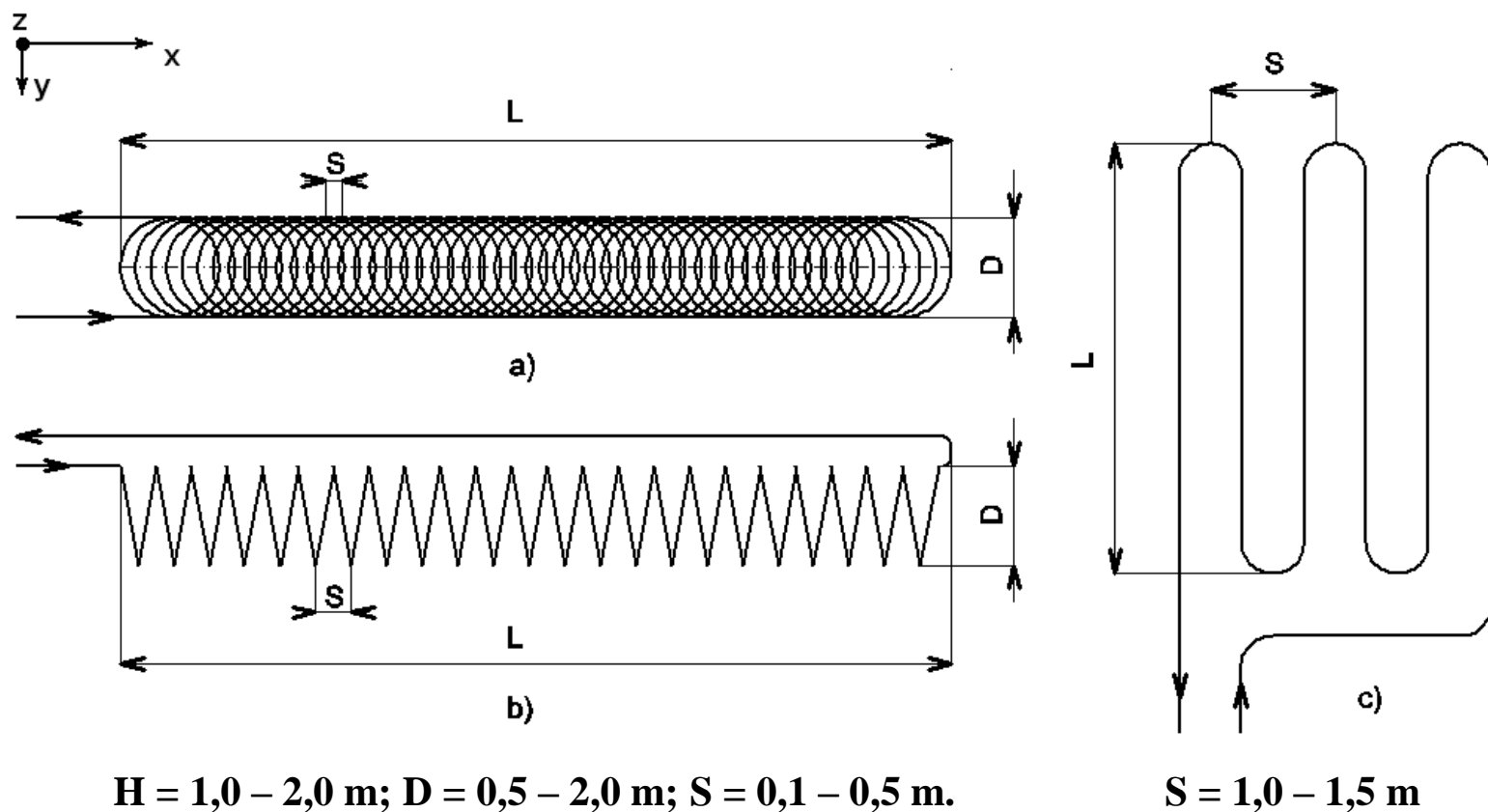


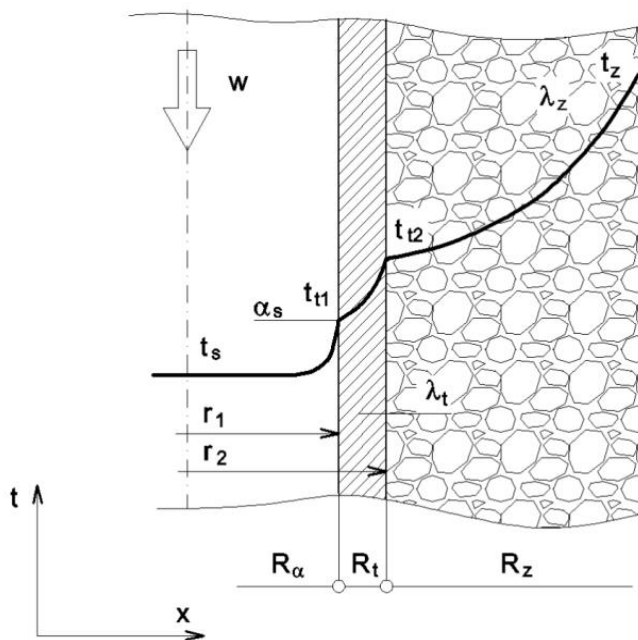
VÝSLEDKY OVĚŘOVÁNÍ ZEMNÍHO MASIVU JAKO ZDROJE ENERGIE PRO TEPELNÁ ČERPADLA

**Radomír Adamovský
Pavel Neuberger**

**Technická fakulta České zemědělské
univerzity v Praze**



Obr. 1. Konfigurace horizontálních zemních tepelných výměníků
a). Typ Slinky; b) Šroubovitý; c) Lineární.



Obr. 2. Schéma procesů sdílení tepla.

Celkový tepelný odpor R .

$$R = R_z + R_t + R_\alpha \quad (\text{m.K/W}) \quad (1)$$

Tepelný odpor zemního masivu R_z .

$$R_z = \frac{1}{2\pi\lambda_z} \cdot \ln \left[\frac{2s}{\pi d_2} \sinh \left(2\pi \frac{h}{s} \right) \right] \quad (\text{m.K/W}) \quad (2)$$

Tepelný odpor stěny trubky výměníku R_t .

$$R_t = \frac{1}{\lambda_t} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (\text{m.K/W}) \quad (3)$$

Tepelný odpor konvekcí R_α na vnitřní straně trubky.

$$R_\alpha = \frac{1}{2\pi r_1 \alpha_s} \quad (\text{m.K/W}) \quad (4)$$

λ_z – součinitel tepelné vodivosti zemního masivu (W/m.K);

d_2 – vnější průměr trubek zemního výměníku (m);

h – hloubka uložení trubek zemního výměníku (m);

s – rozteč trubek zemního výměníku (m);

λ_t – součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky výměníku (W/m.K);

d_1, d_2 – vnitřní a vnější průměr trubky výměníku (m);

α_s – součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a teplotonosnou kapalinou (W/m².K).

Faktory ovlivňující výkon zemního výměníku: $R \downarrow \Rightarrow q \uparrow$;

Tepelný odpor zemního masivu R_z (λ_z ; h ; s ; d_2).

λ_z - součinitel tepelné vodivosti zemního masivu (vlhkost, hustota, podíl jílu) (W/m.K)

$\lambda_z \uparrow \Rightarrow R_z \downarrow$; (suchý písek 0,3-1,2 W/m.K, mokrý jíl, 1,6-1,8 W/m.K),

vytvoření ledu, latentní teplo.

h - hloubka uložení trubek zemního výměníku (m)

$h \downarrow \Rightarrow R_z \downarrow$; (omezení vlivu denních výkyvů teplot a vlivu nejnižších teplot v zimě,

uložení pod zámraznou hloubkou, zachycení slunečního záření a tepelných toků z povrchu.

s - rozteč trubek zemního výměníku (m)

$s \uparrow \Rightarrow R_z \downarrow$;

d_2 - vnější průměr trubek zemního výměníku (m); $d_2 \uparrow \Rightarrow R_z \downarrow$;

Tepelný odpor stěny trubky výměníku R_t (λ_t ; d_2/d_1).

λ_t - součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky (Polypropylen 0,22 W/m.K; Polyetylén o

vysoké hustotě (HDPE) 0,45 W/m.K), $\lambda_t \uparrow \Rightarrow R_t \downarrow$;

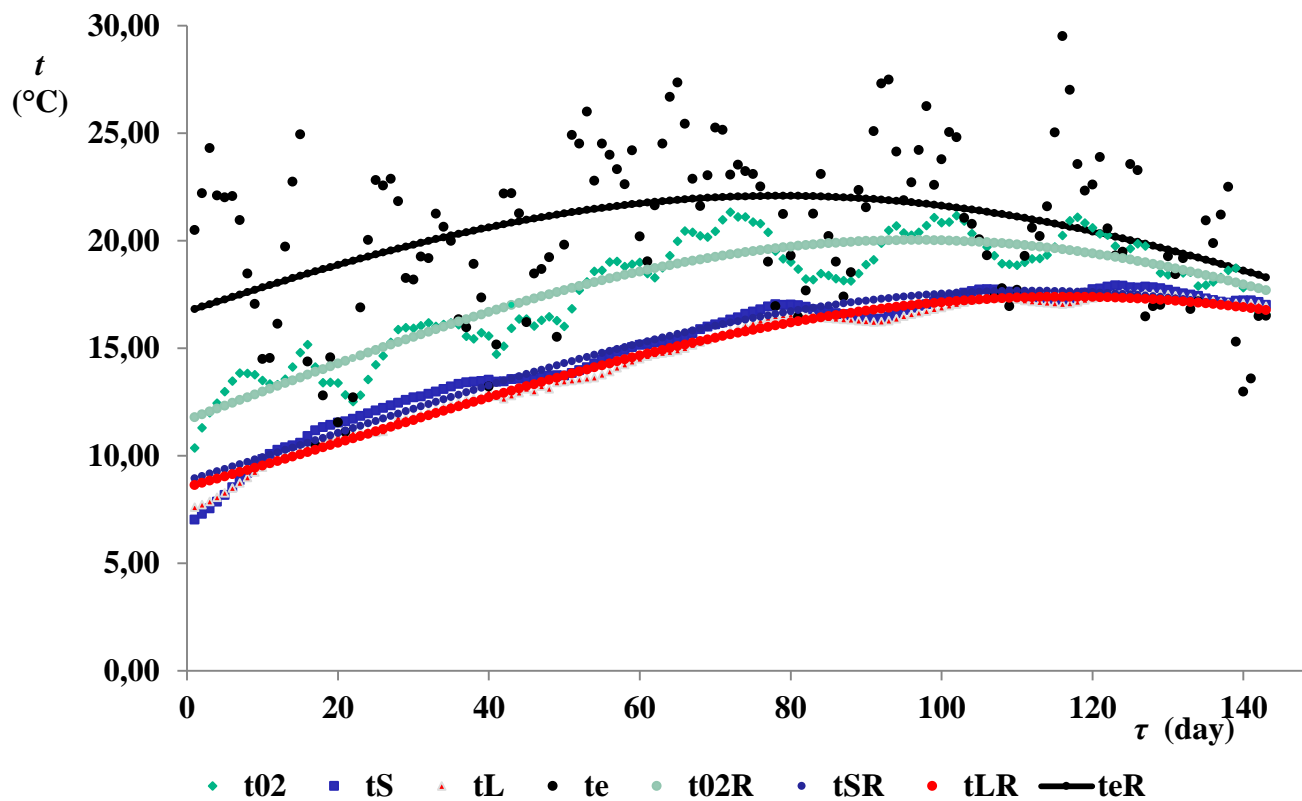
$d_2/d_1 \downarrow \Rightarrow R_t \downarrow$;

Tepelný odpor konvekcí R_α na vnitřní straně trubky (α_s ; d_1).

α_s – součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a teplotonosnou kapalinou (W/m².K); $\lambda_{t,k}$ $\rho_{t,k}$ $\mu_{t,k}$;

Etylenglykol (toxický); Freezium $\mu_{t,k} \downarrow$, $\lambda_{t,k} \uparrow$, $\rho_{t,k}$; $\alpha_s \uparrow \Rightarrow R_\alpha \downarrow$

$d_1 \uparrow \Rightarrow R_\alpha \downarrow$;



Obr. 3 Teploty v období stagnace výměníku 2012 (27. 4. 2012 – 16. 9. 2012, 143 dní).
($t_{e,\phi} = 20,44 \text{ °C}$; $t_{e,max.} = 37,50 \text{ °C}$; $t_{e,min.} = 0,80 \text{ °C}$)

Rovnice teplot půdního masivu v období stagnace výměníku :

$$t_{02} = 12,341 + 7,683 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 6,194\right) \quad I_{02}^2 = 0,869 \quad (^\circ\text{C}) \quad (5)$$

$$t_L = 11,179 + 6,207 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 5,844\right) \quad I_L^2 = 0,989 \quad (^\circ\text{C}) \quad (6)$$

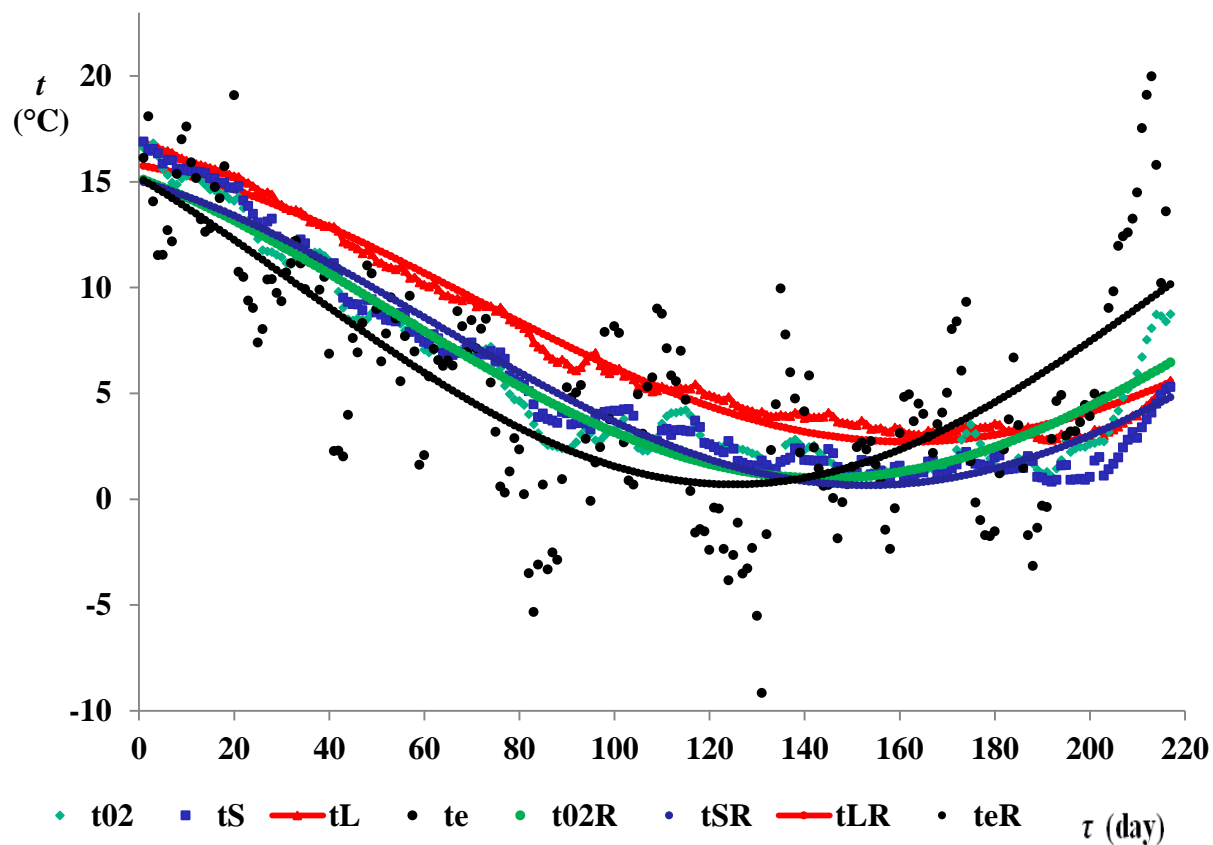
$$t_S = 11,107 + 6,555 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 5,930\right) \quad I_S^2 = 0,972 \quad (^\circ\text{C}) \quad (7)$$

τ - počet dní od počátku stagnace (den).

Schopnost regenerace energetického potenciálu v období stagnace výměníku; počáteční a konečné teploty zemního masivu v oblasti výměníku; snižování teplot zemního masivu na počátku topného období, známkou postupného snižování energetického potenciálu masivu a doby využití masivu jako zdroje pro tepelné čerpadlo.

			Topné období	Datum	Teplota masivu $t_L; t_S$ (°C)	Rozdíl teplot $\Delta t_L; \Delta t_S$ (K)
Horizontalní výměník	Lineární	Začátek topného období	2010 / 2011	30. 8. 2010	17,30	0,18
			2011 / 2012	7. 9. 2011	17,12	
			2012 / 2013	17. 9. 2012	16,88	0,24
		Konec topného období	2010 / 2011	22. 3. 2011	4,55	-0,28
			2011 / 2012	22. 3. 2012	4,83	
			2012 / 2013	22. 4. 2013	5,60	-0,77
	Typ Slinky	Začátek topného období	2010 / 2011	30. 8. 2010	18,40	-0,04
			2011 / 2012	7. 9. 2011	18,44	
			2012 / 2013	17. 9. 2012	16,90	1,54
		Konec topného období	2010 / 2011	22. 3. 2011	4,45	-1,58
			2011 / 2012	22. 3. 2012	6,03	
			2012 / 2013	22. 4. 2013	5,30	0,73

Tab.I Průměrné denní teploty zemního masivu na začátcích a konci topných období.



Obr. 4 Teploty v topném období 2012/2013 (17. 9. 2012 – 22. 4. 2013, 217 dní).
 $(t_{e,\phi} = 5,47 \text{ }^\circ\text{C}; t_{e,max.} = 28,60 \text{ }^\circ\text{C}; t_{e,min.} = -15,80 \text{ }^\circ\text{C})$

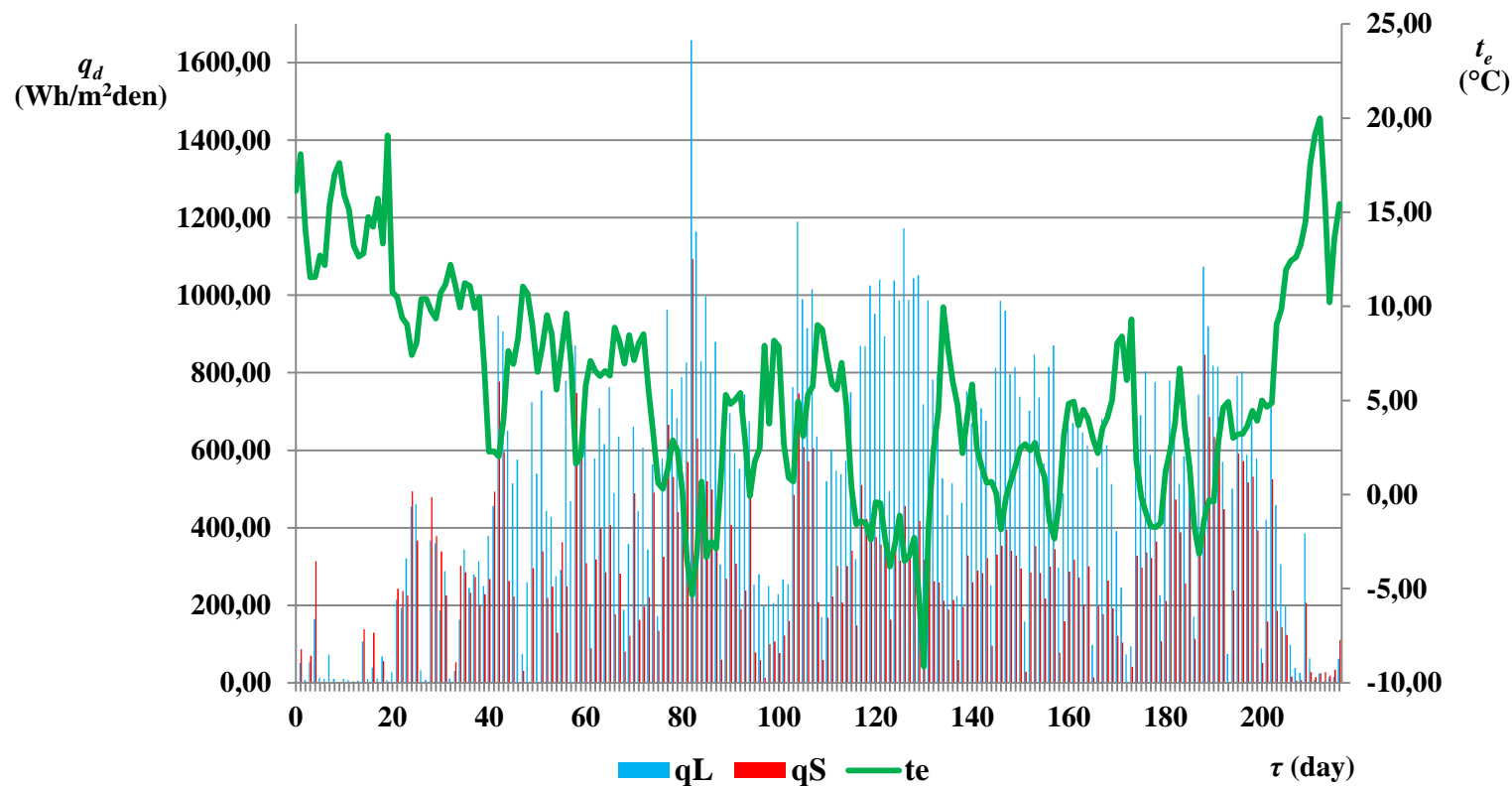
Rovnice teplot půdního masivu v topném období :

$$t_{02} = 8,924 + 7,934 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 2,232\right) \quad I_{02L}^2 = 0,941 \quad (^\circ\text{C}) \quad (8)$$

$$t_L = 9,461 + 6,746 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 1,925\right) \quad I_L^2 = 0,983 \quad (^\circ\text{C}) \quad (9)$$

$$t_S = 8,325 + 7,666 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 2,073\right) \quad I_S^2 = 0,961 \quad (^\circ\text{C}) \quad (10)$$

τ - počet dní od začátku vytápění (den).



Obr. 5 Tepla odvedená půdnímu masivu lineárními výměníky v topném období 2012/2013 (217 dní).
 q_d - teplo odvedené 1 m^2 (7,96 m) teplosměnné plochy výměníku ($\text{Wh/m}^2\text{den}$).

Měrná tepla odvedená půdnímu masivu q_d	Lineární výměník	Výměník Slinky
Průměrná hodnota (Wh/m ² .den)	503,38	264,25
Maximální hodnota (Wh/m ² .den)	1 658,30	1093,47
Celkem za topné období (kWh/m ²)	109,23	57,34

Tab. II. Měrná tepla odvedená půdnímu masivu v topném období 2012/2013 (217 dní).
 q - teplo odvedené 1 m² teplosměnné plochy výměníku (Wh/m².den).

$$\text{Celkem za topné období} = \sum_{\tau=1}^{\tau=217} q_d \quad (\text{kWh/m}^2)$$

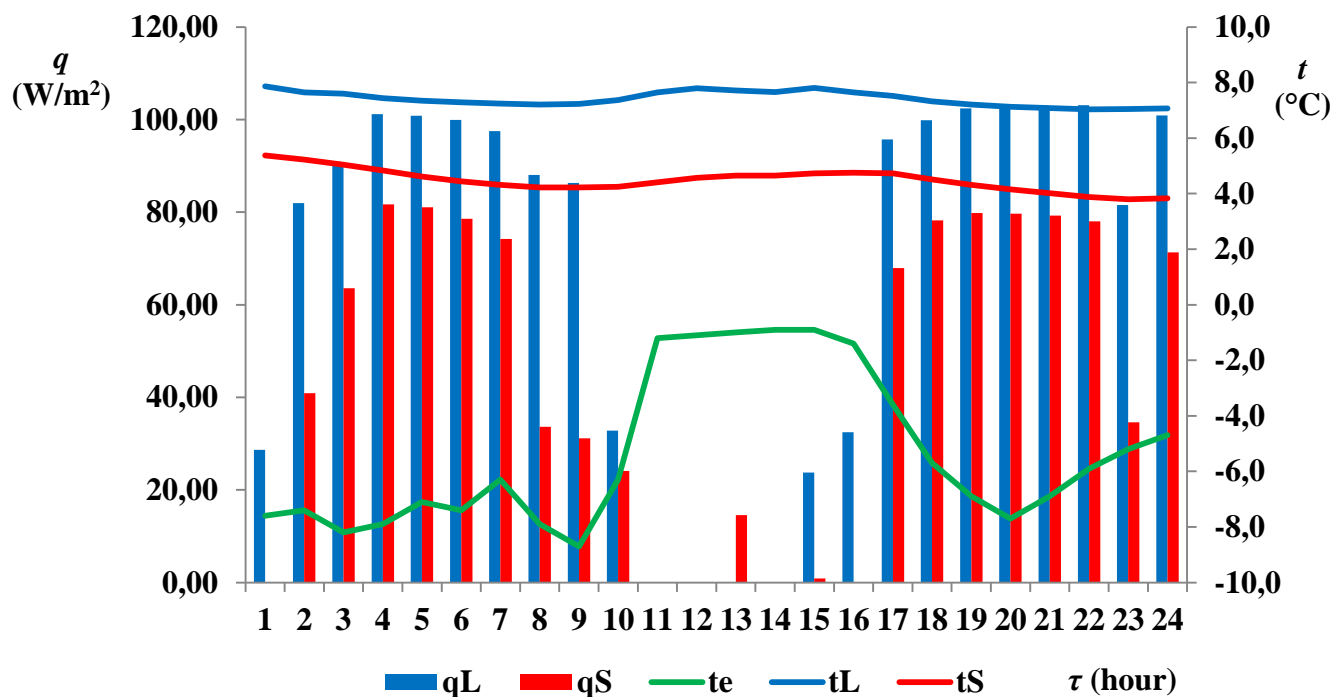
Typ výměníku	Teplota teplotnosné kapaliny (°C)			
	Z výměníku		Do výměníku	
	Průměrná	Minimální	Průměrná	Minimální
Lineární	8.13	1.67	5.80	-2.09
Slink	6.37	0.39	5.86	-2.02

Tab. III Teploty teplotnosné kapaliny v topném období 2012/2013.

Bod tuhnutí teplotnosné kapaliny (33 % C₂H₆O + 67 % H₂O) -17,4 °C. Výsledky měření ukázaly, že minimální teplota teplotnosné kapaliny na výstupu z tepelného čerpadla byla -2,09 °C. Vyhovující by tedy pro ověřované výměníky byla nižší koncentrace, např. 20 % etylalkoholu, kdy teplota tuhnutí směsi je -9,0 °C.

Ohřev teplotnosné kapaliny přepočtený na 1 m² plochy výměníku:

- Lineární výměník při objemovém toku teplotnosné kapaliny 6,15·10⁻⁵ m³/s, 0,0562 K/m².
- Výměník typu Slinky při objemovém toku teplotnosné kapaliny 3,849·10⁻⁵ m³/s 0,0254 K/m².



Obr.7 Teploty půdního masivu a měrné tepelné výkony horizontálních výměníků v typickém zimním dnu.

$$(t_{e,\phi} = -5,33 \text{ } ^\circ\text{C}; t_{e,max.} = -0,90 \text{ } ^\circ\text{C}; t_{e,min.} = -8,70 \text{ } ^\circ\text{C})$$

q – výkon výměníku přepočtený na 1 m² teplosměnné plochy (W/m²)

Měrný tepelný výkon, teplo odvedené půdnímu masivu	Lineární výměník	Výměník typu Slinky
Průměrný výkon (W/m ²)	68,84	45,54
Maximální výkon (W/m ²)	103,12	81,66
Teplo odvedené za 24 h (Wh/m ²)	1652,19	1092,98

Tab. IV. Měrné tepelné výkony a teplo odvedené půdnímu masivu za 24h
 q – výkon výměníku přepočtený na 1 m² teplosměnné plochy (W/m²).

Faktory ovlivňující spolehlivost zemního výměníku ve funkci nízkopotenciálního zdroje pro TČ:

- **Plocha zemního masivu s výměníkem musí být dostatečně velká, aby došlo v letním období k regeneraci tepla odvedeného v zimním období akumulací solárního a atmosférického tepla. Důležité může být rovněž teplo dodávané zemnímu masivu dešťovými srážkami.**
- **Potrubí zemního výměníku musí být dostatečně dlouhé, aby odpovídalo špičkovému zatížení pro vytápění (nebo chlazení).**
- **Hloubka uložení zemního výměníku musí být optimalizována jak z hlediska extrémních zimních teplot (tak, abychom měli dostatečný objem zemního masivu jako zdroje tepla), tak i z hlediska akumulace tepla do zemního masivu během teplejších měsíců v roce.**
- **Půda by měla být dostatečně tepelně vodivá, aby efektivně přenášela teplo do teplosměnné plochy výměníku.**
- **Kontakt mezi zemním masivem a potrubím výměníku musí být efektivní z hlediska sdílení tepla.**
- **Potrubí výměníku by mělo být vyrobeno z materiálu, který je odolný, pevný a dostatečně tepelně vodivý.**

- Teplonosná kapalina by měla účinně sdílet teplo ze stěny potrubí výměníku neměla by být příliš viskózní, měla by mít nízkou toxicitu, měla by mít teplotu tuhnutí pod minimální provozní teplotou systému, a v ideálním případě by neměly být hořlavá.
- Primární okruh musí být vybaven pojistným ventilem, expanzní nádobou, filtrem a sestavou armatur pro napouštění a odvzdušnění výměníku.
- Primární okruh by měl pracovat s teplotním spádem 2 – 5 K.

Závěry z ověřování zemních výměníků:

- Teploty půdního masivu v oblasti výměníků byly v topném období kladné. Vyšší teploty půdního masivu v oblasti lineárního výměníku umožní použít vyšších teplot vypařování chladiva a tím zvýšit COP tepelného čerpadla.
- Průběhy teplot půdního masivu v topném období a v období stagnace výměníku lze s dostatečnou přesností vyjádřit jednoduchými rovnicemi (8), (9), (10) a (5), (6), (7). Znalost průběhu teplot půdního masivu na povrchu, nebo v jeho blízkosti tvoří, spolu se znalostí tepelných charakteristik půdního masivu a teplot okolního prostředí, důležité podklady pro projekci a řízení energetických systémů s tepelnými čerpadly;

- Teploty zemního masivu v oblasti obou výměníků byly po větší část topného období vyšší než teploty okolního prostředí. Výsledky ověřování potvrzují výhody HGHE jako zdroje nízkopotenciální energie a to zejména z hlediska HSPF;
- Teploty půdního masivu ve 3 topných obdobích ukazují, že rozdíly teplot na počátcích a koncích topných období nejsou významné. Výsledky naznačují, že půdní masiv lze považovat za stabilní nízkopotenciální zdroj energie s dlouhou životností.
- Měrné tepelné toky odvedené půdnímu masivu v topném období jsou u lineárního výměníku významně vyšší, než u výměníku Slinky. Vyšší odvedené teplo u lineárního výměníku však nezpůsobuje, díky většímu objemu půdního masivu, nižší teploty půdy v oblasti výměníku;
- Průměrné teploty teplotnosné kapaliny vystupující z lineárního výměníku byly vyšší než z výměníku Slinky. Minimální teploty teplotnosné kapaliny vstupující do výměníku byly u obou výměníků shodné a dosahovaly výjimečně záporných hodnot;
- Významnou příčinou nevýhodného laminárního proudění nebo proudění v přechodové oblasti je vysoká koncentrace etylalkoholu v teplotnosné kapalině, která neodpovídá minimálním provozním teplotám teplotnosné kapaliny.

Děkuji za pozornost