



POLSKIE STOWARZYSZENIE GEOTERMICZNE

# EFEKT TERMICZNY W OTWORACH GEOTERMALNYCH – WYKORZYSTANIE JĘZYKA PYTHON DO AUTOMATYZACJI OBLICZEŃ

Maciej Miecznik, **Karol Pierzchała**, Beata Kępińska,  
Leszek Pająk, Bogusław Bielec  
IGSMiE PAN

## VIII OGÓLNOPOLSKI KONGRES GEOTERMALNY

29.12 - 1.12. 2023 rok



# Profil temperatury otworu w stanie statycznym i dynamicznym

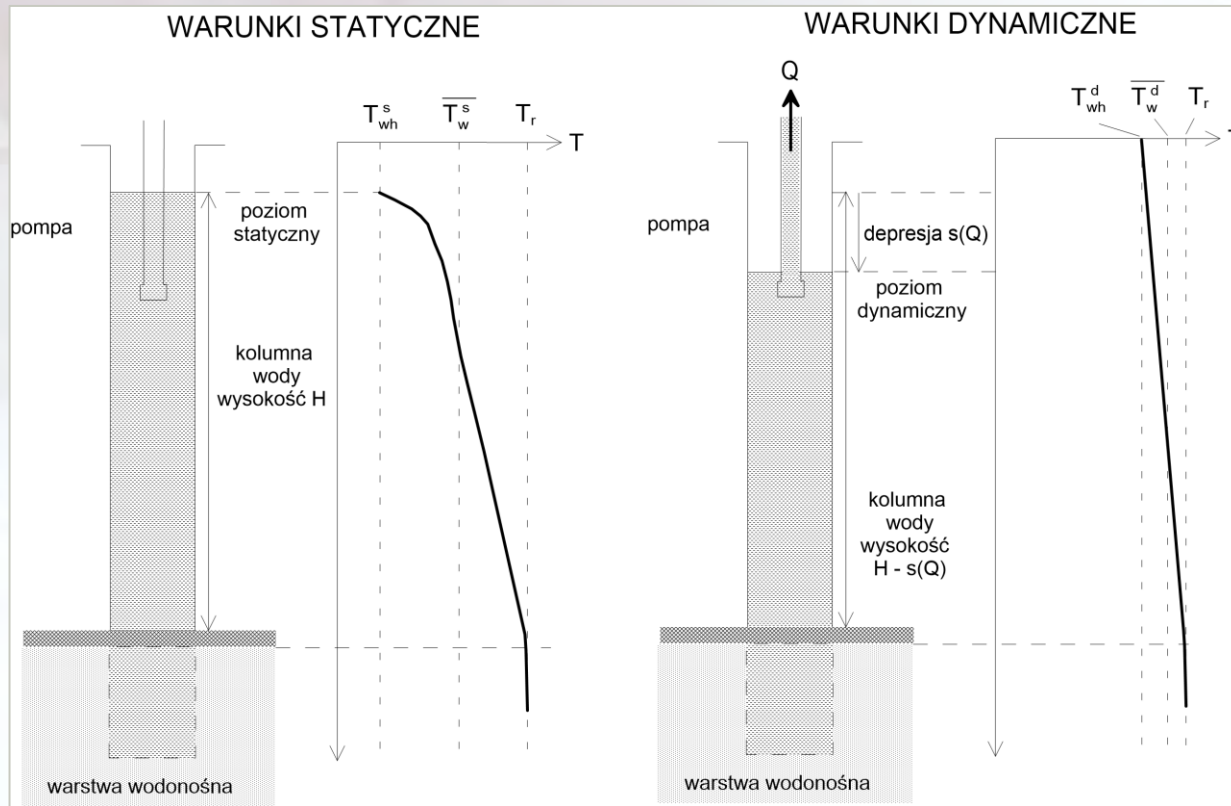


Figura 1. Wpływ pompowania otworu na temperaturę wody w otworze (Miecznik 2017 na podst. Kawecki 1995)



Woda podlega ekspansji objętościowej wraz ze wzrostem temperatury

Skutkuje to podwyższonym ciśnieniem rejestrowanym na głowicy otworu / poziomem lustra wody podczas pompowania

Obserwator rejestruje mniejszy spadek ciśnienia / poziomu zwierciadła wody w porównaniu do sytuacji bez tego efektu

Mniejszy spadek ciśnienia / poziomu wody przyjęty do obliczeń skutkuje oszacowaniem niezeczywistych parametrów hydraulicznych złoża

Przeszacowanie parametrów hydraulicznych złoża np. przewodności hydraulicznej może prowadzić do nadmiernego użytkowania zasobów



# Przykład surowych danych z pompowania testowego

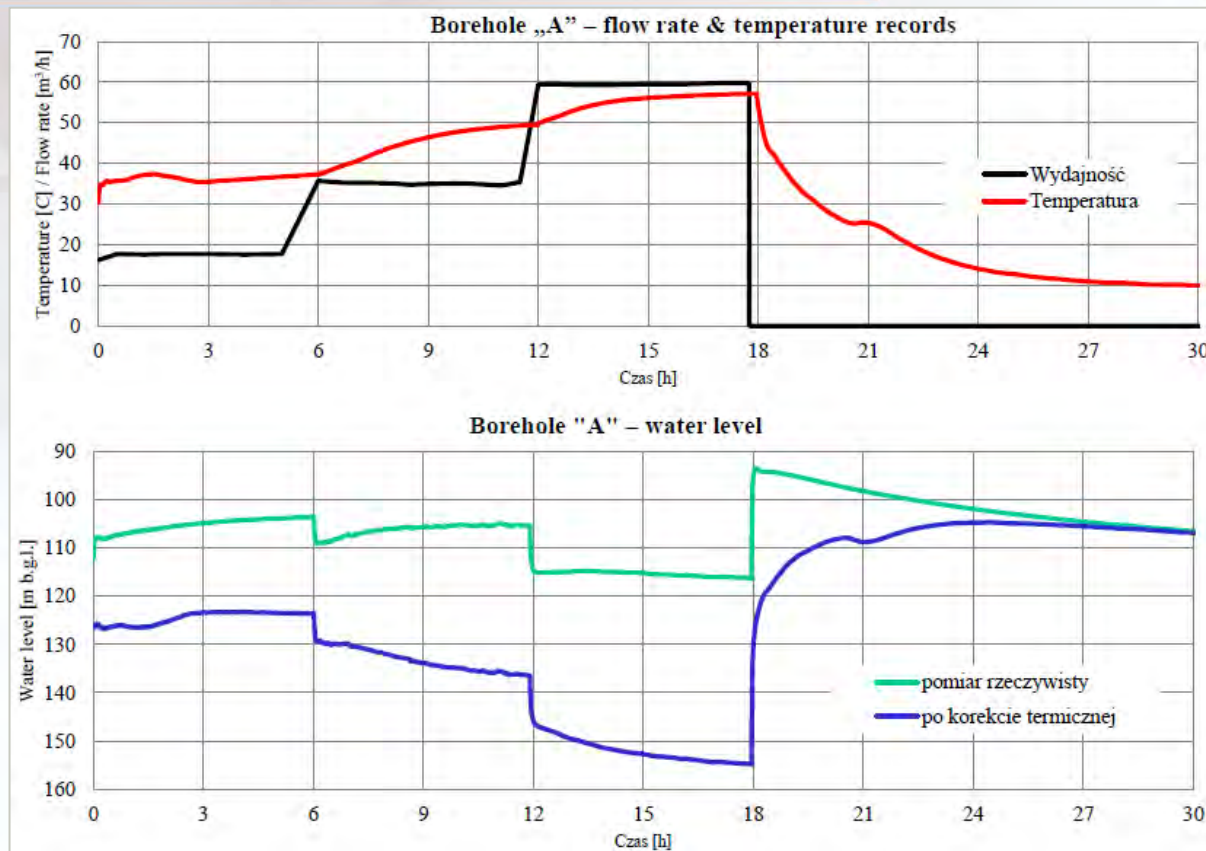


Figura 2. Dane rejestrowane podczas pompowania testowego





Ponieważ ciśnienie na dnie otworu jest niezależne od temperatury cieczy znajdującej się w nim, iloczyn wysokości słupa cieczy oraz jego gęstości będzie taki sam dla otworu niewygrzanego, jak i wygrzanego:

$$H_d \overline{\rho_w^d} = H_s \overline{\rho_w^s} \quad (1)$$

gdzie:

$H_d$  – wysokość słupa cieczy w warunkach dynamicznych,

$H_s$  – wysokość słupa cieczy w otworze nieeksploatowanym (warunki statyczne, otwór niewygrzany),

$\overline{\rho_w^d}$  – średnia gęstość słupa wody w warunkach dynamicznych,

$\overline{\rho_w^s}$  – średnia gęstość słupa wody w otworze nieeksploatowanym (niewygrzanym).



Choć w ogólności gęstość wody jest funkcją nieliniową temperatury, to w zakresie temperatur od 40 do 95°C (temperatura wód geotermalnych w systemach 1-fazowych) można uznać, że przybliżenie funkcją liniową jest wystarczająco dokładne. Pomijając kilka przekształceń dochodzi się do zależności:

$$\overline{\rho_w} = \rho_w (\overline{T_w}) \quad (2)$$

Wstawiając równanie 2 do równania 1 otrzymujemy:

$$H_d \rho_w (\overline{T_w^d}) = H_s \rho_w (\overline{T_w^s}) \quad (3)$$

gdzie:

$\overline{T_w^d}$  – średnia temperatura słupa wody w warunkach dynamicznych,

$\overline{T_w^s}$  – średnia temperatura słupa wody w warunkach statycznych (otwór niewygrzany).



Ciśnienie mierzone na dnie otworu w warunkach statycznych jest następujące:

$$p_{r,0} = \rho_w \left( \overline{T_w^s} \right) H_{TVD} g + p_{wh,0} \quad (4)$$

gdzie:

$p_{r,0}$  – ciśnienie na dnie otworu w warunkach statycznych (brak wydobywania),

$p_{wh,0}$  – ciśnienie głowicowe otworu w warunkach statycznych.

Ciśnienie denne w trakcie eksploatacji można wyrazić w postaci równania analogicznie do ciśnienia dennego w warunkach statycznych:

$$p_r = \rho_w \left( \overline{T_w^d} \right) H_{TVD} g + p_{wh} \quad (5)$$

gdzie:

$p_r$  – ciśnienie na dnie otworu w warunkach dynamicznych,

$p_{wh}$  – ciśnienie głowicowe otworu w warunkach dynamicznych.



Wartość depresji  $s(\overline{T_w^s})$  w otworze to różnica pomiędzy ciśnieniem dennym statycznym i dynamicznym:

$$s(\overline{T_w^s}) = \frac{p_{r,0} - p_r}{\rho_w(\overline{T_w^s})g} \quad (6)$$

Podstawiając równania 4 i 5 do równania 6 otrzymuje się wzór pozwalający obliczyć rzeczywistą depresję z pominięciem wpływu efektu wygrzewania otworu znając jedynie statyczne i chwilowe ciśnienie głowicowe oraz oszacowaną średnią temperaturę słupa wody w warunkach statycznych i dynamicznych:

$$s(\overline{T_w^s}) = \frac{p_{wh,0} - p_{wh}}{\rho_w(\overline{T_w^s})g} + \left[ 1 - \frac{\rho_w(\overline{T_w^d})}{\rho_w(\overline{T_w^s})} \right] H_{TVD} \quad (7)$$

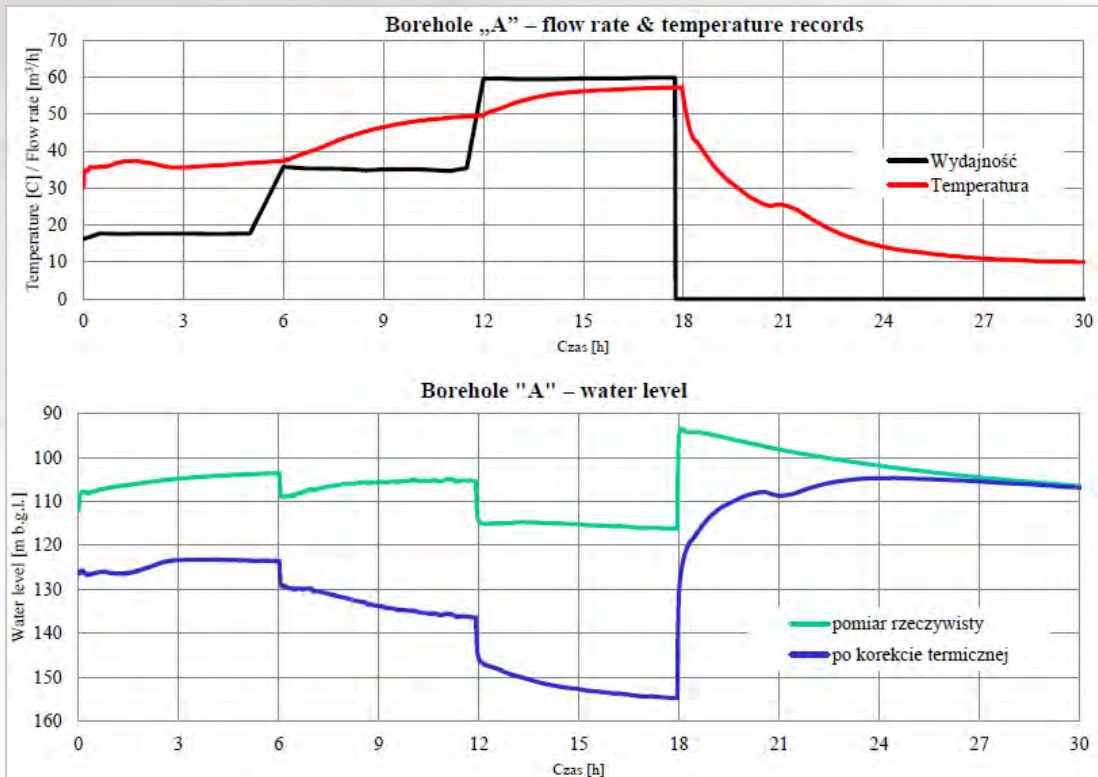




Odejmując od ciśnienia głowicowego statycznego rzeczywistą wartość depresji  $s(\overline{T_w^s})$ , uwzględniającą wpływ wygrzewania otworu w trakcie wydobywania, otrzymuje się wartość ciśnienia głowicowego zredukowanego  $p_{wh}^{red}$ :

$$p_{wh}^{red} = p_{wh,0} - s(\overline{T_w^s}) \cdot \rho_w(\overline{T_w^s}) \cdot g = p_{wh} - \left[ 1 - \frac{\rho_w(\overline{T_w^d})}{\rho_w(\overline{T_w^s})} \right] \rho_w(\overline{T_w^s}) H_{TVD} g \quad (8)$$



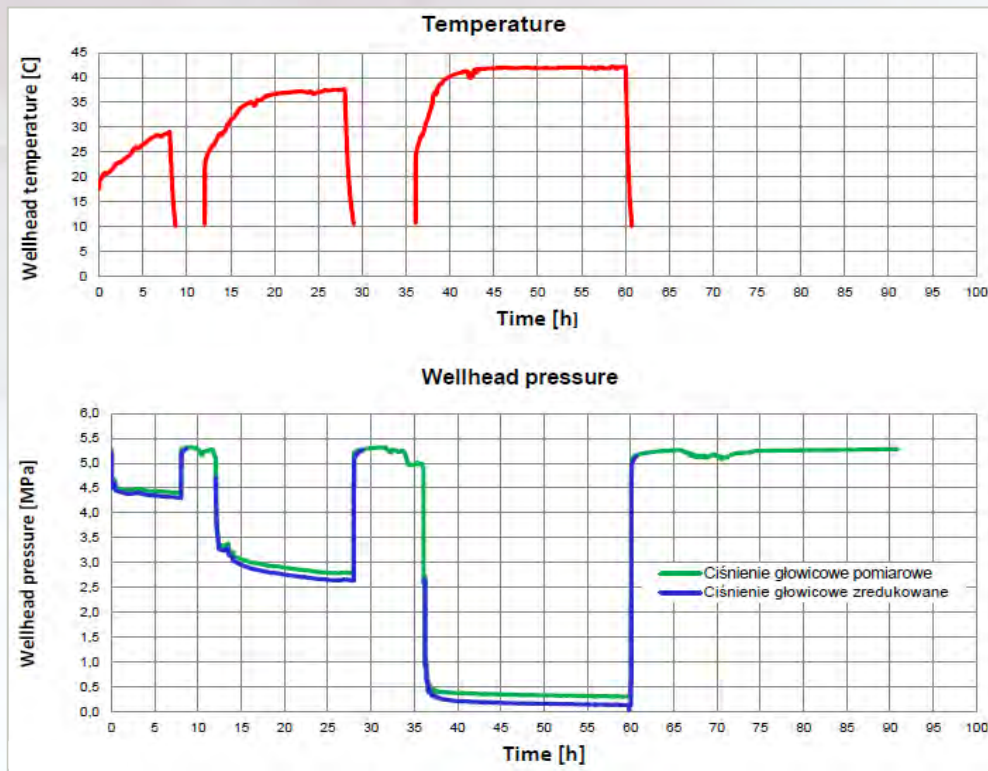


Pierwotnie:  
 $k \cdot h = 1,86 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

Po korekcie:  
 $k \cdot h = 4,12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Figura 2. Dane rejestrowane podczas pompowania testowego oraz po zastosowaniu korekty termicznej





Pierwotnie:  
 $k \cdot h = 7,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Po korekcie:  
 $k \cdot h = 3,54 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Figura 3. Dane rejestrowane podczas pompowania testowego i obliczone ciśnienie zredukowane



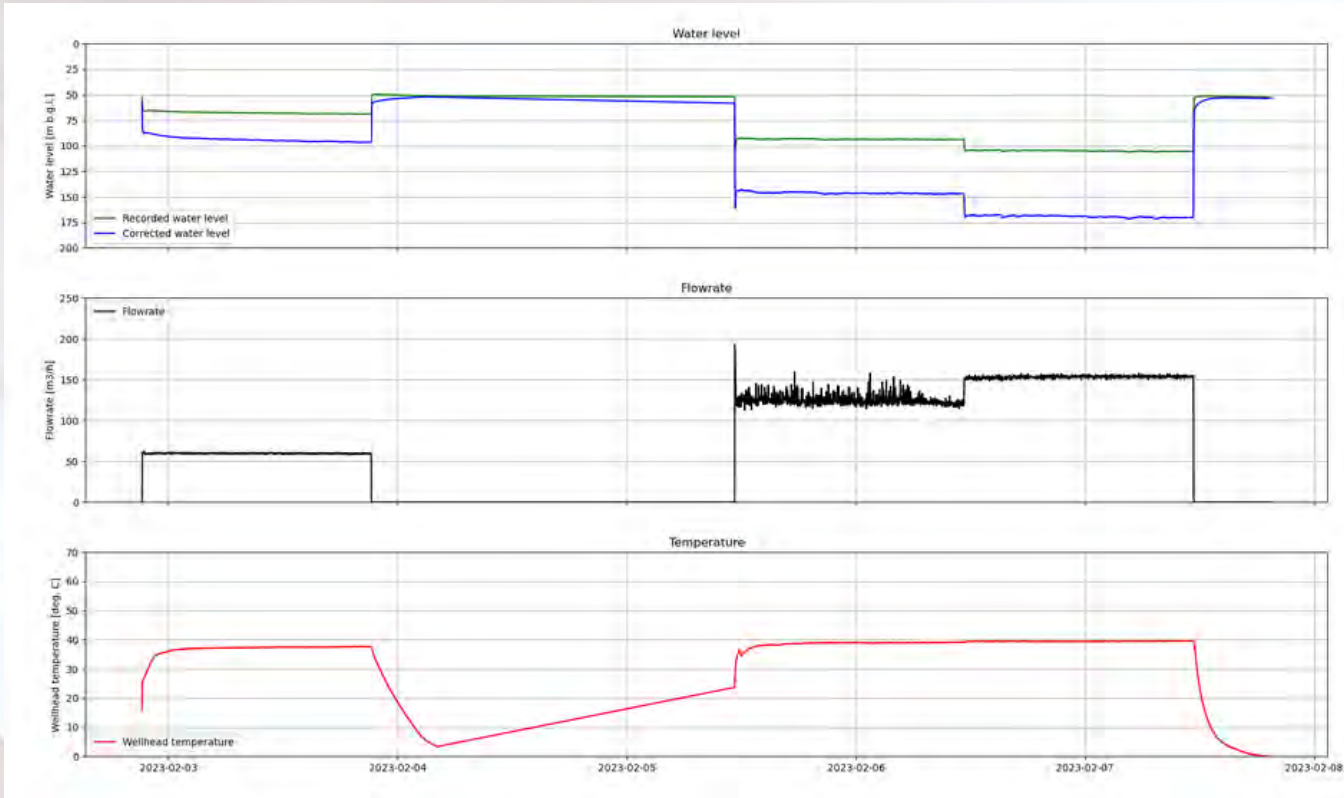


Figura 4. Wykresy obrazujące efekt termicznego wygrzewania otworu, wygenerowane w programie THERMALIFT CALC



```
"""
Validity: brine_density(t, s) in (kg/m3); 0 < t < 180 deg. C; 0 < S < 0.16 kg/kg
Accuracy: ±0.1 %
Reference: H. Sun, R. Feistel, M. Koch and A. Markoe, New equations for density,
entropy, heat capacity, and potential temperature of a saline thermal fluid,
Deep-Sea Research, I 55 (2008), 1304-1310.
"""

# correlation parameters
a1 = 9.999E2
a2 = 2.034E-2
a3 = -6.162E-3
a4 = 2.261E-5
a5 = -4.657E-8
b1 = 8.020E2
b2 = -2.001
b3 = 1.677E-2
b4 = -3.060E-5
b5 = -1.613E-5

def brine_density(t, ss):
# Below function calculates brine density as a function of temperature [deg. C]
# and salinity, expressed in kg/kg
    if ss<0.35:
        rho_brine = a1 + a2*t + a3*t**2 + a4*t**3 + a5*t**4 + b1*ss + b2*ss*t + b3*ss*t**2 + b4*ss*t**3 + b5*ss**2*t**2
    else:
# Below function calculates brine density as a function of temperature [deg. C]
# and salinity, expressed in g/dm3
        s = ss/1050
        for i in range(1,10):
            rho_brine = a1 + a2*t + a3*t**2 + a4*t**3 + a5*t**4 + b1*s + b2*s*t + b3*s*t**2 + b4*s*t**3 + b5*s**2*t**2
            s = ss/rho_brine
        return rho_brine
```

Figura 5. Fragment kodu napisany w języku Python do obliczania gęstości wody zmineralizowanej





- Fragment kodu, tworzący klasę Well(), dla której będzie można tworzyć obiekty (tj. otwory) oraz przypisywać im wykonywanie różnych funkcji:

```
import brine_density

class Well():

    def __init__(self, df, id = '', name = '', type = '', salinity = 0.0, tvd = 0.0, md = 0.0):
        self.id = id
        self.name = name
        self.type = type
        self.salinity = salinity
        self.tvd = tvd
        self.md = md
        self.df = df

# Calculate mean static temperature in the water column; well not pumped
def temp_static(self, df):
    return df.iloc[:,1].mean() # Needs correction, to account for cases with non-uniform temperature distribution
```

Figura 6. Fragment kodu w języku Python (cd.)



### Dalszy plan rozwoju programu THERMALIFT CALC:

- Opracowanie darmowej oraz łatwej w użyciu biblioteki języka Python do obliczania efektu wygrzewania otworu
- Możliwość wykonywania obliczeń dla wód w szerokim zakresie mineralizacji
- Dla otworów pionowych oraz kierunkowych
- Opcja automatycznej interpolacji brakujących danych
- Automatyczne rozpoznawanie daty i czasu z pliku tekstowego
- Wykresy porównujące stan przed oraz po procedurze korygującej
- Możliwość eksportu obliczonych wartości i wykresów do plików dyskowych



**Wydarzenia**

**Efekt wygrzewania się otworu gec**

Przedstawiona procedura obliczeniowa pozwala oszacować wartość depresji oraz ciśnienie, jakie byłoby rejestrowane na głowicy eksploatowanego otworu produkcyjnego, gdyby nie zachodził proces ekspansji objętościowej wody związanej z wygrzewaniem otworu. Ponieważ wygrzewanie otworu prowadzi do zwiększenia objętości wody w kolumnie nur okładzinowych, ciśnienie jakie jest rejestrowane na głowicy otworu jest zawsze wyższe niż gdyby nie zachodziło wygrzewanie. W przypadku otworów subarteryjskich zaterciadło wody w pompowanym otworze znajduje się zawsze wyżej (płycej) w porównaniu z otworami, w których ekspansja objętościowa wydobywanej wody jest niewielka lub zaniedbywana. W obu przypadkach interpretacja ciśnienia głowicowego bądź wysokości słupa wody w trakcie prowadzonych testów hydrodynamicznych prowadzi do oszacowania wyższej przewodności warstwy wodonośnej niż jest w rzeczywistości. Podobnie – w trakcie kalibracji modelu numerycznego opartej na danych z monitoringu eksploatowanych otworów należy uwzględnić to zjawisko. Prognozowanie warunków eksploatacyjnych na podstawie nieprawidłowo oszacowanych parametrów filtracyjnych zbiornika może prowadzić do niezrównoważonej gospodarki zasobami wodnymi. Stąd też konieczna jest korekta mierzonych w takich warunkach ciśnienia i posługiwanie się wartością tzw. ciśnienia głowicowego zredukowanego. Ciśnienie głowicowe zredukowane – tj. ciśnienie głowicowe skorygowano o zachodzący proces ekspansji objętościowej wody podczas eksploatacji powinno stanowić podstawę interpretacji testów hydrodynamicznych (Kawecky 1995, Bielec i Miecznik 2012,) oraz kalibracji modeli numerycznych zbiorników wód geotermalnych. Na rys. 1 przedstawiono rozkład temperatury w kolumnie nur okładzinowych otworu w warunkach statycznych (brak przepływu) oraz w warunkach dynamicznych.

Ciśnienie hydrostatyczne wywierane przez słup wody wynosi:

$$p = g \int_0^{H_{TVD}} \rho_w(z) dz$$

gdzie:

- $p$  – ciśnienie hydrostatyczne,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie,
- $\rho_w$  – gęstość słupa wody w otworze,
- $H_{TVD}$  – głębokość pionowa otworu,
- $z$  – zmienna całkowania (głębokość).

**Wiedza**

**Parametry termofizyczne wody zasolonej**

Parametry termofizyczne solanek takie jak gęstość, ciepło właściwe, lepkość dynamiczna, zmieniają się znacząco pod wpływem temperatury oraz mineralizacji. Ciśnienie w tych zależnościach nie jest aż tak istotne, ze względu na niski współczynnik ściśliwości wody. Jest zatem niezbędne, aby znać dokładne wartości tych parametrów podczas analizy przedsięwzięcia geotermalnego.

Potencjał energetyczny źródła geotermalnego bardzo często szacuje się przyjmując parametry wody w temperaturze 20°C oraz mineralizacji równej 0 g/kg. Wartości rzeczywiste parametrów termofizycznych dla wód geotermalnych mogą jednak znacząco odbiegać od wartości przyjętych do szacunków. Błąd może dochodzić w skrajnych przypadkach nawet do kilkunastu procent [1].

Naukowcy opracowali liczne korelacje do oszacowania jak najbardziej dokładnych wartości parametrów termodynamicznych wody [2,3]. Większość korelacji została opracowana dla wody morskiej, ale zakres stosowności części z tych równań pozwala na używanie ich do wyznaczania parametrów wody geotermalnej (solanek).

Z punktu widzenia modelowania złóż geotermalnych, kluczowe znaczenie mają takie parametry jak ciepło właściwe, gęstość oraz lepkość dynamiczna. Wykresy obrazujące zmienność tych parametrów w funkcji temperatury oraz zasolenia zostały przedstawione poniżej.

Zależność ciepła właściwego w funkcji temperatury oraz zasolenia została przedstawiona na rysunku 1. Do zależności wykorzystano wzór Jamiesona et al. [4]

$$c_{pw} = A + BT + CT^2 + DT^3 \frac{kJ}{kgK}$$

gdzie:

- $A = 5,328 - 9,76 \cdot 10^{-2} \cdot S + 4,04 \cdot 10^{-4} \cdot S^2$ ,
- $B = -6,913 \cdot 10^{-3} + 7,351 \cdot 10^{-4} \cdot S - 3,15 \cdot 10^{-6} \cdot S^2$ ,
- $C = 9,6 \cdot 10^{-6} - 1,927 \cdot 10^{-8} \cdot S + 8,23 \cdot 10^{-4} \cdot S^2$ ,
- $D = 2,5 \cdot 10^{-9} + 1,666 \cdot 10^{-10} \cdot S - 7,125 \cdot 10^{-12} \cdot S^2$ ,
- $T$  – temperatura [K],
- $S$  – mineralizacja [g/kg].

Po więcej informacji o projekcie i garść wiedzy „inżynierskiej” zapraszamy na [www.geomodel.pl](http://www.geomodel.pl) 😊

Projekt „Optymalne zarządzanie niskotemperaturowymi zbiornikami geotermalnymi – polsko-islandzka współpraca w zakresie modelowania złóż”, akronim GeoModel, jest dofinansowany ze środków Funduszu Współpracy Dwustronnej Mechanizmu Finansowego EOG na lata 2014–2021 i Norweskiego Mechanizmu Finansowego 2014-2021 w ramach Programu Środowisko, Energia i Zmiana klimatu.



# Dziękuję za uwagę.

IGSMiE PAN

Józefa Wybickiego 7a, 31-261 Kraków

[kpierzchala@min-pan.krakow.pl](mailto:kpierzchala@min-pan.krakow.pl)

(+48) 12 617-16-23



**Instytut Gospodarki  
Surowcami Mineralnymi  
i Energią**  
Polskiej Akademii Nauk