Iceland Liechtenstein Norway grants

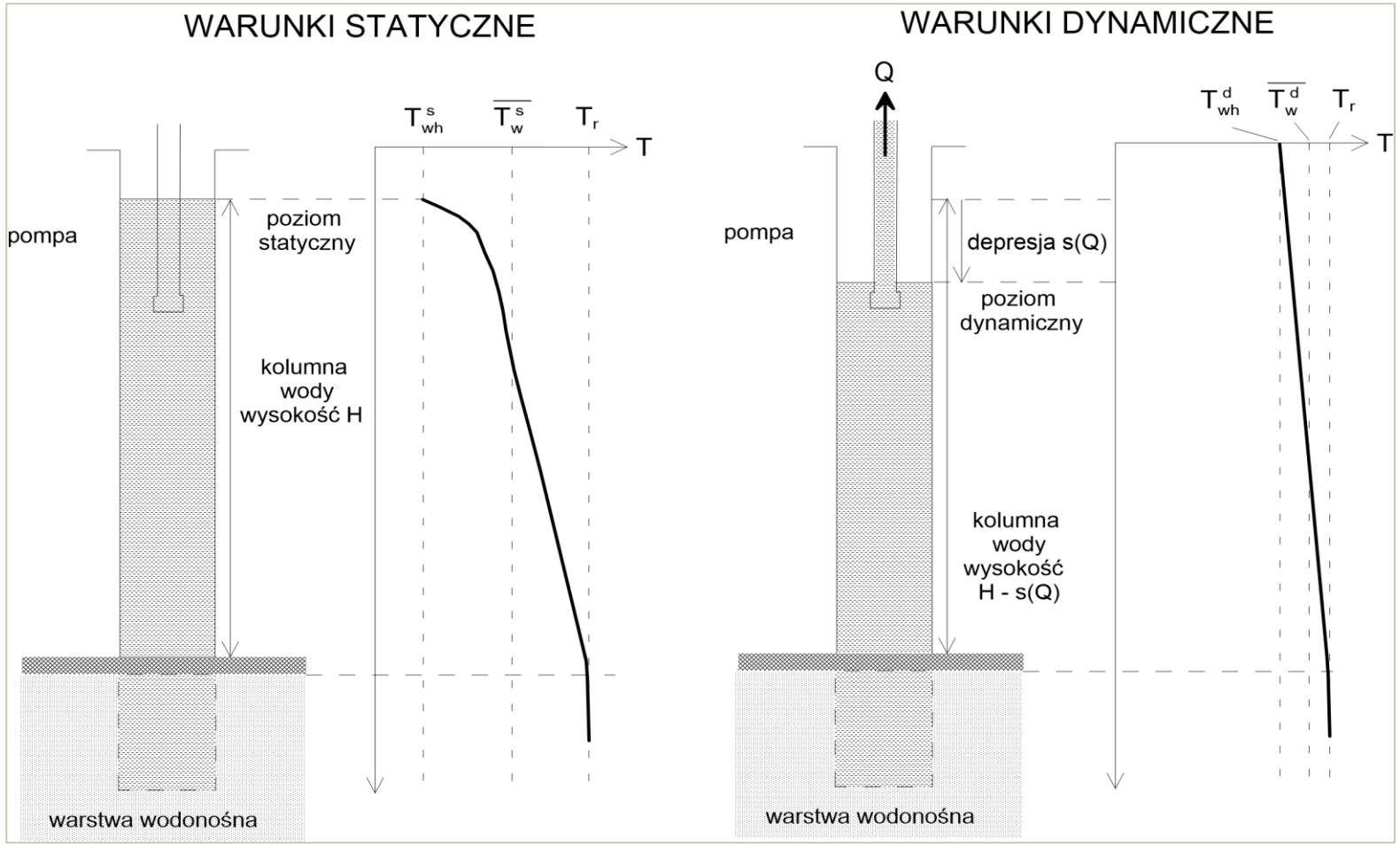
Norway grants

Wykorzystanie języka Python do eliminacji efektu termodźwigu z danych pomiarowych

Maciej Miecznik, Karol Pierzchała
IGSMiE PAN

GeoModel konferencja końcowa, Warszawa, 22.01.2025

Profil temperatury otworu w stanie statycznym i dynamicznym



Wpływ pompowania otworu na temperaturę wody w kolumnie rur okładzinowych (Miecznik 2017, na podst. Kawecki 1995).

Znaczenie efektu termodźwigu (ang. thermal lift effect)

Woda podlega ekspansji objętościowej wraz ze wzrostem temperatury

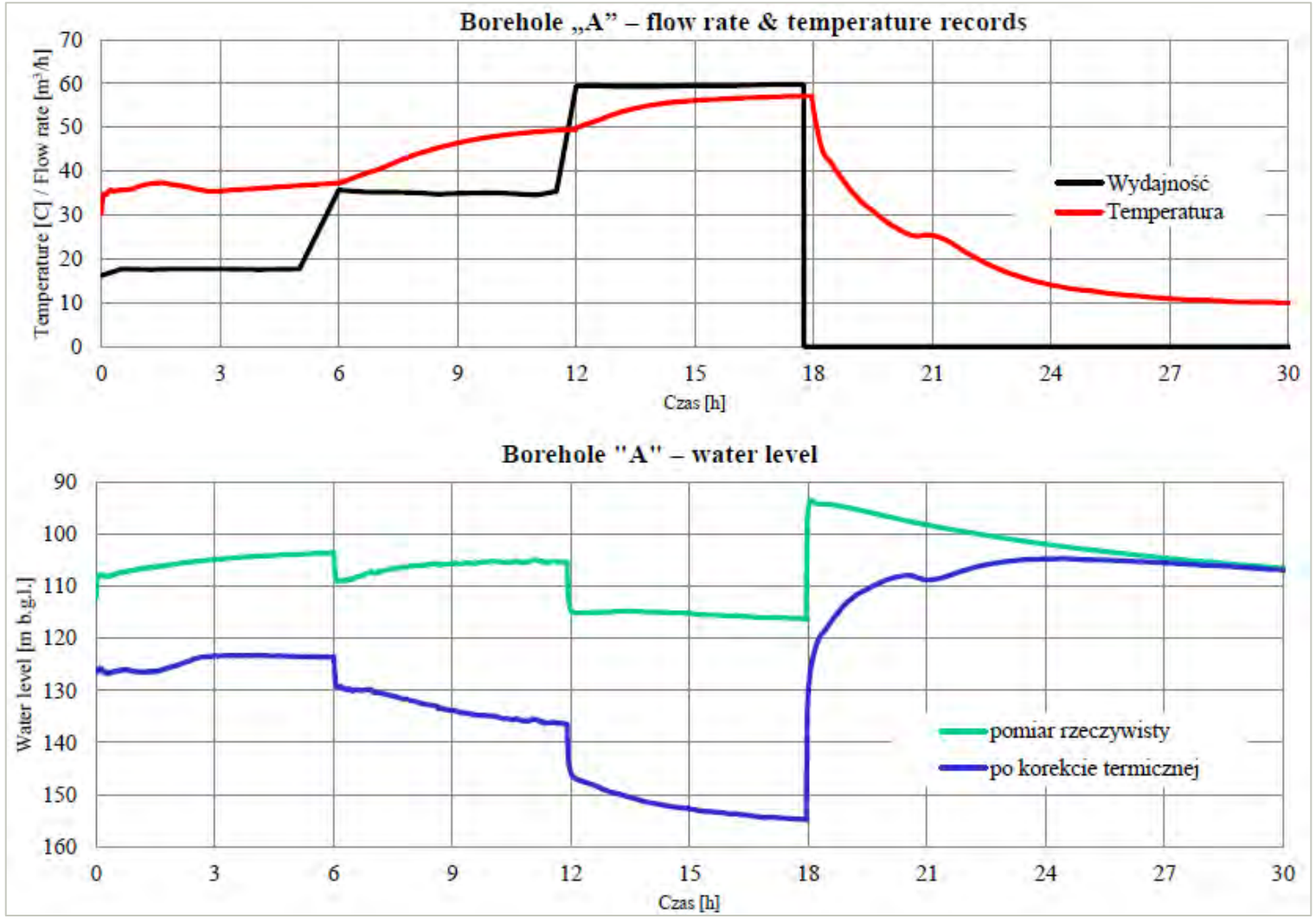
Skutkuje to wyższym ciśnieniem rejestrowanym na głowicy / poziomem lustra wody podczas pompowania

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 nierzeczywistych właściwości hydraulicznych złoża

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

Przykład surowych danych z pompowania testowego



Procedura obliczeniowa

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).

Procedura obliczeniowa

Choć, w ogólności, gęstość wody jest funkcją nieliniową temperatury, to w zakresie temperatur od 40 do 95°C (temperatura wód geotermalnych w Polsce) można uznać, że przybliżenie funkcją liniową jest wystarczająco dokładne. Po kilku przekształceniach dochodzi się do zależności:

$$\overline{\rho_w} = \rho_w\left(\overline{T_w}\right) \qquad (2)$$

Wstawiając równanie 2 do równania 1 otrzymujemy:

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

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).

Procedura obliczeniowa

Ciśnienie mierzone na dnie otworu w warunkach statycznych jest następujące:

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

gdzie:

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

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

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

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

gdzie:

p_r – ciśnienie na dnie otworu w warunkach dynamicznych,

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

Procedura obliczeniowa

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

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

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:

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

Procedura obliczeniowa – ciśnienie zredukowane dla studni artezyjskich

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

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

Procedura obliczeniowa – zredukowany poziom lustra wody w otworach subartezyjskich

Zmierzona głębokość do lustra wody

$$h_m = h_{pump} - \frac{p - p_{atm}}{g \cdot \rho_w}$$

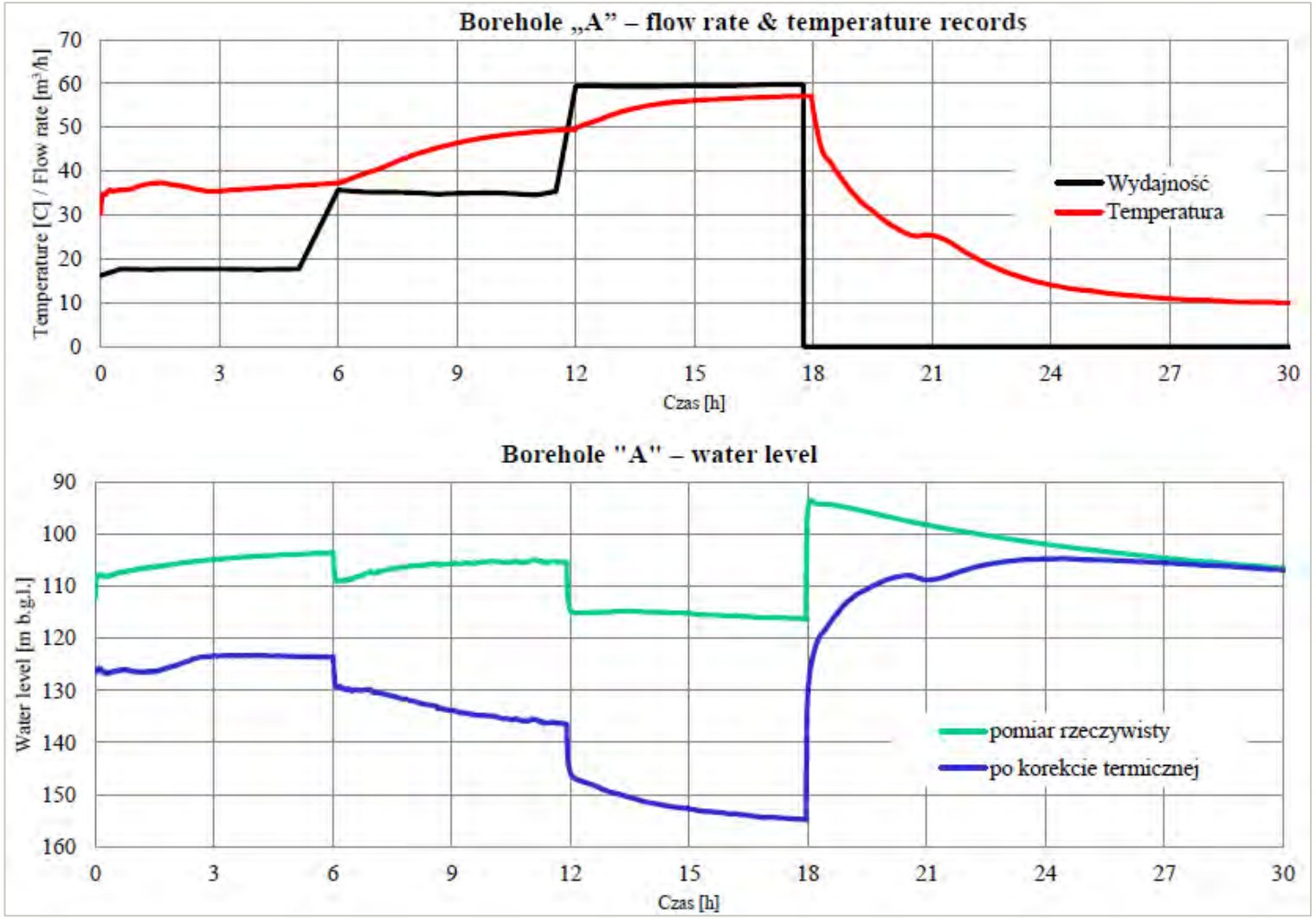
Zredukowany poziom lustra wody

$$h_{red} = h_m + \left(1 - \frac{\rho_w(\overline{T_w^d})}{\rho_w(\overline{T_w^s})}\right) \cdot H_{MD}$$

Faktyczna depresja

$$s_{red} = h_{red} - h_{red,min}$$

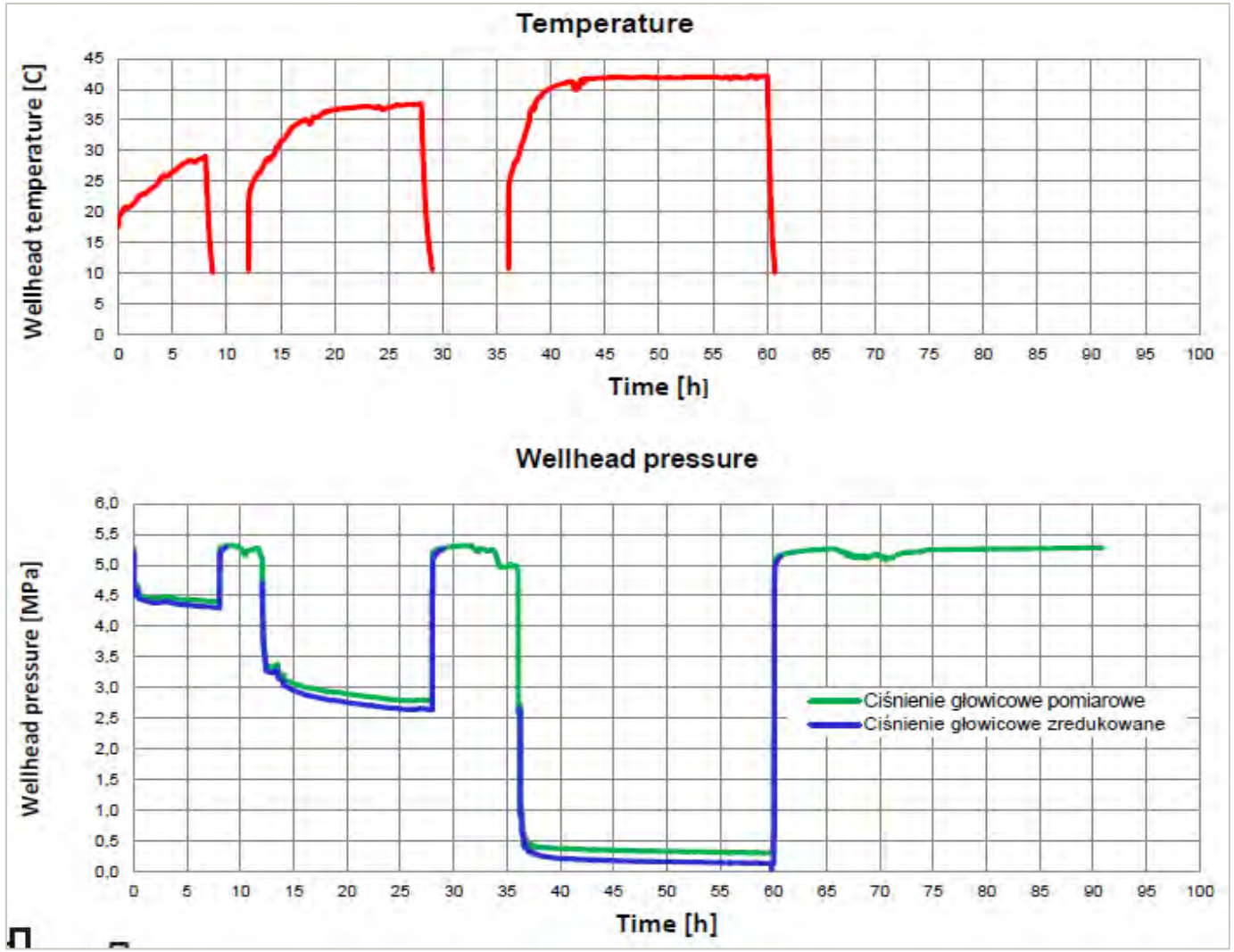
Przykład z początku prezentacji



Pierwotnie:
$k \cdot h = 1{,}86 \cdot 10^{-3}$ m²/s

Po korekcie:
$k \cdot h = 4{,}12 \cdot 10^{-4}$ m²/s

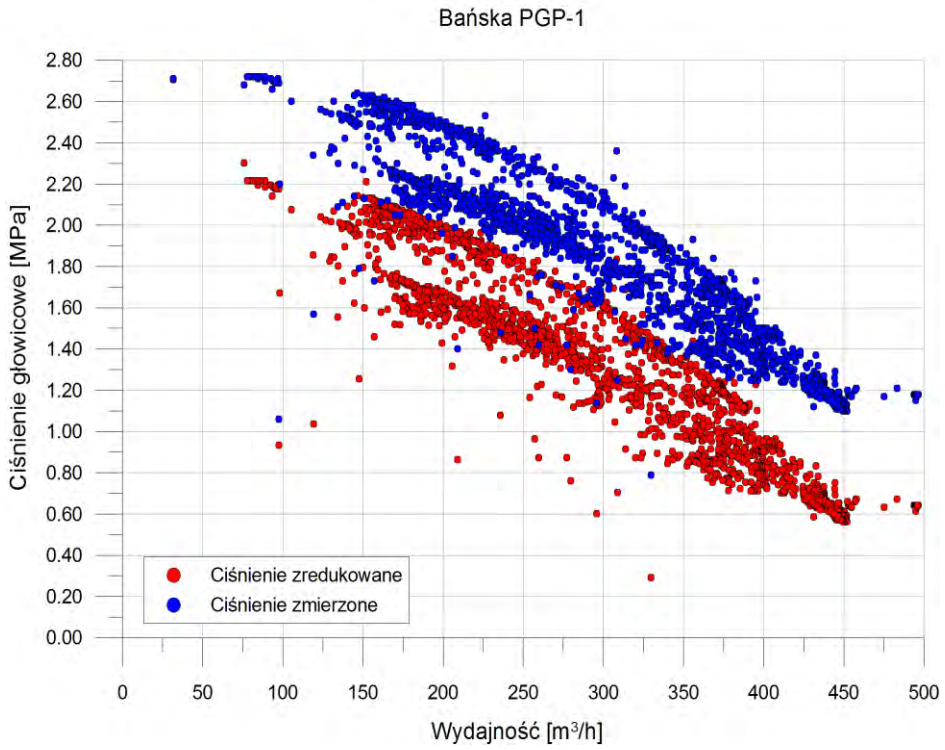
Inny przykład:

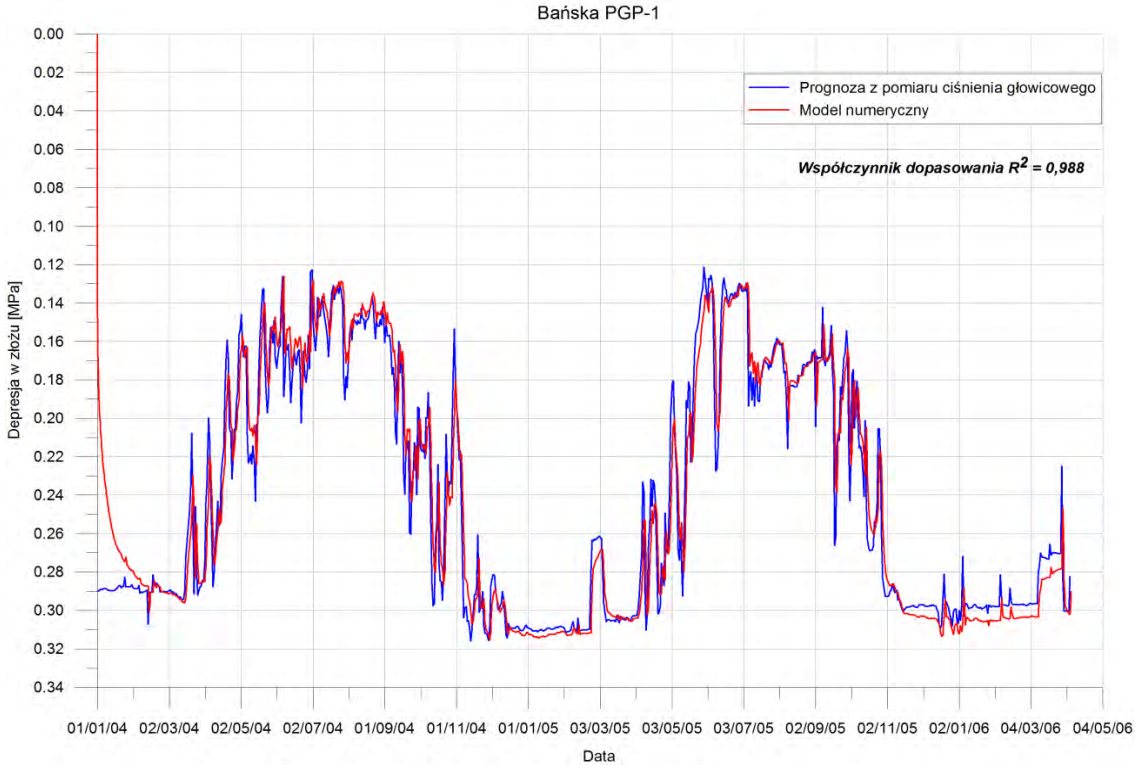


Pierwotnie:
$k \cdot h = 7{,}67 \cdot 10^{-5}\ m^2/s$

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

Kolejny przykład:





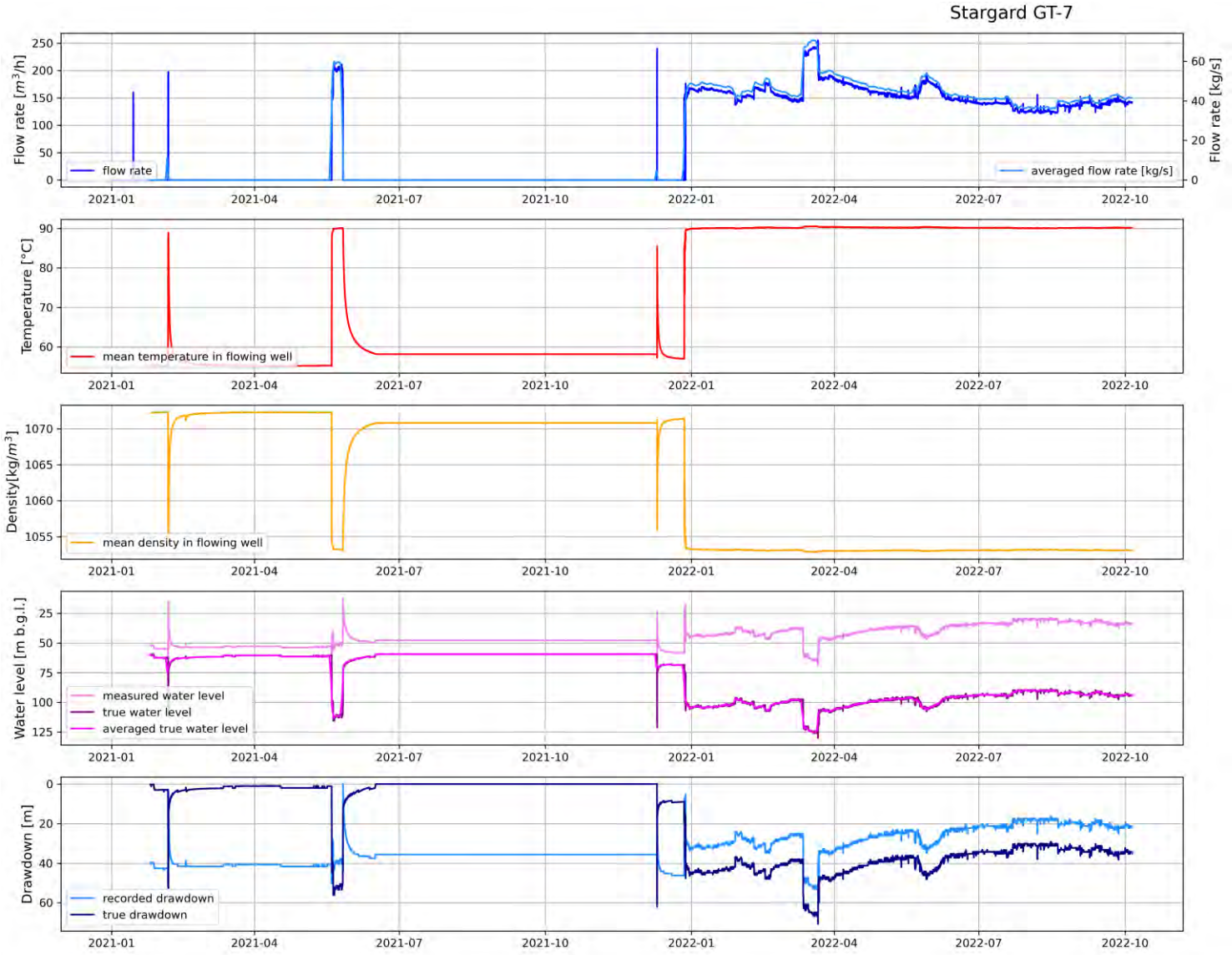
Źródło: Miecznik M., 2017 – Model zrównoważonej eksploatacji zbiornika wód geotermalnych w centralnej części Podhala do produkcji energii cieplnej i elektrycznej. Studia, Rozprawy, Monografie 202, Wyd. IGSMiE PAN. Dane pozyskane od Geotermii Podhalańskiej S.A.

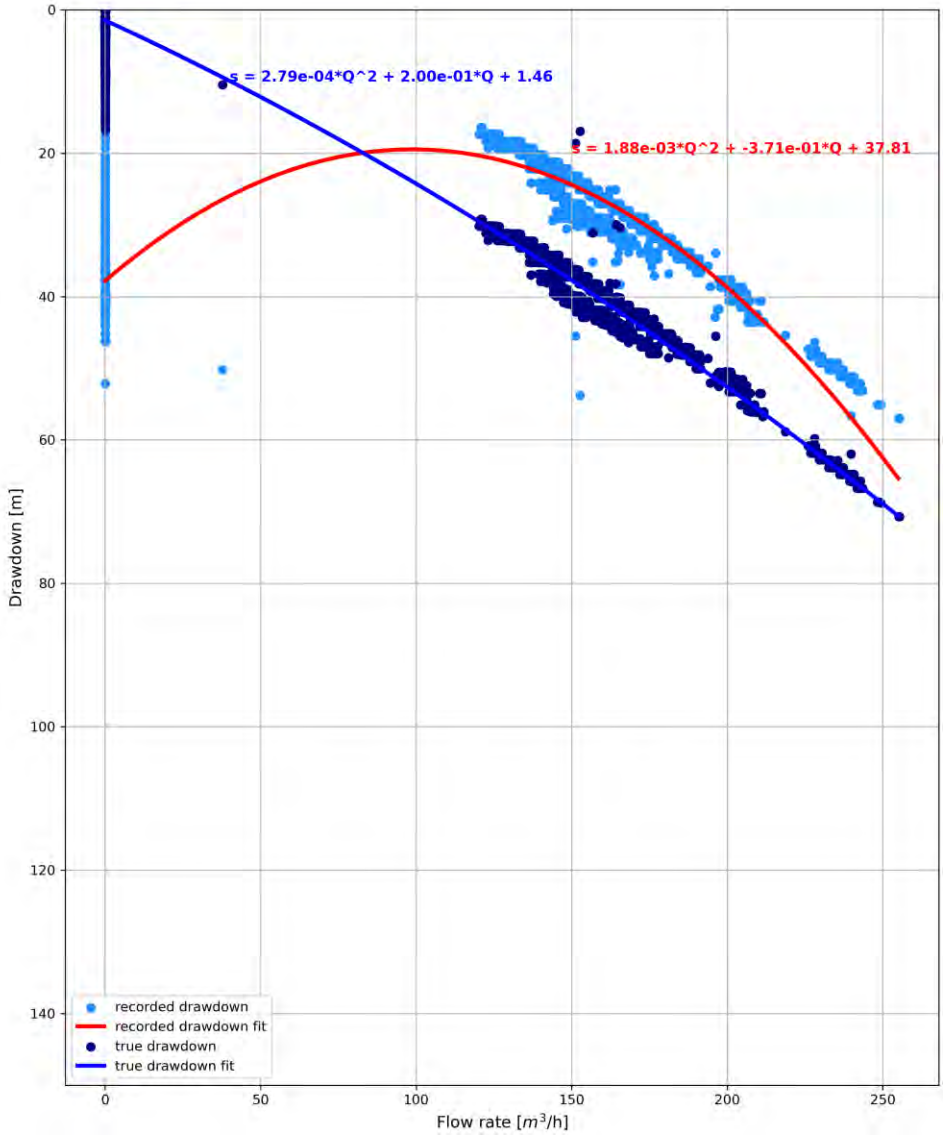
Narzędzie Thermalift: fragmenty kodu

```
"""
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
```

```
class Well():

    def __init__(self, df, name = '', salinity = 0.0):
        self.df = df
        self.name = name
        self.salinity = salinity

# Calculate mean static temperature in the water column
# Well not pumped
    def temp_static(self, df):
        return df.iloc[:,1].mean()

# Calculate mean temperature in the flowing well
    def temp_flowing(self, df1, n1, df2, n2):
        return (df1.iloc[:,n1].max() + df2.iloc[:,n2])/2 #

# Calculate mean water column density in a non-flowing well
    def dens_static(self, temp_static, salinity):
        return brine_density.brine_density(temp_static, salinity)

# Calculate mean water column density in a flowing well
    def dens_dynamic(self, mean_temp_flowing, salinity):
        return brine_density.brine_density(mean_temp_flowing, salinity)

# Convert pressure records to water level
    def water_level(self, pressure_level, flow_dens, probe_depth, atmo_pressure):
        water_level = probe_depth - (pressure_level*1E5-atmo_pressure)/(9.81*flow_dens)
        return water_level

# Calculate measured drawdown
    def measured_drawdown(self, water_level):
        rec_drawdown = water_level - water_level.min()
        return rec_drawdown

# Calculate the true water level, after eliminating thermal lift
    def true_water_level(self, water_level, flow_dens, stat_dens, depth_max):
        true_water_level = water_level+(1-flow_dens/stat_dens)*depth_max
        return true_water_level
```

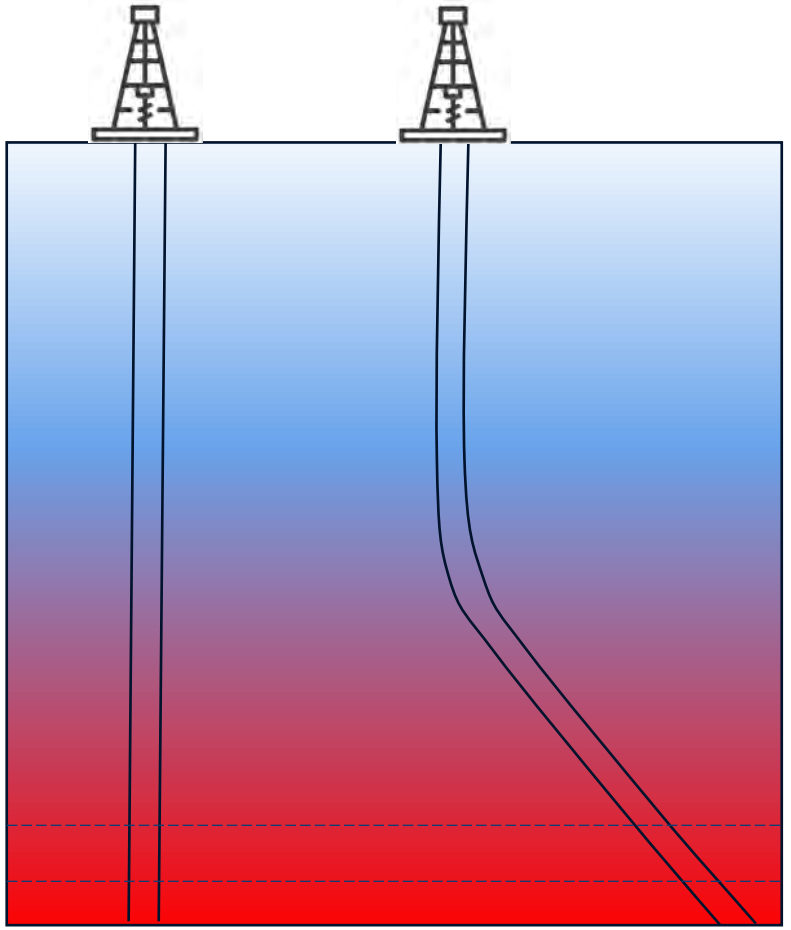
Narzędzie Thermalift – przykład zastosowania



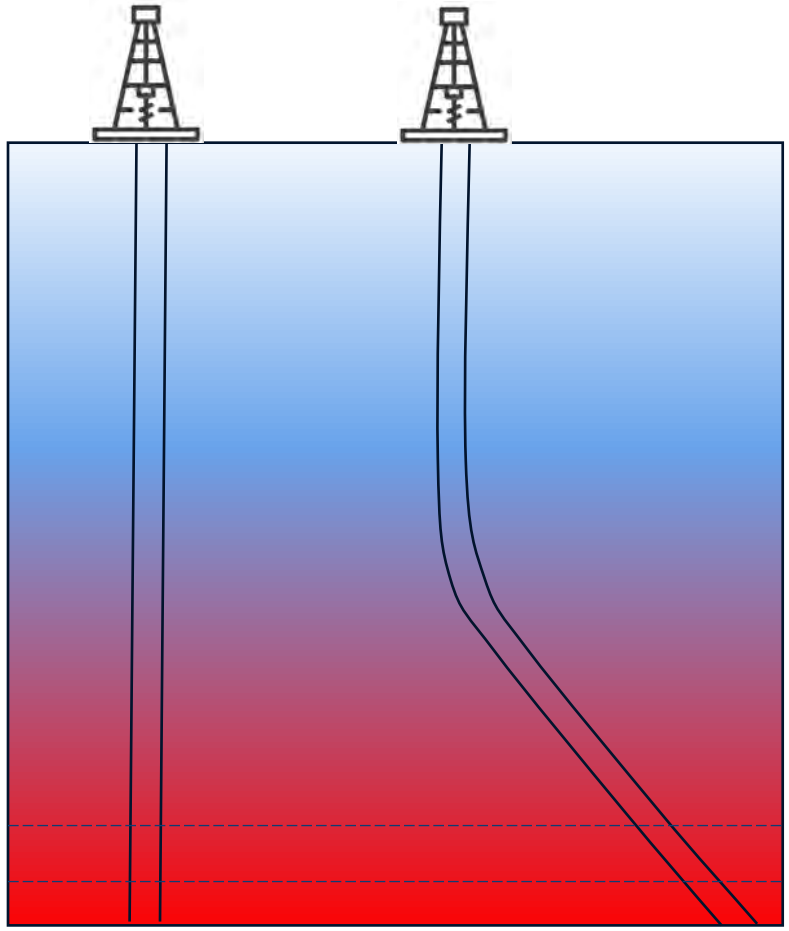


Narzędzie Thermalift - możliwości

- Możliwość wykorzystania w obliczeniach dla otworach pionowych i kierunkowych
- Obliczenia gęstości wód słodkich i silnie zmineralizowanych (obecnie do 160 g/dm^3)
- Tworzenie rozbudowanych wykresów
- Obliczanie oporów przepływu podczas eksploatacji – w warstwie wodonośnej (przepływ laminarny), jak i w otworze (przepływ turbulentny)
- Wygładzanie, czyli uśrednianie danych po zadanym okresie czasu (np. min., godz., tydz., msc.)
- Konwersja formatu daty
- Eksport wykresów i obliczeń do plików.



Dziękuję za uwagę.

www.geomodel.pl
miecznik@min-pan.krakow.pl

Projekt „Optymalne zarządzanie niskotemperaturowymi złożami geotermalnymi – polsko-islandzka współpraca w zakresie modelowania złóż” (2022-2025) jest finansowany w ramach Funduszu Współpracy Dwustronnej za pośrednictwem MF Europejskiego Obszaru Gospodarczego (MF EOG) i Norweskiego Mechanizmu Finansowego (NMF) 2014-2021, Program Środowisko, Energia i Zmiany Klimatu. Umowa nr 2/UoD/FWD/2022.