia ciepła przez skały, której miarą jest przewodność cieplna λ (Śliwa i in. 2016).

Prawo Fouriera ma postać:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (1)$$

gdzie:

q gęstość ziemskiego strumienia ciepła, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,

T temperatura, °C,

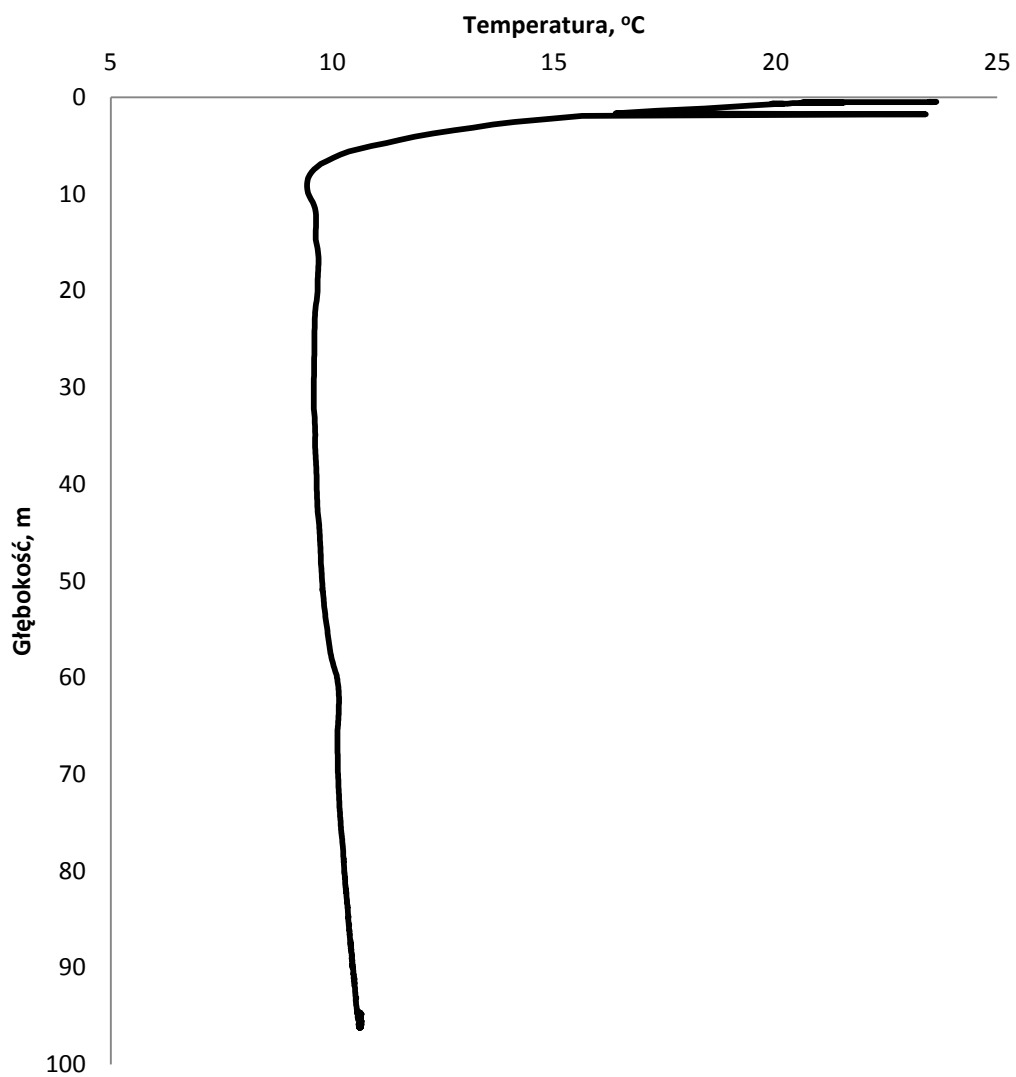
λ przewodność cieplna, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Przekształcając wzór (4.1) uzyskuje się zależność na przewodność cieplną:

$$\lambda = -\frac{q}{\text{grad}T} \quad (2)$$

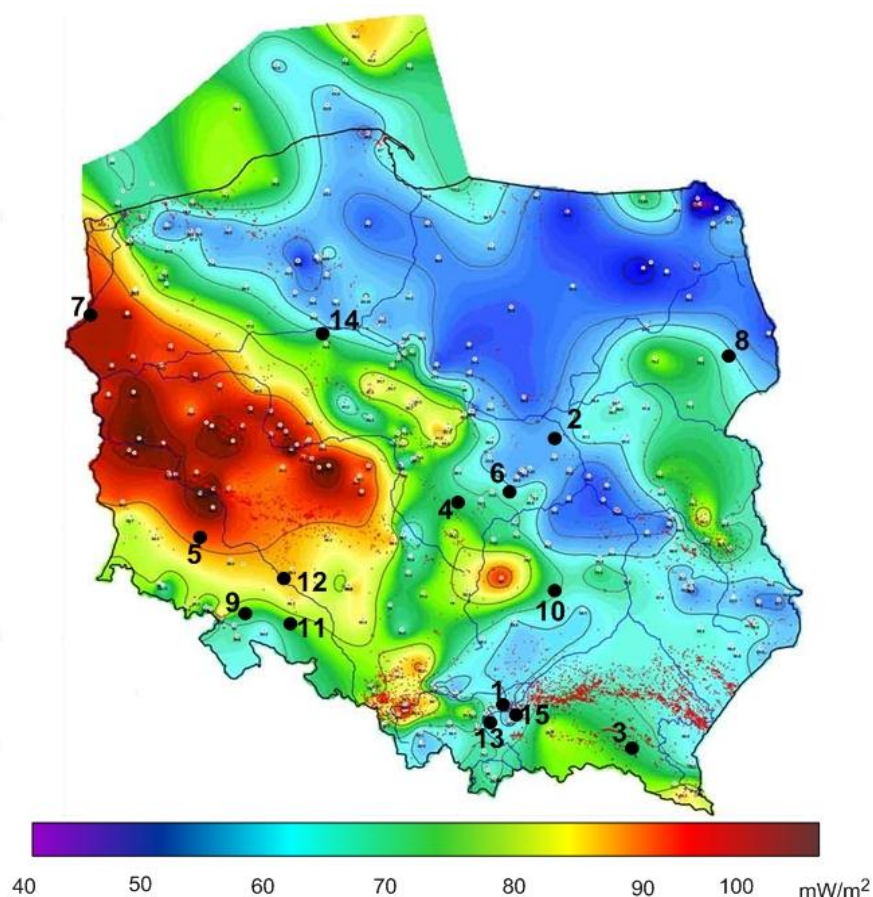
Interpretacja wyników

Na rysunku 3 przedstawiono przykład graficznego przedstawienia wyników profilowania temperatury otworowego wymiennika ciepła w Foluszu.



Rys. 3. Przykładowe graficzne przedstawienia wyników profilowania temperatury otworowego wymiennika ciepła w Folsz

Na podstawie mapy (rys. 4) można określić wartość naturalnego ziemskiego strumienia ciepła, a następnie na podstawie prawa Fouriera można wyznaczyć wartość współczynnika przewodzenia ciepła.



Rys. 4. Mapa rozkładu gęstości naturalnego ziemskiego strumienia ciepła w Polsce (Szewczyk i Gientka 2009): 1 – Kraków, 2 – Warszawa, 3 – Folsz, 4 – Łódź, 5 – Polkowice, 6 – Rawa Mazowiecka, 7 – Szczecin, 8 – Białystok, 9 – Goła Dzierżoniowska, 10 – Kielce, 11 – Żarów, 12 – Wrocław, 13 – Skawina, 14 – Bydgoszcz, 15 – Niepołomice

Z wykresu zależności temperatury od głębokości (rys. 3) zostały odczytane temperatury na głębokościach maksymalnych i minimalnych dla całości danych.

Drugim krokiem było wyznaczenie gradientu temperatury dla odczytanych wartości zgodnie ze wzorem:

$$\text{grad } T = \frac{T(h_{\max}) - T(h_{\min})}{h_{\max} - h_{\min}} \quad (3)$$

gdzie:

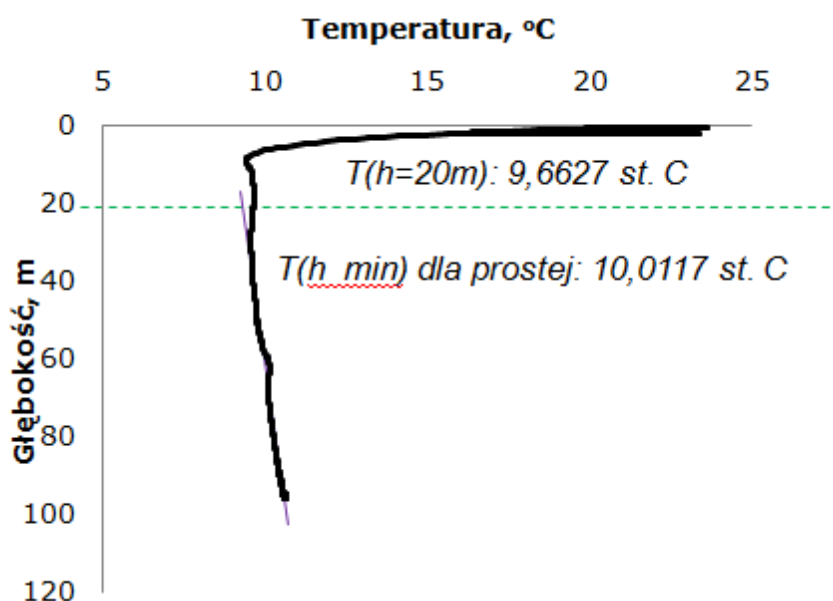
$T(h_{\max}), T(h_{\min})$ – temperatura odpowiednio na głębokości max i min, K,

h_{\max}, h_{\min} – głębokość odpowiednio maksymalna i minimalna, m.

Po wyznaczeniu gradientu, z prawa Fouriera (1) wyliczona została wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ .

Te same czynności zostały powtórzone dla wartości, gdy temperatura wraz z głębokością wzrastała liniowo, oraz dla wyników profilowania powyżej 20 m (rys. 5).

W tabeli 2 znajdują się również wyniki współczynnika przewodzenia ciepła λ z TRT oraz z literatury (Śliwa 2012).



Rys. 5. Wyniki profilowania temperatury otworowego wymiennika ciepła w Foluszu

Tabela 2. Zestawienie obliczeń i danych literaturowych

= q/grad T

nr	gęstość q[mW/m ²]	T(h_max)[°C]	T(h_min)[°C]	h_max [m]	h_min (dla prostej) [m]	grad T dla całości danych [C/m]	λ dla całego zakresu danych [mW/m ² °C]	grad T dla prostej [C/m]	- λ dla prostej [mW/m ² °C]
4	75	10,6284	23,498	96,2216	58,6522	-0,134425904	-0,560749363	0,016414955	4,569004378

$$= [T(h_{max}) - T(h_{min})] / (h_{max} - h_{min})$$

grad T dla wartości z zakresu 20 m do h_max [C/m]	- λ z zakresu 20 m do h_max [mW/m ² °C]	λ z TRT [mW/m ² °C]	λ z literatury [mW/m ² °C]
0,01267	5,919664	2,63	2,25

Na podstawie danych z profilowania można wykonać wykres zależności gradientu geotermicznego od głębokości otworu. Najczęściej odrzuca się wyniki profilowania w interwale 0-20 ze względu na zmienność sezonową. Na podstawie znanej zmienności przewodności cieplnej w profilu górotworu możliwe jest wyznaczenie średniej wartości przewodnictwa cieplnego. Wyniki należy również przedstawić graficznie w formie wykresów zależności gradientu geotermicznego od głębokości oraz przewodności cieplnej od głębokości.

Literatura

1. Rohner E., Rybach L., Schärli U. A New, Small, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design, Proceedings World Geothermal Congress, Atlanta, Turkey, 2005
2. Szewczyk J., Gientka D. Terrestrial heat flow density in Poland – a new approach, Geological Quarterly, 53 (1), 125-140, 2009
3. Śliwa T. Badania podziemnego magazynowania ciepła za pomocą kolektorów słonecznych i wymienników otworowych, Kraków 2012
4. Śliwa T., Sapińska-Śliwa A., Knez D., Bieda A., Kowalski T., Złotkowski A., Borehole heat exchangers: production and storage of heat in the rock mass, Laboratory of Geenergetics Book Series vol. 2, Kraków 2016