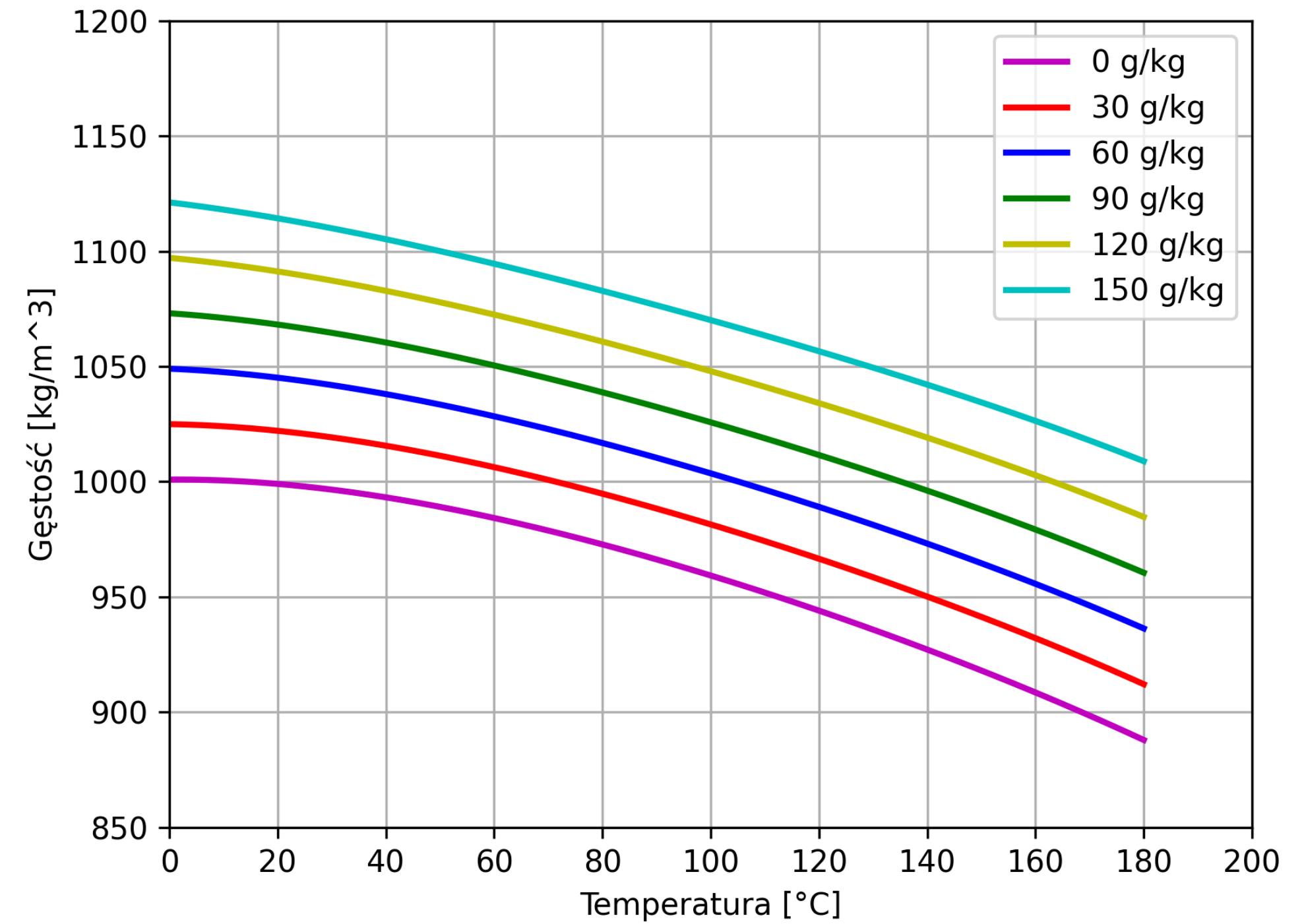
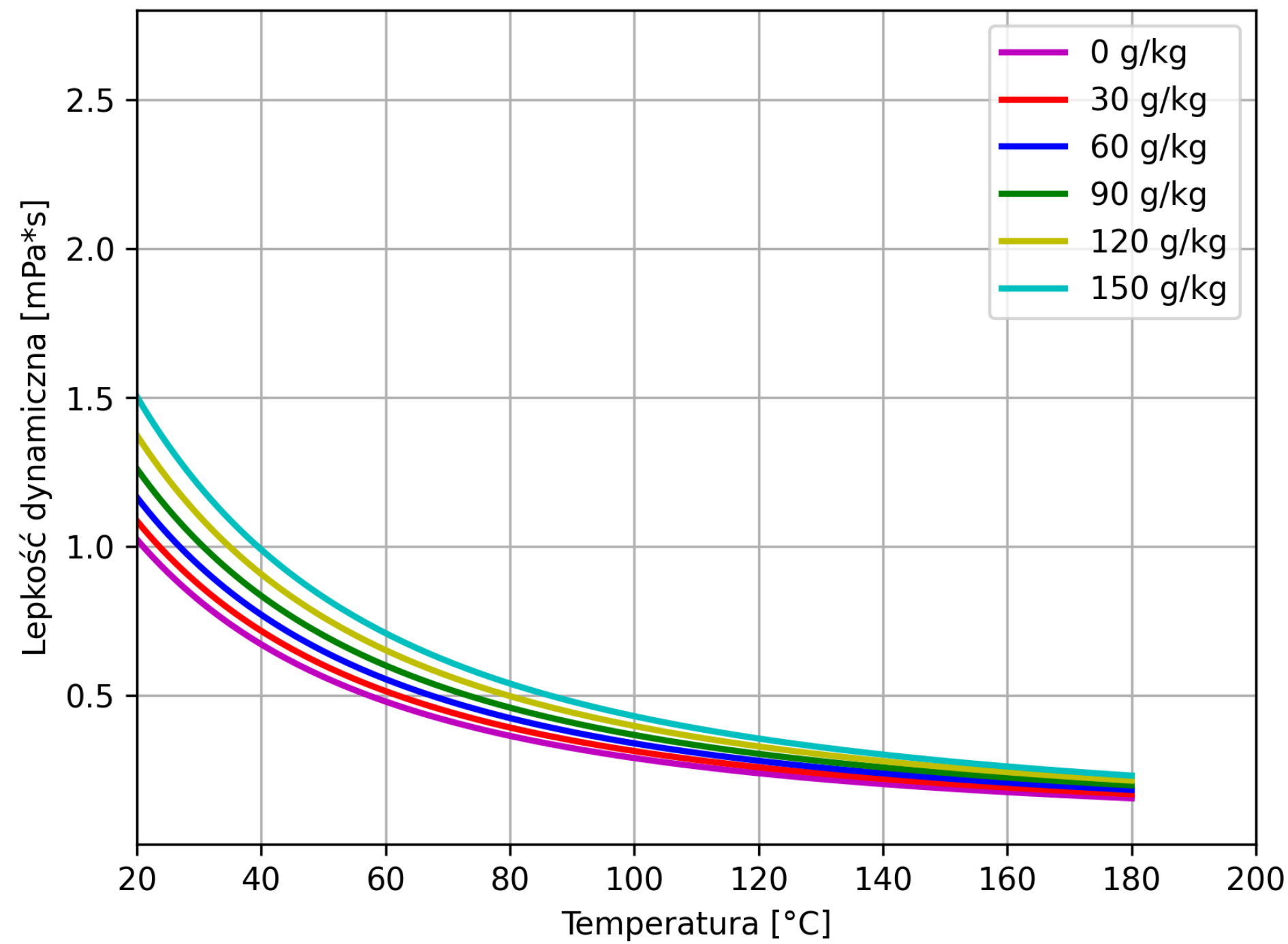


Obniżanie temperatury zatłaczania a wzrost ciśnienia zatłaczania w otworach geotermalnych

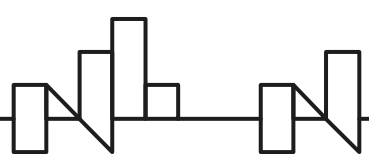
(Lowering injection temperature vs increased injection pressure in geothermal wells)

Maciej Miecznik
MEERI PAS

Lepkość dynamiczna, gęstość wody/solanki



<https://geomodel.pl/parametry-termofizyczne-wody-zasolonej/>



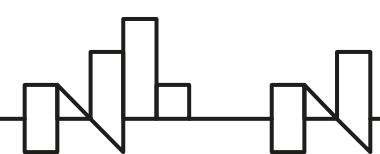
Wzrost oporów przepływu w zbiorniku geotermalnym spowodowany obniżoną temperaturą zatłaczania

Zakładamy, że przepływ w złożu ma charakter laminarny, zatem można skorzystać z równania Darcy'ego:

$$Q = -\frac{K}{A\mu} \frac{\Delta p}{\Delta l} \quad (1)$$

gdzie:

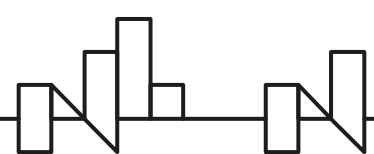
- Q – wydajność (strumień objętościowy) zatłaczania,
- A – powierzchnia prostopadła do wektora prędkości zatłaczanej wody,
- K – przepuszczalność ośrodka,
- μ – współczynnik lepkości dynamicznej,
- Δp – przyrost ciśnienia związany z zatłaczaniem,
- Δl – odcinek na którym następuje zmiana ciśnienia.



Wzrost oporów przepływu w zbiorniku geotermalnym spowodowany obniżoną temperaturą zatłaczania

$$Q = - \frac{K}{A\mu} \frac{\Delta p}{\Delta l} \quad (1)$$

- ❑ Parametry takie jak K , A , czy Δl nie ulegają zmianie podczas zatłaczania wody o innej temperaturze
- ❑ Zmieniają się parametry Δp , μ oraz Q
- ❑ Zmiana temperatury pociąga za sobą zmianę gęstości wody, a przez to zmienia się również strumień objętościowy, chociaż strumień masowy \dot{m} pozostaje bez zmiany. Zmienia się również wartość lepkości dynamicznej płynu.



Wzrost oporów przepływu w zbiorniku geotermalnym spowodowany obniżoną temperaturą zatłaczania

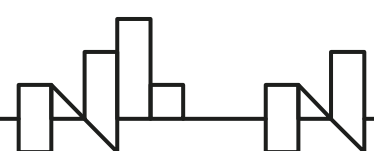
Można więc zapisać równość, będącej przekształceniem równania Darcy'ego, dla sytuacji w której zatłaczane są 2 płyny o takim samym strumieniu masowym, ale w różnej temperaturze:

$$\frac{Q_1 \mu_1}{\Delta p_1} = \frac{Q_2 \mu_2}{\Delta p_2} \quad (2)$$

gdzie indeksy 1 i 2 oznaczają dwa różne stany termodynamiczne zatłaczanej cieczy.

Zależność pomiędzy strumieniem masowym \dot{m} a strumieniem objętościowym Q jest następująca:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (3)$$



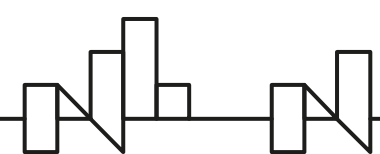
Wzrost oporów przepływu w zbiorniku geotermalnym spowodowany obniżoną temperaturą zatłaczania

Z połączenia równań 2 i 3 można wyprowadzić zależność:

$$\frac{\dot{m}\mu_1}{\rho_1\Delta p_1} = \frac{\dot{m}\mu_2}{\rho_2\Delta p_2} \quad (4)$$

Po przekształceniu równania 4 otrzymuje się równanie 5, wyrażające zależność pomiędzy ciśnieniem zatłaczania cieczy o temperaturze T_2 , znając ciśnienie zatłaczania w temperaturze T_1 .

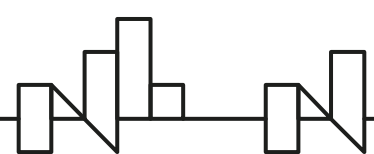
$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \frac{\rho_1 \mu_2}{\rho_2 \mu_1} \quad (5)$$



Wzrost oporów przepływu w zbiorniku geotermalnym spowodowany obniżoną temperaturą zatłaczania

Ponieważ zmiana gęstości cieczy wraz ze zmianą temperatury jest znacznie mniejsza niż zmiana jej lepkości dynamicznej, równanie 5 można w uproszczonej postaci zapisać:

$$\Delta p_2 \approx \Delta p_1 \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (6)$$



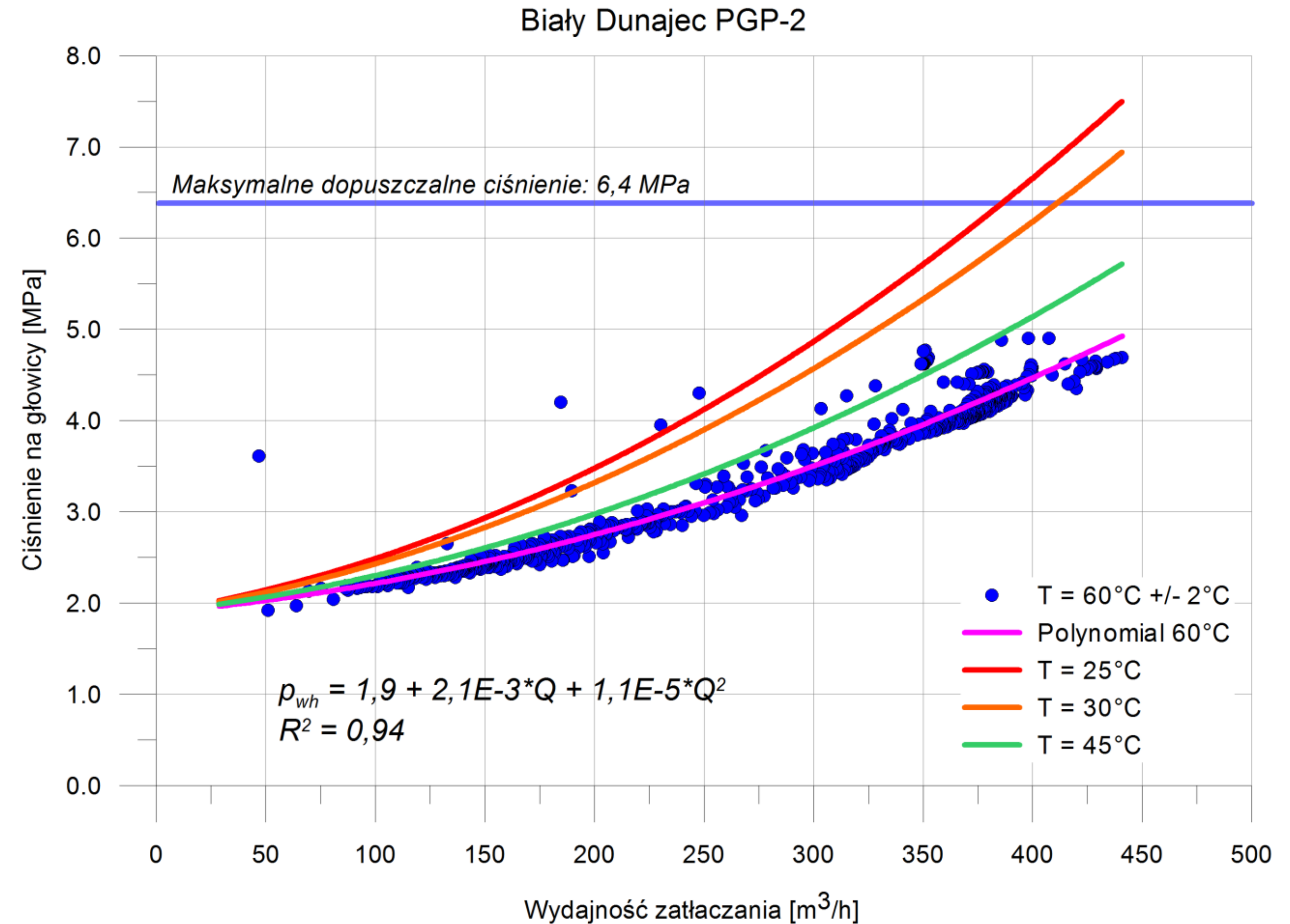
Przykład

- ❑ Otwór chłonny Biały Dunajec PGP-2
- ❑ Wykres prezentuje ciśnienie rejestrowane na głowicy otworu, podczas zatłaczania wody o temperaturze $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- ❑ Kształt krzywej ciśnienia na głowicy otworu można opisać wielomianem 2-go stopnia:

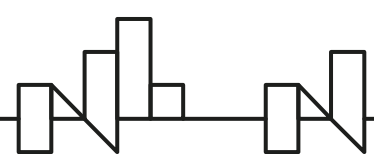
$$\Delta p = p_{wh} - p_{wh,0} = BQ + CQ^2 \quad (7)$$

gdzie:

- p_{wh} – ciśnienie dynamiczne rejestrowane na głowicy otworu,
- $p_{wh,0}$ – ciśnienie statyczne na głowicy otworu,
- B – liniowy współczynnik strat ciśnienia w otworze i warstwie wodonośnej,
- C – nieliniowy współczynnik strat ciśnienia w otworze,
- Q – wydajność otworu.



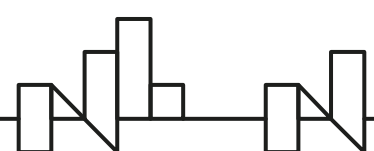
Symulacja ciśnienia zatłaczania w funkcji temperatury wody geotermalnej na głowicy otworu Biały Dunajec PGP-2 (na podst. danych monitoringu z okresu I 2008–XI 2015)
Źródło: Miecznik 2017 na podst. danych udostępnionych przez PEC Geotermię Podhalańską S.A.



Przykład

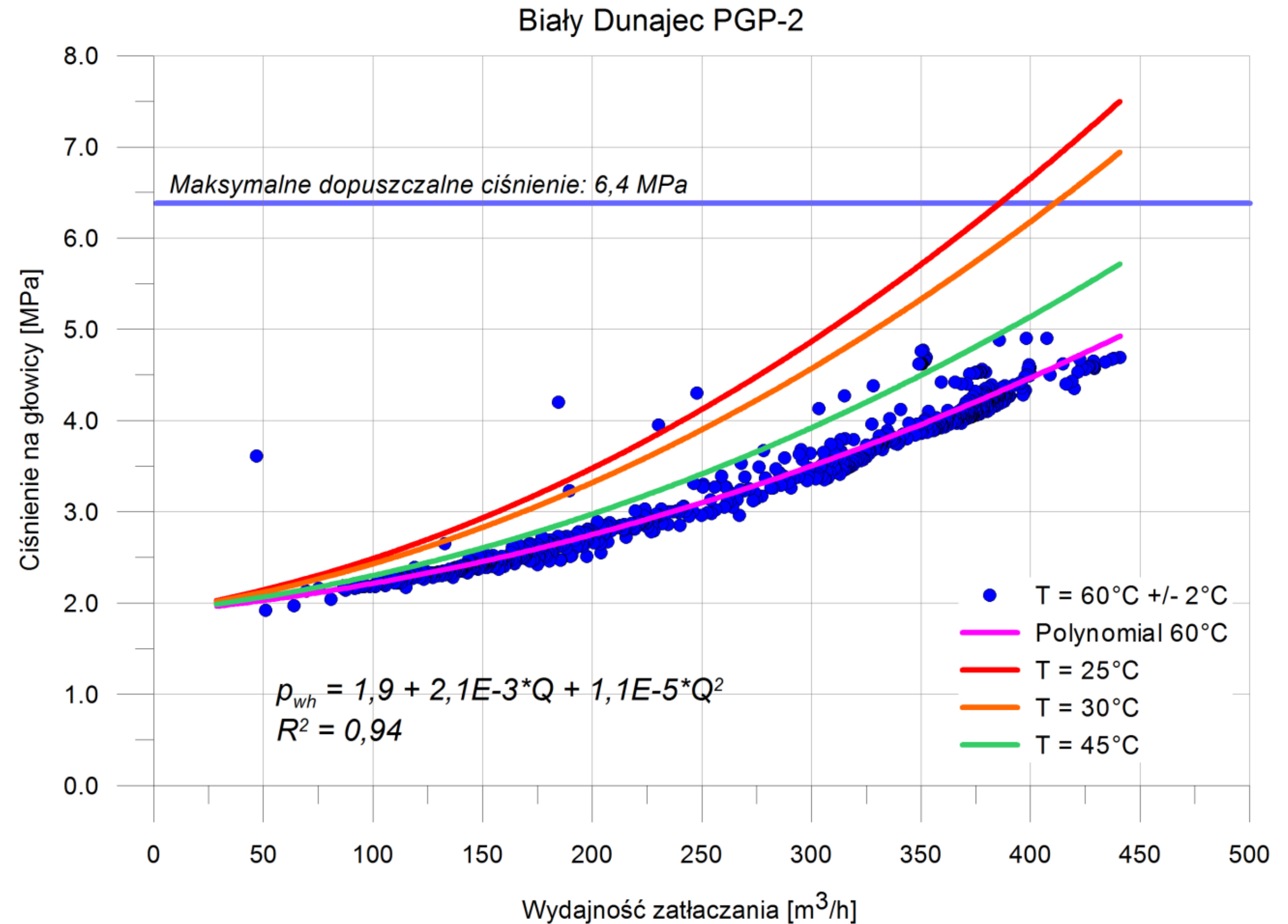
Podstawiając rów. 7 do rów. 5, otrzymuje się zależność 8, która pozwala wyznaczyć ciśnienie zatłaczania schłodzonej wody geotermalnej o temperaturze innej od dotychczasowej. Równanie 8 obejmuje zarówno opory przepływu w złożu (charakter laminarny – wsp. B) oraz opory przepływu w otworze (charakter turbulentny – wsp. C)

$$p_{wh,2} = \Delta p_2 + p_{wh,0} = \Delta p_1 \frac{\rho_1 \mu_2}{\rho_2 \mu_1} + p_{wh,0} = (BQ + CQ^2) \frac{\rho_1 \mu_2}{\rho_2 \mu_1} + p_{wh,0} \quad (8)$$

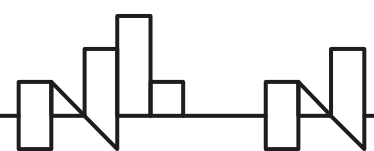


Przykład

- $T_1 = 60^\circ\text{C}$ (średnia dotychczasowa temperatura zatlaczania)
- $T_2 = 45^\circ\text{C}$ (przyjęty poziom schłodzenia wód w nowych warunkach),
- $p = 26 \text{ MPa}$ (średnie ciśnienie wody w otworze Biały Dunajec PGP-2 w interwale zatlaczania),
- $\rho_1 (T_1 = 60^\circ\text{C}, p = 26 \text{ MPa}) = 994,2 \text{ kg/m}^3$,
- $\rho_2 (T_2 = 45^\circ\text{C}, p = 26 \text{ MPa}) = 1001,2 \text{ kg/m}^3$,
- $\mu_1 (T_1 = 60^\circ\text{C}, p = 26 \text{ MPa}) = 4,72 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- $\mu_2 (T_2 = 45^\circ\text{C}, p = 26 \text{ MPa}) = 6,00 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- $Q = 500 \text{ m}^3/\text{h} = 0,139 \text{ m}^3/\text{s}$,
- $B = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^4 \cdot \text{h})$ (z dopasowania na rys.),
- $C = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/\text{m}^7$ (z dopasowania na rys.),
- $\eta_p = 0,75$ (sprawność izentropowa pompy).



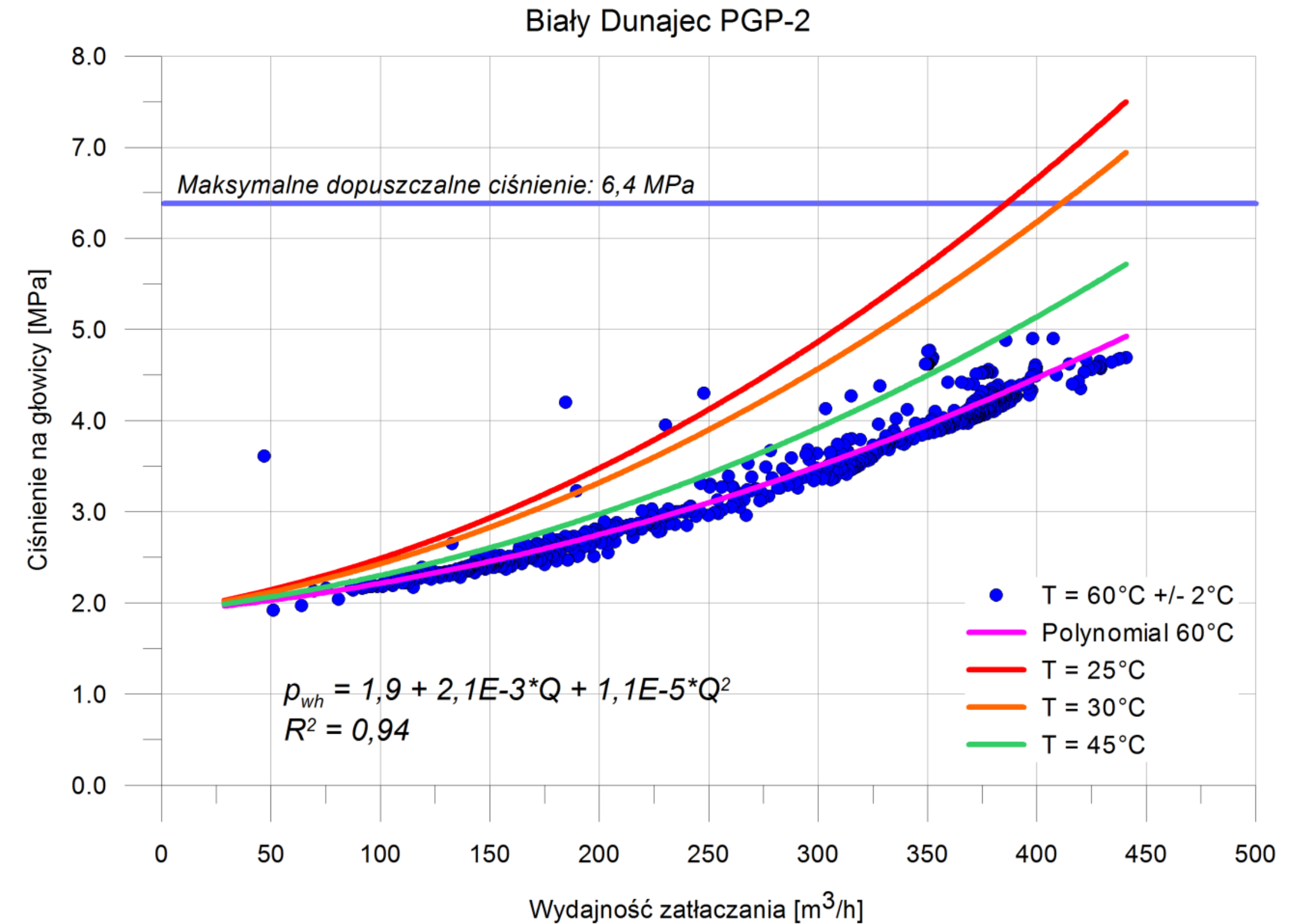
Symulacja ciśnienia zatlaczania w funkcji temperatury wody geotermalnej na głowicy otworu Biały Dunajec PGP-2 (na podst. danych monitoringu z okresu I 2008–XI 2015)
Źródło: Miecznik 2017 na podst. danych udostępnionych przez PEC Geotermię Podhalańską S.A.



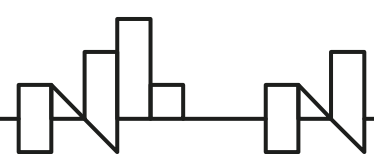
Przykład

Po podstawieniu wartości do równania 8:

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_{wh,2} - p_{wh,1} = (BQ + CQ^2) \frac{\rho_1 \mu_2}{\rho_2 \mu_1} + p_{wh,0} - (p_{wh,0} + BQ + CQ^2) = \\ &= (BQ + CQ^2) \left(\frac{\rho_1 \mu_2}{\rho_2 \mu_1} - 1 \right) \\ &= \left(2,1 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m^4 \cdot h} \cdot 500 \frac{m^3}{h} + 1,1 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m^7} \right. \\ &\quad \cdot \left. \left(500 \frac{m^3}{h} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{994,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 6,00 \cdot 10^{-4} Pa \cdot s}{1001,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 4,72 \cdot 10^{-4} Pa \cdot s} - 1 \right) \cdot 10^6 \\ &= 1,0 MPa \end{aligned}$$



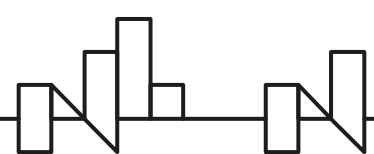
Symulacja ciśnienia zatlaczania w funkcji temperatury wody geotermalnej na głowicy otworu Biały Dunajec PGP-2 (na podst. danych monitoringu z okresu I 2008–XI 2015)
 Źródło: Miecznik 2017 na podst. danych udostępnionych przez PEC Geotermię Podhalańską S.A.



Przykład

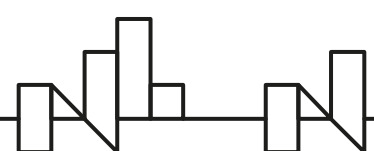
Szacowany wzrost mocy pomp zatłaczających przy zatłaczaniu wody schłodzonej z 60 do 45°C i strumieniu 500 m³/h (dla tego konkretnego otworu):

$$\Delta P_p = \frac{Q \Delta p}{\eta_p} = \frac{0,139 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 0,997 \cdot 10^6 \text{ Pa}}{0,75} = 184,7 \text{ kW}$$



Wnioski

- 1) Obniżenie temperatury zatłaczania jest korzystne ze względu na zwiększony odbiór ciepła ze zbiornika geotermalnego. Zwiększa się moc grzewcza.
- 2) Obniżenie temperatury zatłaczania powoduje wzrost oporów przepływu => ciśnienia zatłaczania => wzrost konsumpcji energii przez pompy zatłaczające
- 3) Należy przekalkulować, co jest bardziej opłacalne
- 4) Udrożnienie strefy przyotworowej może zminimalizować „negatywny” efekt zwiększonego ciśnienia zatłaczania, spowodowanego wyższą lepkością dynamiczną wody przy obniżonej temperaturze zatłaczania.



Dziękuję za uwagę



Mineral and Energy
Economy Research
Institute
Polish Academy of Sciences

Maciej Miecznik

miecznik@min-pan.krakow.pl

<https://min-pan.krakow.pl/>

<http://user4geoenergy.net/>

